

(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  
25. Juni 2015 (25.06.2015)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 2015/091920 A2**

(51) Internationale Patentklassifikation:  
**G01B 9/02** (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2014/078678

(22) Internationales Anmeldedatum:  
19. Dezember 2014 (19.12.2014)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:  
10 2013 226 668.5  
19. Dezember 2013 (19.12.2013) DE

(71) Anmelder: **CARL ZEISS SMT GMBH** [DE/DE];  
Rudolf-Eber-Strasse 2, 73447 Oberkochen (DE).

(72) Erfinder: **SCHULTE, Stefan**; Am Teich 6, 73432 Aalen-Waldhausen (DE). **SCHILLKE, Frank**; Scheurenfeldstraße 6, 73434 Aalen (DE).

(74) Anwalt: **WILHELM & BECK**; Prinzenstr. 13, 80639 München (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, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, 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, 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).

Veröffentlicht:

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe g)

(54) Title: METHOD FOR MEASURING A SPHERICAL-ASTIGMATIC OPTICAL AREA

(54) Bezeichnung : VERFAHREN ZUM VERMESSEN EINER SPHÄRISCH-ASTIGMATISCHEN OPTISCHEN FLÄCHE

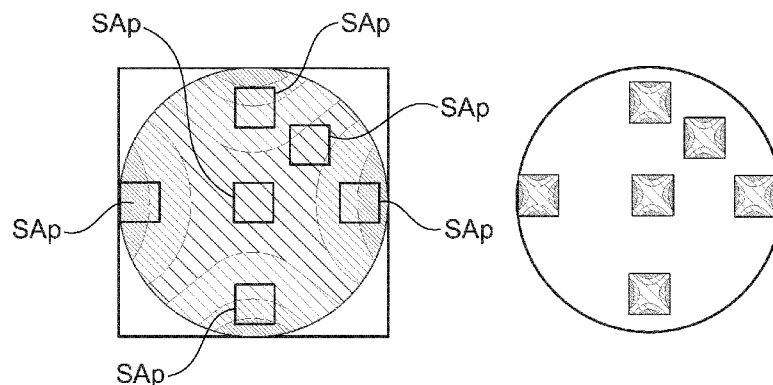


Fig. 1

(57) Abstract: Method for measuring a spherical-astigmatic optical area (40), comprising the steps of: a) generating a spherical-astigmatic wavefront as a test wavefront by means of a wavefront generating apparatus (10); b) interferometrically measuring wavefront aberrations between the wavefront generating apparatus (10) and the spherical-astigmatic area (40) which is adjusted to the wavefront generating apparatus (40) in such a way that the test wavefront impinges any point in the spherical-astigmatic area (40) substantially in a vertical direction, a plurality of measurements being taken in which the spherical-astigmatic area (40) is measured in a number of positions, spherized about the two centers of the radii of the astigmatism and/or rotated by 180° about a surface normal to the spherical-astigmatic area (40), such that corresponding interferogram phases are determined; and c) determining the wavefront of the wavefront generating apparatus (10) and of a shape of the spherical-astigmatic area (40) by means of a mathematical reconstructive method, whereupon the surface of the spherical-astigmatic area (40) is corrected using a suitable processing method, steps a) to c) being repeated until the wavefront aberrations are smaller than a defined threshold value.

(57) Zusammenfassung:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



WO 2015/091920 A2



---

Verfahren zum Vermessen einer sphärisch-astigmatischen optischen Fläche (40), aufweisend die Schritte: a) Generieren einer sphärisch-astigmatischen Wellenfront als Prüfwellenfront mittels einer Wellenfronterzeugungseinrichtung (10); b) Interferometrisches Vermessen von Wellenfrontdifferenzen zwischen der Wellenfronterzeugungseinrichtung (10) und der an die Wellenfronterzeugungseinrichtung (10) derart angepassten sphärisch-astigmatischen Fläche (40), dass die Prüfwellenfront an jedem Punkt der sphärisch-astigmatischen Fläche (40) im Wesentlichen senkrecht auftrifft, wobei mehrere Messungen durchgeführt werden, bei denen die sphärisch-astigmatische Fläche (40) in mehreren Positionen verkugelt um die beiden astigmatischen Radiusmittelpunkte und/oder um  $180^\circ$  verdreht um eine Flächennormale der sphärisch-astigmatischen Fläche (40) vermessen wird, wobei entsprechende Interferogrammphasen bestimmt werden; und c) Ermitteln der Wellenfront der Wellenfronterzeugungseinrichtung (10) und einer Oberflächenform der sphärisch-astigmatischen Fläche (40) mittels eines mathematischen Rekonstruktionsverfahrens, wonach die Oberfläche der sphärisch-astigmatischen Fläche (40) mittels einer geeigneten Bearbeitungsmethode korrigiert wird, wobei die Schritte a) bis c) so oft wiederholt werden, bis die Wellenfrontdifferenzen unter einem definierten Schwellwert liegen.

Beschreibung

Verfahren zum Vermessen einer sphärisch-astigmatischen optischen Fläche

5

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Vermessen einer sphärisch-astigmatischen optischen Fläche. Die Erfindung betrifft ferner ein Verfahren zum Vermessen einer sphärisch-astigmatischen optischen Freiformfläche. Die Erfindung betrifft ferner eine Prüfvorrichtung für eine Form einer optischen Freiformfläche. Die Erfindung betrifft ferner eine optische Freiformfläche.

10

Diese Patentanmeldung beansprucht die Priorität der deutschen Patentanmeldung DE 10 2013 226 668.5, deren Offenbarungsgehalt hiermit durch Rückbezug aufgenommen wird.

15

Stand der Technik

Astigmatische optische Flächen und Freiformflächen mit großem astigmatischem Anteil können mithilfe eines computergenerierten Hologramms (CGH) interferometrisch geprüft werden, indem das CGH so ausgelegt wird, dass es eine Wellenfront erzeugt, die an jeder Position auf der Sollfläche senkrecht steht, so dass der Prüfling flächenhaft in Autokollimation vermessen wird.

25

Freiformflächen weisen im Unterschied zu rotationssymmetrischen Asphären allerdings keine Drehinvarianz auf, daher kann eine interferometrische Vermessung der Oberfläche im Allgemeinen nur in genau einer Relativposition zwischen CGH und Prüfling stattfinden. Dies bedeutet eine starke Einschränkung der Messgenauigkeit von Freiformflächen gegenüber rotationssymmetrischen Asphären, weil bei letzteren durch die Messung in theoretisch beliebig vielen Drehstellungen die nicht rotationssymmetrischen Fehlerbeiträge von Interferometer und Prüfling sauber getrennt werden können. Die erreichbare Passgenauigkeit liegt in diesem Fall bei ca. 20pm rms.

35

Bei Freiformflächen liegt die Passegenauigkeit hingegen aktuell nur bei ca. 1nm, da die Fehlerbeiträge des Interferometers, insbesondere die des CGHs, separat qualifiziert werden müssen. Dies ist nur mit einer solchen Genauigkeit für die einzelnen Parameter möglich, dass eine Gesamt-Messgenauigkeit im einstelligen Nanometerbereich erreicht wird. Einige der Parameter des CGHs sind Ätztiefe, Tastverhältnis, Trenching, Passe, Homogenität des CGH-Substrats, usw. Bei astigmatischen Flächen sind gegenüber Freiformflächen zudem zwei Drehstellungen des Interferometers möglich, nämlich  $0^\circ$  und  $180^\circ$ , weil der Astigmatismus eine zweizählige Drehinvarianz aufweist.

Nachteilig gibt es zurzeit keine Absolutkalibrierverfahren für Freiformflächen, wie sie zum Beispiel für sphärische Flächen existieren (z.B. Cateye-Kalibrierung, Drehschiebe-Verfahren, usw.).

Clemens Elster, „Exact two-dimensional wave-front reconstruction from lateral shearing interferograms with large shears“, Applied Optics Vol. 39, No. 29, 10 October 2000 offenbart ein Verfahren zum Rekonstruieren bzw. Entfalten von Fehlern auf einer optischen Fläche, wobei eine Scheerung zweier optischen Flächen zueinander gemessen wird, wonach aus den gescherten Wellenfronten durch Integration bzw. Entfaltung die ursprüngliche Wellenfrontform bzw. die Oberflächenform des Prüflings rekonstruiert wird.

Offenbarung der Erfindung

Es ist eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein verbessertes Verfahren zum Vermessen einer sphärisch-astigmatischen optischen Fläche bereitzustellen.

35

Insbesondere soll die optische Freiformfläche vom hier sogenannten sphärisch-astigmatischen Typ sein. Darunter wird hier verstanden, dass sich ihre Form als Überlagerung einer

Kugelfläche und einer rein astigmatischen Fläche darstellen lässt, wobei diese Überlagerung als Addition der Pfeilhöhen der astigmatischen Fläche zu den Pfeilhöhen der Kugelfläche in Normalenrichtung verstanden wird.

5 Die Aufgabe wird gemäß einem ersten Aspekt gelöst mit einem Verfahren zum Vermessen einer sphärisch-astigmatischen optischen Fläche, aufweisend die Schritte:

- 10 a) Generieren einer sphärisch-astigmatischen Wellenfront als Prüfwellenfront mittels einer Wellenfronterzeugungseinrichtung;
- 15 b) Interferometrisches Vermessen von Wellenfrontdifferenzen zwischen der Wellenfronterzeugungseinrichtung und der an die Wellenfronterzeugungseinrichtung derart angepassten sphärisch-astigmatischen Fläche, dass die Prüfwellenfront an jedem Punkt der sphärisch-astigmatischen Fläche im Wesentlichen senkrecht auftrifft, wobei mehrere Messungen durchgeführt werden, bei denen die sphärisch-astigmatische Fläche in mehreren Positionen verkugelt um die beiden astigmatischen Radiusmittelpunkte und/oder um  $180^\circ$  verdreht um eine Flächennormale der sphärisch-astigmatischen Fläche vermessen wird, wobei entsprechende Interferogrammphasen bestimmt werden; und
- 20 c) Ermitteln der Wellenfront der Wellenfronterzeugungseinrichtung und einer Oberflächenform der sphärisch-astigmatischen Fläche mittels eines mathematischen Rekonstruktionsverfahrens, wonach die Oberfläche der sphärisch-astigmatischen Fläche mittels einer geeigneten Bearbeitungsmethode korrigiert wird, wobei die Schritte a) bis c) so oft  
25 wiederholt werden, bis die Wellenfrontdifferenzen unter einem definierten Schwellwert liegen.  
30

Auf diese Weise kann mittels eines sogenannten Schiebe- Schiebe-Verfahrens sphärisch-astigmatische Flächen vermessen bzw. absolut kalibriert werden. Mittels eines Trennens der Fehler der Wellenfronterzeugungseinrichtung und der sphärisch-astigmatischen Fläche können die Wellenfrontformen der Wellenfronterzeugungseinrichtung und der sphärisch-astigmatischen Fläche sehr exakt bestimmt werden. Vorzugsweise ist die sphärisch-astigmatische Fläche im Durchmesser nur geringfügig, insbesondere ca. 5 bis 10 % größer als die Wellenfronterzeugungseinrichtung.

10

Gemäß einem zweiten Aspekt wird die Aufgabe gelöst mit einem Verfahren zum Vermessen einer sphärisch-astigmatischen optischen Freiformfläche, aufweisend die Schritte:

- a) Generieren einer sphärisch-astigmatischen Wellenfront als Prüfwellenfront mittels einer Wellenfronterzeugungseinrichtung, die mittels des Verfahrens nach Anspruch 2 mittels eines Kalibrierelements kalibriert wurde;
- b) Interferometrisches Messen von Bereichen der sphärisch-astigmatischen optischen Freiformfläche mittels der Prüfwellenfront, wobei die Prüfwellenfront in jedem Bereich im Wesentlichen senkrecht auf die Freiformfläche auftrifft, wobei die Bereiche der Freiformfläche und die Prüfwellenfront gegeneinander verschoben und/oder verkugelt werden und die entsprechenden Interferogrammphasen bestimmt werden; und
- c) Zusammensetzen der Freiformfläche aus den einzelnen Bereichen, wobei mittels eines mathematischen Rekonstruktionsverfahrens die Abweichungen der Prüfwellenfront und der sphärisch-astigmatischen Freiformfläche von ihren Sollwerten getrennt werden.

30

Gemäß einem dritten Aspekt wird die Aufgabe gelöst mit einer Prüfvorrichtung für eine Form einer optischen Freiformfläche, aufweisend eine Prüfoptik, aufweisend:

- eine Wellenfronterzeugungseinrichtung zum Erzeugen einer an die Freiformfläche angepassten sphärisch-astigmatischen Wellenfront als eine Prüfwellenfront, wobei mittels der Prüfwellenfront jeweils mindestens Teilbereiche der Freiformfläche interferometrisch prüfbar sind und wobei die Abweichung der angepassten Wellenfront von ihrer Sollform mit dem unter dem zweiten Aspekt der Erfindung genannten Kalibrierverfahren ermittelbar ist.

10 Gemäß einem vierten Aspekt wird die Aufgabe gelöst mit einer optischen Freiformfläche, wobei ein astigmatischer Anteil einer Abweichung der Freiformfläche von einer bestangepassten Sphäre wenigstens ca. 80% beträgt.

15 Gemäß einem fünften Aspekt wird die Aufgabe gelöst mit einer optischen Freiformfläche, wobei ein astigmatischer Anteil einer Abweichung der Freiformfläche von einer bestangepassten Sphäre wenigstens ca. 90% beträgt.

20 Bevorzugte Ausführungsformen der erfindungsgemäßen Verfahren, der erfindungsgemäßen Prüfvorrichtung und der erfindungsgemäßen Freiformflächen sind Gegenstand von Unteransprüchen.

25 Eine bevorzugte Ausführungsform des Verfahrens sieht vor, dass in Schritt c) die Wellenfront der Wellenfronterzeugungseinrichtung korrigiert wird, wobei die Schritte a) bis c) so oft wiederholt werden, bis die Wellenfrontdifferenzen unter einem definierten Schwellwert liegen. Auf diese Art und Weise kann eine Wellenfronterzeugungseinrichtung in Form eines refraktiven Fizeaelements vorteilhaft solange nachbearbeitet werden, bis vorgegebene Spezifikationen erfüllt sind.

35 Eine bevorzugte Ausführungsform des Verfahrens zum Vermessen einer sphärisch-astigmatischen Freiformfläche sieht vor,

dass Bereiche als Subaperturen der Freiformfläche ausgebildet sind, wobei ein Abrastern der Subaperturen unter Verwendung der sphärisch-astigmatischen Prüfwellenfront durchgeführt wird. Vorteilhaft wird dadurch eine Art scannendes  
5 Verfahren durchgeführt, mit dem Freiformflächen einer bestimmten Klasse nahezu vollständig absolutkalibriert werden können, nämlich solche, deren Abweichungen von einer bestpassenden Sphäre überwiegend astigmatisch sind.

10 Weitere bevorzugte Ausführungsformen der Verfahren sehen vor, dass ein relatives Bewegen zwischen der sphärisch-astigmatischen Fläche bzw. der Freiformfläche und der Wellenfronterzeugungseinrichtung gemäß einer vordefinierten Bahnkurve derart durchgeführt wird, dass eine im Wesentlichen  
15 flächendeckende Messung der sphärisch-astigmatischen Fläche bzw. der Freiformfläche durchgeführt wird. Vorteilhaft kann auf diese Weise ein effizientes Kalibrieren der Wellenfronterzeugungseinrichtung und ein Messen der Freiformfläche in Bereichen durchgeführt werden, in denen die Abweichungen der  
20 Prüfwellenfront und die der Freiformfläche von ihren jeweiligen Sollwerten gut voneinander getrennt werden können.

Eine weitere bevorzugte Ausführungsform des Verfahrens zum Vermessen einer sphärisch-astigmatischen optischen Freiformfläche sieht vor, dass Teilverkugelungen in Richtungen von  
25 Achsen der astigmatischen Fläche der Subaperturen durchgeführt werden, wobei jede Teilverkuglung um den in der entsprechenden Achse gültigen Radiusmittelpunkt durchgeführt wird. Auf diese Weise sind im Ergebnis gut auswertbare Interferogramme realisierbar, die gut voneinander separierte  
30 Abweichungen der Prüfwellenfront und der Form der Freiformfläche ermöglichen.

Weitere bevorzugte Ausführungsformen der Verfahren sehen  
35 vor, dass die interferometrischen Messungen jeweils um  $180^\circ$  verdreht wiederholt durchgeführt werden. Auf diese Weise

wird vorteilhaft eine  $180^\circ$  Rotationsinvarianz der astigmatischen Grundform der Subaperturen der Freiformfläche ausgenutzt.

5 Unter Bezugnahme auf ein im Wesentlichen senkrecht auftreffendes Prüfwellenfront auf die sphärisch-astigmatische Fläche bzw. auf die Freiformfläche wird im Zusammenhang mit der vorliegenden Erfindung darauf hingewiesen, dass das Auftreffen sowohl ein  
10 exakt senkrecht auftreffendes als auch ein Auftreffen unter einem Winkel umfasst, welcher einen vorgegebenen, von der Normalen abweichenden Winkelbetrag nicht überschreitet.

In bevorzugten Ausführungsformen des erfindungsgemäßen Verfahrens kann hierzu vorgesehen sein, dass das Auftreffen der Prüfwellenfront höchstens mit einer definierten Abweichung von der  
15 Normalen erfolgt.

Bevorzugte Ausführungsformen der Verfahren sehen hierzu vor, dass das Auftreffen der Prüfwellenfront auf der sphärisch-astigmatischen Fläche bzw. auf der Freiformfläche mit einer maximalen  
20 Abweichung von der Normalen im einstelligen mrad-Bereich erfolgen kann.

In bevorzugten Ausführungsformen der Verfahren kann hierzu vorgesehen sein, dass die Prüfwellenfront auf die sphärisch-astigmatische Fläche bzw. die Freiformfläche mit einer maximalen Abweichung von der Normalen von 5 mrad auftrifft.  
25

In bevorzugten Ausführungsformen der Verfahren kann hierzu vorgesehen sein, dass die Prüfwellenfront mit einer maximalen Abweichung von der Normalen von 2 mrad auf die sphärisch-astigmatische Fläche bzw. auf die Freiformfläche auftrifft.  
30

In bevorzugten Ausführungsformen der Verfahren kann hierzu vorgesehen sein, dass die Prüfwellenfront mit einer maximalen Abweichung von der Normalen von 1 mrad auf die sphärisch-astigmatische Fläche bzw. auf die Freiformfläche auftrifft. Kriterium für alle genannten Ausführungsformen mit definiertem maximalem Auftreffwinkel der Prüfwellenfront ist jeweils, dass ein interferometrisches Messen der sphärisch-astigmatischen Fläche bzw. der Freiformfläche mit der erforderlichen Genauigkeit zuverlässig durchgeführt werden kann.

10 Eine bevorzugte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Prüfvorrichtung sieht vor, dass die Wellenfronterzeugungseinrichtung ein Anpassungselement zum Ändern einer Wellenfront in die Prüfwellenfront umfasst. Dadurch kann vorteilhaft die Prüfwellenfront individuell auf einfache Weise an die spezielle Form der jeweils zu prüfenden sphärisch-astigmatischen Fläche bzw. der Freiformfläche angepasst werden.

Eine weitere bevorzugte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Prüfvorrichtung sieht vor, dass für jede zu prüfende sphärisch-astigmatische Fläche bzw. Freiformfläche ein computergeneriertes Hologramm gebildet wird, welches eine Wellenfront erzeugt, die an eine Krümmung und einen mittleren Astigmatismus der sphärisch-astigmatischen Fläche bzw. der Freiformfläche angepasst ist. Vorteilhaft kann durch das unter dem ersten Aspekt der Erfindung aufgeführte Kalibrierverfahren für jede einzelne sphärisch-astigmatische Fläche bzw. Freiformfläche eine hochgenaue Oberflächenprüfung durchgeführt werden.

30 Eine weitere bevorzugte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Prüfvorrichtung sieht vor, dass die Wellenfronterzeugungseinrichtung eine plane oder sphärische Referenzfläche mit einer Zusatzoptik zur Erzeugung einer angepassten sphärisch-astigmatischen Wellenfront umfasst. Dadurch werden vorteilhaft unterschiedliche Möglichkeiten zur Generierung der angepassten Prüfwellenfront bereitgestellt.

Eine weitere bevorzugte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Prüfvorrichtung sieht vor, dass die optische Freiformfläche in einzelnen Subaperturen prüfbar ist. Vorteilhaft kann dadurch eine komplette Freiformfläche in einzelne Bereiche unterteilt werden, in denen abgesehen von einer sphärischen Grundkrümmung jeweils im Wesentlichen astigmatische Oberflächenverhältnisse vorherrschen, die einfach und präzise absolutkalibriert werden können.

10 Vorteilhafte Weiterbildungen der erfindungsgemäßen optischen Freiformflächen zeichnen sich dadurch aus, dass die angegebene Abweichung der Form der Freiformfläche von einer bestangepassten Sphäre einen rms-Wert oder einen PV-Wert dieser Abweichungen repräsentiert. Dadurch können verschiedenartige  
15 Gestalten der Abweichungen der Freiformfläche von einer bestangepassten Sphäre in einheitlicher Art und Weise beschrieben werden. Unter dem rms-Wert (engl. root-mean-square) wird hier die mittlere quadratische Abweichung verstanden. Unter dem PV-Wert wird hier die Spannweite zwischen  
20 kleinstem und größtem Wert verstanden.

#### Vorteile der Erfindung

Als besonders vorteilhaft wird angesehen, dass es mittels  
25 der erfindungsgemäßen Verfahren und der erfindungsgemäßen Prüfvorrichtung möglich ist, eine Absolutkalibrierung von im Wesentlichen rein sphärisch-astigmatischen Flächen und von sphärisch-astigmatischen Freiformflächen durchzuführen. Dadurch wird die Möglichkeit eröffnet, kalibrierte astigmatische Referenzflächen herzustellen, deren Form deutlich näher an einer Sollpasse von Freiformflächen liegt als eine rein sphärische Referenz, was dadurch begründet ist, dass der Hauptanteil von Freiformflächen häufig astigmatisch ist. Im Ergebnis ist es damit möglich, optische Freiformflächen  
35 nach vorgegebenen Spezifikationen hochgenau zu fertigen und zu prüfen bzw. zu kalibrieren.

Dies wird auch dadurch ermöglicht, dass bei einer Relativbewegung zwischen Prüfling und Prüfwellenfront vorteilhaft im von der Prüfvorrichtung erzeugten Interferogramm im Wesentlichen lediglich Verkippungen zwischen vom Prüfling reflektierter Wellenfront und der von einer Referenzfläche der Prüfvorrichtung reflektierten interferometrischen Referenzwellenfront beobachtet werden. Nach Justage dieser Verkippungen verbleibende Wellenfrontmeßwerte werden genau erhalten und ermöglichen einen genauen Rückschluss auf Abweichungen der Form der Freiformfläche von einer bestpassenden Sphäre.

Damit ermöglicht die Erfindung insbesondere eine Erweiterung eines Messspektrums von Subapertur-Interferometern. Es kann mithilfe der herstellbaren Anpassungselemente eine Vielzahl an Freiformflächen im mittel- bis hochfrequenten Ortsfrequenzspektrum gefertigt und geprüft werden. Prüfungen zum Zwecke einer Kalibrierung sind ebenfalls umfasst.

Vorteilhaft folgt aus der Erfindung die Möglichkeit zu einer vollflächigen Kalibrierung von Prüfaufbauten für sphärisch-astigmatische Flächen analog zur Drehschiebe-Kalibrierung von Sphären.

Die Erfindung wird im Folgenden mit weiteren Merkmalen und Vorteilen anhand von mehreren Figuren detailliert beschrieben. Dabei bilden alle beschriebenen oder dargestellten Merkmale für sich oder in beliebiger Kombination den Gegenstand der Erfindung, unabhängig von ihrer Zusammenfassung in den Patentansprüchen oder deren Rückbeziehung, sowie unabhängig von ihrer Formulierung bzw. Darstellung in der Beschreibung bzw. in den Figuren. Die Figuren sind vor allem dazu gedacht, die erfindungswesentlichen Prinzipien zu verdeutlichen und sind nicht notwendigerweise maßstabsgetreu dargestellt. In den Figuren haben gleiche oder funktionsgleiche Elemente gleiche Bezugsziffern.

In den Figuren zeigt:

- Fig. 1 eine prinzipielle Darstellung einer Unterteilung einer zu prüfenden Freiformfläche in Subaperturen;
- 5 Fig. 2 eine prinzipielle Darstellung eines Trennens von Fehlerbeiträgen von Prüflingswellenfront und Referenzwellenfront;
- 10 Fig. 3 eine prinzipielle Darstellung eines Erkennens einer Fehlerart des Prüflings mittels des erfindungsgemäßen Verfahrens;
- Fig. 4 eine Prüfoptik zur Prüfung einer sphärisch-astigmatischen Oberfläche;
- 15 Fig. 5 eine prinzipielle Darstellung einer erfindungsgemäßen Prüfvorrichtung, bestehend aus einer Vorrichtung, die die sphärisch-astigmatische Prüfwellenfront erzeugt und einem reflektierendem Kalibrier-CGH zur Absolutkalibrierung der Prüfwellenfront;
- 20 Fig. 6a eine Querschnittsansicht eines refraktiven Fizeau-elements;
- 25 Fig. 6b eine Querschnittsansicht durch ein CGH-Fizeau-element;
- Fig. 7 eine prinzipielle Schnittansicht durch ein EUVL-Projektionsobjektiv; und
- 30 Fig. 8 ein prinzipielles Ablaufdiagramm einer Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Vermessen einer optischen Freiformfläche.
- 35 Ausführungsformen der Erfindung

Die Erfindung stellt im Prinzip eine Erweiterung eines für sphärische Flächen bekannten Drehschiebe-Verfahrens dar.

Eine sphärische Fläche ist invariant gegenüber Drehungen um die Flächennormale und einer beliebigen Verkugelung um ihren Radiusmittelpunkt.

- 5 Analog dazu ist eine sphärisch-astigmatische Fläche nahezu invariant gegenüber einer beliebigen Kombination von Verkugelungen in Richtung der beiden „Achsen“ des Astigmatismus der Fläche, wobei jede Teilverkugelung um den in der entsprechenden Achse gültigen Radienmittelpunkt erfolgen muss.

10

Die genannten Gegebenheiten einer sphärisch-astigmatischen Fläche kann man nunmehr ausnutzen, um eine interferometrisch zu prüfende sphärisch-astigmatische Fläche gegen eine astigmatische Referenzwellenfront makroskopisch in beliebige  
15 Richtungen zu verschieben bzw. zu verkugeln, wodurch auswertbare Interferogramme mit hinreichend kleinen Wellenfrontgradienten erzeugt und mathematisch ausgewertet werden können. Durch die zueinander verschobenen Wellenfronten ist es möglich, die Fehlerbeiträge von Prüflings- und Referenzwelle zu trennen und somit eine Absolutkalibrierung der gesamten Freiformfläche zu erreichen. Auf diese Weise können  
20 Interferometerfehler von Prüflingsfehlern getrennt werden, wodurch ermittelt werden kann, welche Fehler dem Prüfling und welche Fehler dem Interferometer zugerechnet werden können. Dabei sind astigmatische Deformationen bis in den Millimeter-Bereich denkbar.

Bei einer beispielsweise rotationssymmetrischen Asphäre führt im Allgemeinen eine Verkugelung von wenigen 10  $\mu\text{m}$  zu  
30 derart großen Wellenfrontgradienten, dass das Interferogramm nicht mehr auswertbar ist. Bei sphärisch-astigmatischen Flächen ergibt sich hier ein sogenannter Dämpfungsfaktor von ca. 1000 bei Asphärizitäten bis zu 1 mm. Das Grundprinzip der Verkugelbarkeit astigmatischer Flächen gegeneinander  
35 ist, dass die Scherung von Astigmatismus gegen sich selbst eine Kippung ergibt, die größtenteils durch eine Kippung der Elemente gegeneinander kompensiert werden kann, wodurch sich die obengenannte Dämpfung ergibt.

Die Rekonstruktion der Prüflingswellenfront kann nun durch eine mittels bekannter Verfahren durchgeführte mathematische Trennung der in jedem Interferogramm konstanten Anteile (Interferometerfehler) und dem mit dem Prüfling „mitschiebenden“ Anteil erfolgen.

Eine weitere Erhöhung der Genauigkeit kann über die  $180^\circ$  Rotationsinvarianz von astigmatischen Flächen erreicht werden. Man kann deshalb die gesamte Verschiebeprozedur in einer zweiten um  $180^\circ$  verdrehten Drehstellung der Flächen zueinander wiederholen, um auf diese Weise eine bessere Mittelung bzw. Konsistenz der Messungen zu erzielen.

Bei herkömmlichen Drehschiebe-Verfahren können nur nahezu sphärische Flächen absolut kalibriert werden. Die Absolutkalibrierung von rotationssymmetrischen Asphären bezieht sich nur auf den nicht-rotationssymmetrischen Anteil der Fläche bzw. der Prüfoptik, der rotationssymmetrische Anteil wird über eine Qualifizierung (d.h. eine einmalig nicht im Prüfaufbau („extern“) durchgeführte Bestimmung von Fehlerbeiträgen der Prüfoptik), und nicht über eine Kalibrierung bestimmt.

Erfindungsgemäß ist es möglich, eine nahezu vollständige Absolutkalibrierung einer ganzen Klasse von asphärischen Flächen durchzuführen, nämlich solcher asphärischen Flächen, welche sphärisch-astigmatischen Charakter haben. Erforderlich ist dazu eine sphärisch-astigmatische Wellenfront, die zum Beispiel mittels eines CGHs in einem Interferometer erzeugt wird, oder mittels einer sphärisch-astigmatischen Referenzfläche, wobei diese an die zu prüfende Freiformfläche („Prüfling“) grob angepasst sein sollte. Passfehler des Prüflings sollten durch einen Vorbearbeitungsprozess derart klein sein, dass sie gegen die generierte sphärisch-astigmatische Prüfwellenfront interferometrisch messbar sind.

Eine sphärisch-astigmatische Wellenfront im Sinne der Erfindung ist eine Wellenfront, die mittels einer Addition der Pfeilhöhen einer Kugelwelle mit denen einer astigmatischen Welle generiert wird.

5

Vorgesehen ist eine Vorrichtung, um den Prüfling um seinen jeweiligen (x- und y-) Radiusmittelpunkt makroskopisch in beliebiger Richtung zu verkugeln, bevorzugt um wenigstens ca. 10 %, noch mehr bevorzugt um ca. 50 % seines Durchmessers. Weiterhin sollte der Prüfling in allen Freiheitsgraden, insbesondere Kippung und Azimut, fein justierbar sein, d.h. im  $\mu\text{m}$ - bzw. im  $\mu\text{rad}$ -Bereich.

10

Die derart beschriebene „Schiebe-Schiebe“-Kalibrierung kann, wie oben erwähnt, unter  $180^\circ$  Rotation des Prüflings zur Referenz wiederholt werden.

15

Der Betrag der Verkuglung kann variiert werden, es sollte jedoch mindestens um ca. 5% des Prüflingsdurchmessers geschert bzw. geschoben werden, um eine hinreichend gute Trennung zwischen Prüflings- und Referenzwellenfront zu erreichen.

20

Fig. 1 zeigt sechs Subaperturen SAp einer sphärisch-astigmatischen Fläche, die alle im Wesentlichen die gleiche Deformation aufweisen. Dies ermöglicht eine Absolutkalibrierung, indem man zwei sphärisch-astigmatische Flächen gegeneinander verschiebt/verkugelt, die Interferogrammphasen bestimmt und über ein mathematisches Rekonstruktionsverfahren die Wellenfrontbeiträge von Prüflingswellenfront und Referenzwellenfront trennt. Dazu ist ein hinreichend großer Satz an Phasenbildern von verschiedenen Relativpositionen erforderlich.

25

30

Die Skalen in den Subaperturen SAp zeigen linear verlaufende Grauabstufungen, die das Höhenprofil eines Prüflings repräsentieren. Jede Subapertur SAp ist mit einer anderen lokalen Kippung beaufschlagt. Beim Anmessen jeder einzelnen Sub-

35

apertur SAp kann durch Verkippen des Prüflings oder des Interferometers quasi der gleiche astigmatische Phasenverlauf erzeugt werden, wie im Kreis rechts dargestellt. Da in jeder Subapertur SAp der Astigmatismus ähnlich ist, kann dieser in der Wellenfronterzeugungseinrichtung vorgehalten werden. Die Grundkrümmung der Fläche erscheint nicht im Interferogramm, weil, wie in Fig. 5 dargestellt, der Prüfstrahlengang angepasst divergent verläuft.

10 Nachgekippt wird der Prüfling oder das Interferometer somit zum Zwecke eines Minimierens des Phasengradienten im Interferogramm der jeweiligen Subapertur SAp. Der allen Subaperturen SAp gemeinsame Deformationsanteil kann nun als konstanter Anteil in die Prüfoptik (Kompensationssystem) 15 eingeführt werden, so dass dieser immer gleiche Phasengradient aus den Interferogrammen der einzelnen Subaperturen SAp verschwindet, womit die Messdynamik deutlich erhöht wird. Die dargestellten sechs Subaperturen SAp sind selbstverständlich lediglich beispielhaft zu sehen, wobei in der Praxis 20 Prüflinge mit bis zu ca. 1000 Subaperturen kalibriert werden.

Fig. 2 soll andeuten, dass die Subaperturen SAp in x- und y-Richtung gegeneinander verschoben und/oder verkugelt und um 25  $180^\circ$  gegeneinander verdreht werden können, um die Fehlerbeiträge von Prüflingswellenfront und Referenzwellenfront voneinander zu trennen. Es wird also einerseits eine Verschiebung durchgeführt, wodurch vorteilhaft nur kleine Änderungen der idealen Wellenfront resultieren. Zusätzlich kann der 30 Prüfling auch um  $180^\circ$  rotiert bzw. verdreht werden, wobei diese Verdrehung eine zusätzliche Möglichkeit darstellt, um Fehler des Prüflings 40 besser getrennt zu erfassen. Vorteilhaft wird auf diese Weise ein zusätzlicher Freiheitsgrad in der Relativbewegung zwischen dem Prüfling und der Referenzwellenfront bereitgestellt. 35

Die rechte Darstellung von Fig. 2 deutet alle im Gesamtsystem einstellbaren Freiheitsgrade (Verdrehung/

Verschiebung/Verkugelung) an, ohne dass dadurch das Interferogramm unbrauchbar wird. Insbesondere kann um einen Radiusmittelpunkt verkugelt oder der Prüfling um  $180^\circ$  verdreht werden, wobei in allen diesen Fällen eine Wellenfront im Wesentlichen senkrecht auf den Prüfling trifft.

Auf diese Weise können vorteilhaft Relativmessungen durchgeführt und die Interferometerwellenfront von der Prüflingswellenfront getrennt werden. Im Ergebnis bleiben Interferometerfehler „somit stehen“ und Prüflingsfehler „bewegen sich mit“, wobei diese Fehler dann rechnerisch mittels eines mathematischen Rekonstruktionsverfahrens voneinander getrennt werden können.

Fig. 2 verdeutlicht somit, dass die sphärisch-astigmatische Wellenfront und Teilbereiche des Prüflings gegeneinander verschoben und um  $180^\circ$  gedreht werden können, ohne dass die Wellenfronten merklich geändert werden.

Fig. 3 zeigt beispielhaft einen erfindungsgemäß detektierbaren bzw. kalibrierbaren Fehler eines Prüflings in Form einer Koma. Fig. 3 zeigt in den Darstellungen b) und c) Scherwellenfronten (Ableitungen) einer in Fig. 3a dargestellten Koma auf der Prüflingswellenfront. Darstellung b) zeigt prinzipiell eine Kombination aus Fokus und Astigmatismus, wenn die Koma gegen sich selbst geschert bzw. verschoben wird. Die Scherterme resultieren dabei teilweise in Justageanteilen. Diese können durch  $180^\circ$  Drehung erfindungsgemäß eindeutig von tatsächlich vorhandenen Prüflingsdeformationen getrennt werden. Die Figur soll somit andeuten, welche Fehlerbeiträge man durch eine  $180^\circ$  Drehung der Prüfoptik erkennen kann. Wenn auf dem Prüfling eine Koma vorhanden ist und der Prüfling um  $180^\circ$  gedreht wird, dreht sich im Ergebnis die Koma mit, wie in Darstellung c) erkennbar ist.

Im Fall einer geradzahligen Aberration, wie z.B. 4-Welligkeit, 6-Welligkeit, etc. würde das nicht funktionieren, weil

sich diese aufgrund ihrer Invarianz gegenüber  $180^\circ$  Drehungen nicht mitdreht.

Fig. 4 zeigt, dass die Absolutkalibrierung einer astigmati-  
5 schen Fläche zum Beispiel auf einem „Verkugelungs-Mount“  
durchgeführt werden kann, indem der Prüfling in verschiede-  
nen, durch Verkuglung bewirkten „Schiebepositionen“ relativ  
zur vom CGH erzeugten Referenzwellenfront gemessen wird. An-  
schließend wird die Absolutwellenfront des Prüflings durch  
10 mathematische Rekonstruktion ermittelt.

Fig. 4 zeigt ein Anpassungselement 20, z.B. in Form eines  
CGHs, welches die eigentliche Referenz- bzw. Prüfwelle er-  
zeugt. Ein unterhalb des Anpassungselements 20 angeordnetes  
15 Prisma stellt eine Hilfsfunktion für eine Prüfoptik bereit,  
indem es einen vertikalen Parallelstrahl aus dem Interfero-  
meter derart umlenkt, dass dieser schräg auf das Anpassungs-  
element 20 einfällt.

20 Eine Planwelle trifft von unten kommend auf das Anpassungs-  
element 20, wodurch das Anpassungselement 20 eine sphärisch-  
astigmatische Wellenfront erzeugt. Die schwarze gekrümmte  
Linie deutet einen Abschnitt eines Prüflings 40 mit einer  
Subapertur SAp an.

25 Der Prüfling 40 wird vorzugsweise auf eine Halterung (nicht  
dargestellt) montiert, auf der er um seinen Radiusmittel-  
punkt in x- und y-Richtung verkugelt und um  $180^\circ$  verdreht  
werden kann. Das ist deshalb möglich, weil das Anpassungs-  
30 element 20 im Wesentlichen eine Wellenfront erzeugt, die ei-  
ner Oberflächengestaltung des Prüflings 40 entspricht. Sehr  
günstig ist es, dass mittels des Anpassungselements 20 eine  
rein sphärisch-astigmatische Wellenfront erzeugt wird. Im  
Prinzip deutet Fig. 4 also an, dass zur Prüfung einer Frei-  
35 formfläche eine bestmögliche Anpassung der sphärisch-astig-  
matischen Referenzwellenfront an die Freiformfläche vorzuse-  
hen ist.

Fig. 5 zeigt eine Ausführungsform der erfindungsgemäßen Prüfvorrichtung. Erkennbar ist eine Prüfvorrichtung 100 mit einem Fizeauelement 10 mit einer im Wesentlichen planen Referenzfläche 11. Ferner sind ein Anpassungselement 20 (astigmatisches CGH) und ein Kalibrierelement 30 (Kalibrier-CGH) in Reflexion vorgesehen. Für eine Absolutkalibrierung der astigmatischen Wellenfront des Anpassungselements 20 kann mittels eines Sensorkopfes (nicht dargestellt) der Kalibriermaschine die Wellenfront des Anpassungselements 20 gegen das Kalibrierelement 30 beliebig verkugelt werden. Das Kalibrierelement 30 ist derart ausgelegt, dass es die Welle in sich selbst (in Autokollimation) zurückwirft, wenn diese ihre Sollform hat.

Bei der eigentlichen Vermessung der Oberfläche des Prüflings 40 (nicht dargestellt in Fig. 5) ist dann das Kalibrierelement 30 gegen den Prüfling in Form der Freiformfläche auszutauschen. Erkennbar ist, dass ein Radiusmittelpunkt R einer Grundsphäre innerhalb der Wellenfronterzeugungseinrichtung 10 angeordnet ist, was jedoch von der zu erzeugenden Wellenfrontform abhängt, so dass dieser durchaus auch außerhalb der Wellenfronterzeugungseinrichtung 10 angeordnet sein könnte. Der unterste Abschnitt des Strahlengangs, der mit einem Doppelpfeil hervorgehoben ist, repräsentiert die Prüfwelle.

In der Praxis ist vorgesehen, dass die Prüfoptik, aufweisend das Fizeauelement 10 mit der Referenzfläche 11 und einem Anpassungselement 20 in Form eines CGHs gekippt wird, wobei ein beweglicher interferometrischer Sensor (nicht dargestellt) relativ zum Prüfling 40 vorgesehen ist. Ziel ist dabei jedesmal, die Wellenfront möglichst senkrecht bzw. im Wesentlichen senkrecht auf den Prüfling 40 auftreffen zu lassen.

Im Wesentlichen senkrecht bedeutet in diesem Zusammenhang, dass ein interferometrisches Messen der sphärisch-astigmati-

schen Fläche bzw. der Freiformfläche mit erforderlicher Genauigkeit möglich sein muss, wobei dies auch bei nicht exakt senkrechtem Einfall der Prüfwellenfront auf die sphärisch-astigmatische Fläche bzw. Freiformfläche erreicht werden  
5 kann. Es hat sich herausgestellt, dass eine maximal zulässige Abweichung von der Normalen im einstelligen mrad-Bereich liegen, insbesondere max. 5 mrad, insbesondere max. 2 mrad, insbesondere max. 1 mrad betragen kann. Dieses Erfordernis gilt für jede einzelne der zu messenden Subaperturen  
10 SAp.

Im Folgenden wird im Detail ein Ablauf eines erfindungsgemäßen Herstellungsprozesses für eine sphärisch-astigmatische Freiformfläche beschrieben, wobei eine Voraussetzung für das  
15 Funktionieren des Herstellungsverfahrens ist, dass wenigstens 80% einer Abweichung der Freiformfläche von einer bestpassenden Sphäre astigmatisch ist.

Zur Bestimmung der bestangepassten („bestpassenden“) kugelsymmetrischen Oberfläche kann beispielsweise als Kriterium die mittlere quadratische Abweichung („rms-Wert“) der asphärischen Oberfläche von der zu vergleichenden kugelsymmetrischen Oberfläche in einer vorgegebenen Richtung minimiert  
20 werden. Ein alternatives Kriterium zur Bestimmung der bestangepassten kugelsymmetrischen Oberfläche umfasst den Peak-to-Valley Wert („PV-Wert“), der einen Abstand zwischen einem höchstgelegenen und einem tiefstgelegenen Punkt der Freiformfläche abzüglich der kugelsymmetrischen Fläche repräsentiert. Das sinnvollste Kriterium ist, die Sphäre so zu wählen,  
25 30 len, dass das Maximum des (Betrages des) Gradienten der Differenz zwischen Freiformfläche und anzupassender Sphäre minimal wird.

Eine bestangepasste bzw. bestpassende Sphäre im Sinne der  
35 Erfindung ist somit eine kugelsymmetrische Form, deren Abweichung von der Gesamtform der Freiformfläche minimal ist.

Vorzugsweise wird die gesamte Freiformfläche derart in einzelne Subaperturen  $S_{Ap}$  aufgeteilt, dass dadurch ein Restgradient innerhalb jeder einzelnen Subapertur  $S_{Ap}$  vorzugsweise kleiner als ca. 2 mrad ist. Dieser Restgradient bezieht sich auf die relativen Winkel der Flächennormalen zueinander. In der Praxis kann dies beispielsweise bedeuten, dass ein Kreis der Subapertur  $S_{Ap}$  einen Durchmesser von ca. 10 mm aufweist, weil bei einer größeren Subapertur  $S_{Ap}$  nicht mehr sinnvoll gemessen werden kann.

10

Zunächst wird für die optische Freiformfläche ein Designprozess durchgeführt, beispielsweise für einen abbildenden Spiegel eines EUVL-Objektivs (engl. extreme ultra violet lithography). Insbesondere wird für die Freiformfläche der bestpassende Radius (engl. Best-Fit Radius) und Astigmatismus für einen Kalibrierprozess bestimmt.

15

Danach wird ein sphärisch-astigmatisches Fizeaelement ausgelegt, wobei eine Anpassung der beiden Radien des durch das Fizeaelement erzeugten Astigmatismus in zueinander orthogonalen Schnittebenen unter Berücksichtigung eines angestrebten Arbeitsabstandes des Fizeaelements zur Freiformfläche erfolgt. Der genannte Arbeitsabstand ist ein Sollabstand zwischen der Wellenfronterzeugungseinrichtung 10 und der Freiformfläche während der durchzuführenden Messung.

20

25

Danach erfolgt eine Herstellung des Fizeaelements und einer passenden Gegenfläche (Kalibrierfläche) mit einem vorzugsweisen mindestens ca. 5% größeren Durchmesser als der Durchmesser des Fizeaelements, gegebenenfalls mit Hilfe eines Prüf-CGHs.

30

Anschließend erfolgt eine Absolutkalibrierung der Wellenfront des Fizeaelements durch die oben beschriebene Schiebe-Schiebe-Kalibrierung, gegebenenfalls unter Verwendung einer  $180^\circ$ -Drehung gegen die genannte ausschließlich sphärisch-astigmatische Gegenfläche und gegebenenfalls eine iterative Korrektur einer oder beider Wellenfronten.

35

Es erfolgt danach ein Einbau des derart hergestellten Fize-  
auelements in einen beweglichen interferometrischen Sensor  
sowie eine Justage des Sensors. Ein derartiger Sensor, mit  
5 dem Teilabschnitte der Freiformfläche vermessen werden kön-  
nen, ist beispielsweise aus US 2012/ 0229814 A1 oder DE  
10229816 A1 bekannt, deren Offenbarungen hier vollumfänglich  
mit aufgenommen werden.

10 Danach wird eine Bahnkurve für den interferometrischen Sen-  
sor relativ zur zu prüfenden Freiformfläche für eine flä-  
chendeckende Messung von Subaperturen SAp programmiert. Es  
erfolgt ein Einlegen und ein Justieren der zu prüfenden  
Freiformfläche in die Messapparatur mit dem interferometri-  
15 schen Sensor. Dadurch wird ein automatisiertes Abfahren der  
programmierten Bahnkurve sowie ein Aufnehmen von Interfe-  
renzbildern, sowie daraus ein Berechnen und Abspeichern von  
Oberflächentopographiebildern der einzelnen Subaperturen SAp  
ermöglicht. Vorzugsweise überlappen sich die einzelnen Sub-  
20 aperturen SAp zumindest derart, dass eine Vereinigungsmenge  
aller Subaperturen SAp eine Obermenge der gesamten Freiform-  
fläche ergibt.

Es wird sodann eine Oberflächenform des Prüflings in den  
25 einzelnen Subaperturen SAp unter Berücksichtigung der mit-  
tels der oben beschriebenen Absolutkalibrierung erhaltenen  
Form (Radius, Astigmatismus, Restpasse) des Fizeauelements  
berechnet.

30 Danach erfolgt eine Transformation der Subaperturkoordinaten  
in ein Koordinatensystem der Freiformfläche, weil das Messen  
von einzelnen Abschnitten der Fläche in einem lokalen Koor-  
dinatensystem durchgeführt worden ist. Schließlich erfolgt  
ein Zusammensetzen (engl. stitching) der Freiformfläche aus  
35 den einzelnen Subaperturen SAp zu einer Gesamtfläche.

Im Ergebnis ist jetzt ein Pfeilhöhen- bzw. ein Peak-to-Valley- bzw. ein PV-Wert der Freiformfläche auf der gesamten Oberfläche bekannt.

5 Es wird nunmehr die zu Beginn ausgelegte Sollform der Freiformfläche von der tatsächlichen Form der Freiformfläche subtrahiert, wobei eine Bewertung der Abweichung der Istform von der Sollform durchgeführt wird, danach wird die Freiformfläche gegebenenfalls entsprechend der bestimmten Abwei-  
10 chung von der Sollform nachbearbeitet.

Der ganze vorangehend beschriebene Prozess wird nunmehr iterativ solange durchgeführt, bis mittels formgebender Bearbeitungsschritte und Messloops erreicht wird, dass die Form  
15 der Freiformfläche innerhalb der geforderten Spezifikation ist.

Im Ergebnis lässt sich mit dem beschriebenen Verfahren eine Freiformfläche herstellen, die im mittel- bis hochfrequenten  
20 Bereich sehr genau herstell- und prüfbar ist, vorzugsweise im pm-Bereich für Pfeilhöhenverlauf, PV- oder rms-Wert.

Aus US 7,538,856 B2 und US 7,355,678 B2 sind EUVL-Projektionsobjektive bekannt, deren Spiegel mittels des erfindungsgemäßen Verfahrens prüf- und herstellbar sind. Ins-  
25 besondere ist das Verfahren für alle dort gezeigten Spiegel sinnvoll, weil alle genannten Spiegel abgesehen von einer Grundkrümmung vorwiegend astigmatisch ausgebildet sind.

30 Prinzipiell sind zwei verschiedene Arten von Fizeaelementen denkbar:

Fig. 6a zeigt einen Querschnitt durch ein refraktives Fizeaelement, bei dem durch eine Brechung eines Parallelstrahls  
35 PS an der Rückseite im Glas des Fizeaelements eine sphärisch-astigmatische Welle entsteht, die an jedem Punkt der sphärisch-astigmatischen Vorderseite des Glases senkrecht steht. Die durch das Glas durchtretende Welle ist damit

ebenfalls sphärisch-astigmatisch und über einen definierten Arbeitsabstand an eine zu prüfende sphärisch-astigmatische Fläche bzw. Freiformfläche (Prüfling 40) bestmöglich angepasst.

5

Fig. 6b zeigt eine Querschnittsansicht durch ein CGH-Fizeaelement mit einer Kombination aus Fizeauplatte (mit planer Referenzfläche 11 des Interferometers) und dem CGH. Das CGH erzeugt eine sphärisch-astigmatische Welle, die über

10 einen definierten Arbeitsabstand an einen zu prüfenden Prüfling 40 in Form einer sphärisch astigmatischen Fläche bzw. einer Freiformfläche bestmöglich angepasst ist, wodurch ein möglichst senkrechter Einfall auf die Prüffläche des Prüflings 40 generiert wird.

15

Beide Typen von Fizeaelementen können mithilfe einer angepassten rein sphärisch-astigmatischen Prüffläche oder mit einem entsprechenden Kalibrier-CGH mit dem beschriebenen Schiebe-Schiebeverfahren absolut kalibriert werden.

20

Fig. 7 zeigt eine bekannte prinzipielle Ansicht eines Linsenschnitts eines EUVL-Projektionsobjektivs mit einer ersten optischen Baugruppe G1 mit Spiegeln M1 und M2 sowie mit einer zweiten optischen Baugruppe G2 mit Spiegeln M3 bis M6. Insbesondere die Spiegel M5 und M6 sind als Freiformflächen ausgebildet, deren astigmatischer Anteil einer Abweichung von einer bestangepassten Sphäre wenigstens ca. 80% und in einer besonders bevorzugten Ausführungsform wenigstens ca. 90% beträgt. Denkbar sind auch EUVL-Projektionsobjektive

25 mit acht Spiegeln, von denen wenigstens ein Spiegel als Freiformfläche ausgebildet ist (nicht dargestellt).

30

Betreffend den ca. 80% bis ca. 90%-Anteil an der Gesamtabweichung der Prüflingspasse von der sphärischen Grundform sind mehrere relevante Größen zu beachten:

35

(i) PV oder rms der Abweichung der Freiformfläche von der sphärischen Grundform (= PV(FFF) bzw. rms(FFF))

(ii) PV oder rms des astigmatischen Anteils der Freiformfläche, zum Beispiel bestimmbar über den Fit von Zernike-Polynomen an die mathematische Flächenbeschreibung (= PV(Ast)

5 bzw. rms(Ast)

(iii) PV oder rms der Abweichung (i) nach Subtraktion des astigmatischen Anteils (ii) (= PV(Rest) bzw. rms(Rest)).

10 Die rms-Werte addieren, bzw. subtrahieren sich ungefähr quadratisch, da die mittels zweidimensionaler Polynome beschreibbaren Abweichungen von der sphärischen Grundform (hier zum einen „Astigmatismus“, zum anderen der verbleibende Restfehler) linearer unabhängig sind, d.h. dass gilt:

15

$$\text{rms(FFF)} = \text{SQRT}(\text{rms(Ast)}^2 + \text{rms(Rest)}^2)$$

Daraus folgt:

20

$$\text{rms(Ast)} = \text{SQRT}(\text{rms(FFF)}^2 - \text{rms(Rest)}^2)$$

Mit folgenden Abkürzungen:

25 SQRT ... Quadratwurzel  
 PV ... Peak-to-Valley-Wert  
 rms ... Root-Mean-Square-Wert  
 FFF ... Freiformfläche  
 Rest ... Restfehler

30 Für zum Beispiel mindestens 80% als sphärisch-astigmatischen Anteil an der Gesamtabweichung von der sphärischen Grundform kann man folgende Definition angeben:

35

$$\text{rms(Rest)/rms(FFF)} < 0,2 \quad (= 100\% - 80\%)$$

In Worten ausgedrückt bedeutet dies, dass der PV- oder rms-Wert der Abweichung der Freiformfläche von der Kugelform abzüglich des astigmatischen Anteils, normiert auf den PV-

oder rms-Wert der Gesamtabweichung der Freiformfläche von der Kugelform kleiner als ca. 20% sein soll.

5 Sämtliche vorgenannten mathematischen Beziehungen können statt des angeführten rms-Werts auch den PV-Wert beinhalten, wobei die Beziehungen für den PV-Wert nur näherungsweise, bzw. im Mittel gelten.

10 Mithilfe des erfindungsgemäßen Verfahrens lassen sich Freiformflächen herstellen und prüfen, deren astigmatischer Anteil an einer Gesamtabweichung der Freiformfläche von einer bestangepassten Sphäre typischerweise zwischen ca. 0,5mm und ca. 20mm PV-Wert beträgt. Dabei kann ein Grundradius der bestangepassten Sphäre zwischen ca.  $\geq 300$ mm und ca. Unendlich ( $\infty$ ) ausgebildet sein. Der Radius Unendlich ( $\infty$ ) entspricht dabei einer Planfläche.

20 Insbesondere lässt sich mit dem Verfahren eine Freiformfläche herstellen und prüfen, deren lokaler Gradientenverlauf in einer beliebigen Subapertur  $SA_p$ , die als ein Kreis mit einem Durchmesser von wenigstens ca. 10mm ausgebildet ist, nach Subtraktion einer Kippung, eines Fokus einer Prüfwelle und eines für den gesamten Spiegel konstanten rein astigmatischen Anteils maximal ca. 2 mrad PV beträgt.

25 Insbesondere lässt sich mit dem erfindungsgemäßen Verfahren eine Freiformfläche herstellen und prüfen, deren Abweichung von der Sollform in einem Ortswellenlängenband zwischen ca. 0,05mm und ca. 50mm Ortswellenlänge maximal ca. 100pm bis ca. 200pm, vorzugsweise maximal ca. 50pm bis 100pm, noch mehr bevorzugt maximal ca. 20pm beträgt.

35 Insbesondere lässt sich mit dem erfindungsgemäßen Verfahren eine Freiformfläche herstellen und prüfen, deren Abweichung von der Sollform im Ortswellenlängenband zwischen ca. 0,1mm und ca. 30mm Ortswellenlänge maximal ca. 100pm bis ca. 200pm, vorzugsweise maximal ca. 50pm bis 100pm, noch mehr bevorzugt maximal ca. 20pm beträgt.

Zusätzlich sind mittels des erfindungsgemäßen Verfahrens  
rein sphärisch-astigmatischen Flächen nach Abzug von Fokus  
und Astigmatismus mit einer Genauigkeit von ca. 20pm prüf-  
5 bar.

Fig. 8 zeigt ein prinzipielles Ablaufdiagramm einer Ausfüh-  
rungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Vermessen ei-  
ner sphärisch-astigmatischen Fläche.  
10

In einem ersten Schritt S1 wird ein Generieren einer sphä-  
risch-astigmatischen Wellenfront als Prüfwellenfront mittels  
einer Wellenfronterzeugungseinrichtung 10 durchgeführt.

15 In einem zweiten Schritt S2 erfolgt ein interferometrisches  
Vermessen von Wellenfrontdifferenzen zwischen der Wellen-  
fronterzeugungseinrichtung und der an die Wellenfronterzeu-  
gungseinrichtung derart angepassten sphärisch-astigmatischen  
Fläche, dass die Prüfwellenfront an jedem Punkt der sphä-  
20 risch-astigmatischen Fläche im Wesentlichen senkrecht auf-  
trifft, wobei mehrere Messungen durchgeführt werden, bei de-  
nen die sphärisch-astigmatische Fläche in mehreren Positio-  
nen verkugelt um die beiden astigmatischen Radiusmittel-  
punkte und/oder um  $180^\circ$  verdreht um eine Flächennormale der  
25 sphärisch-astigmatischen Fläche vermessen wird, wobei ent-  
sprechende Interferogrammphasen bestimmt werden.

Schließlich wird in einem dritten Schritt S3 ein Ermitteln  
der Wellenfront der Wellenfronterzeugungseinrichtung und ei-  
30 ner Oberflächenform der sphärisch-astigmatischen Fläche mit-  
tels eines mathematischen Rekonstruktionsverfahrens durchge-  
führt, wonach die Oberfläche der sphärisch-astigmatischen  
Fläche 40 mittels einer geeigneten Bearbeitungsmethode kor-  
rigiert wird, wobei die Schritte S1 bis S3 so oft wiederholt  
35 werden, bis die Wellenfrontdifferenzen unter einem definier-  
ten Schwellwert liegen.

Zusammenfassend werden mit der vorliegenden Erfindung ein Verfahren zum Vermessen einer sphärisch-astigmatischen optischen Fläche, ein Verfahren zum Vermessen einer sphärisch-astigmatischen optischen Freiformfläche sowie eine Prüfvorrichtung für eine Form einer optischen Freiformfläche vorgeschlagen.

Vorteilhaft ist mittels der Erfindung eine hochgenaue Fertigung und Passeprüfung von sphärisch-astigmatischen Flächen, insbesondere von Freiformflächen mit hohem sphärisch-astigmatischem Anteil ermöglicht. Vorteilhaft ist aufgrund des in Teilbereichen scannenden Prinzips die Freiformfläche hochaufgelöst messbar, wobei eine hohe Ortsauflösung und in bestimmten Frequenzbändern eine wesentlich höhere Genauigkeit als mit herkömmlichen Verfahren erreichbar ist. Vorteilhaft lassen sich auf die beschriebene Weise im pm-Bereich genaue Freiformflächen herstellen und vermessen.

Bevorzugt ist vorgesehen, dass für jeden Prüfling ein eigenes Kalibrier-CGH und/oder eine eigene sphärisch-astigmatische Kalibrierfläche gebildet wird. In der Praxis sind auf diese Weise vorteilhaft mehrere optische Komponenten für Objektive mit Freiformflächen exakt prüfbar.

Ausgenutzt wird für die Erfindung die Tatsache, dass die meisten Freiformflächen neben ihrer Grundkrümmung nur noch einen „Grundastigmatismus“ und nur schwach ausgeprägte weitere Abweichungsverlaufsanteile aufweisen, wobei für jede einzelne dieser Flächen eine Prüfoptik bestehend aus Erzeugungseinrichtung gebildet wird, wobei eine Referenzkrümmung und ein Referenzastigmatismus einer prüfenden Wellenfront an die Grundform des Prüflings angepasst wird.

Der Fachmann wird die beschriebenen Merkmale geeignet abändern oder miteinander kombinieren, ohne vom Kern der Erfindung abzuweichen.

## Ansprüche

- 5
1. Verfahren zum Vermessen einer sphärisch-astigmatischen optischen Fläche (40), aufweisend die Schritte:
- a) Generieren einer sphärisch-astigmatischen Wellenfront als Prüfwellenfront mittels einer Wellenfronterzeugungseinrichtung (10);
- 10
- b) Interferometrisches Vermessen von Wellenfrontdifferenzen zwischen der Wellenfronterzeugungseinrichtung (10) und der an die Wellenfronterzeugungseinrichtung (10) derart angepassten sphärisch-astigmatischen Fläche (40), dass die Prüfwellenfront an jedem Punkt der sphärisch-astigmatischen Fläche (40) im Wesentlichen senkrecht auftrifft, wobei mehrere Messungen durchgeführt werden, bei denen die sphärisch-astigmatische Fläche (40) in mehreren Positionen verkugelt um die beiden astigmatischen Radiusmittelpunkte und/oder um  $180^\circ$  verdreht um eine Flächennormale der sphärisch-astigmatischen Fläche (40) vermessen wird, wobei entsprechende Interferogrammphasen bestimmt werden; und
- 15
- c) Ermitteln der Wellenfront der Wellenfronterzeugungseinrichtung (10) und einer Oberflächenform der sphärisch-astigmatischen Fläche (40) mittels eines mathematischen Rekonstruktionsverfahrens, wonach die Oberfläche der sphärisch-astigmatischen Fläche (40) mittels einer geeigneten Bearbeitungsmethode korrigiert wird, wobei die Schritte a) bis c) so oft wiederholt werden, bis die Wellenfrontdifferenzen unter einem definierten Schwellwert liegen.
- 20
- 25
- 30
2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei in Schritt c) die Wellenfront der Wellenfronterzeugungseinrichtung (10) korrigiert

wird, wobei die Schritte a) bis c) so oft wiederholt werden, bis die Wellenfrontdifferenzen unter einem definierten Schwellwert liegen.

- 5 3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei die sphärisch-astigmatische Fläche (40) als ein Kalibrierelement (30) für die Wellenfronterzeugungseinrichtung (10) ausgebildet ist.
- 10 4. Verfahren zum Vermessen einer sphärisch-astigmatischen optischen Freiformfläche (40), aufweisend die Schritte:
- 15 a) Generieren einer sphärisch-astigmatischen Wellenfront als Prüfwellenfront mittels einer Wellenfronterzeugungseinrichtung (10), die mittels des Verfahrens nach Anspruch 3 mittels eines Kalibrierelements (30) kalibriert wurde;
- 20 b) Interferometrisches Messen von Bereichen (SAp) der sphärisch-astigmatischen optischen Freiformfläche (40) mittels der Prüfwellenfront, wobei die Prüfwellenfront in jedem Bereich (SAp) im Wesentlichen senkrecht auf die Freiformfläche (40) auftrifft, wobei die Bereiche (SAp) der Freiformfläche (40) und die Prüfwellenfront gegeneinander verschoben und/oder verkugelt werden und die entsprechenden Interferogrammphasen bestimmt werden; und
- 25 c) Zusammensetzen der Freiformfläche (40) aus den einzelnen Bereichen (SAp), wobei mittels eines mathematischen Rekonstruktionsverfahrens die Abweichungen der Prüfwellenfront und der sphärisch-astigmatischen Freiformfläche
- 30 (40) von ihren Sollwerten getrennt werden.
5. Verfahren nach Anspruch 4, wobei Bereiche (SAp) als Subaperturen der Freiformfläche (40) ausgebildet sind, wobei

ein Abrastern der Subaperturen unter Verwendung der sphärisch-astigmatischen Prüfwellenfront durchgeführt wird.

- 5 6. Verfahren nach Anspruch 5, wobei ein relatives Bewegun zwischen der Freiformfläche (40) und der Wellenfronterzeugungseinrichtung (10) gemäß einer vordefinierten Bahnkurve derart durchgeführt wird, dass eine im Wesentlichen flächendeckende Messung der Freiformfläche (40) durchgeführt wird.
- 10 7. Verfahren nach Anspruch 5 oder 6, wobei Teilverkugelungen in Richtungen von Achsen der astigmatischen Fläche der Subaperturen durchgeführt werden, wobei jede Teilverkuglung um den in der entsprechenden Achse gültigen Radiusmittelpunkt durchgeführt wird.
- 15 8. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 7, wobei die interferometrischen Messungen jeweils um  $180^\circ$  verdreht wiederholt durchgeführt werden.
- 20 9. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 8, wobei die Prüfwellenfront auf die Freiformfläche (40) mit einer maximalen Abweichung von der Normalen im einstelligen mrad-Bereich auftrifft.
- 25 10. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 bis 9, wobei die Wellenfronterzeugungseinrichtung (10) und die Freiformfläche (40) in einem iterativen Fertigungsprozess gefertigt werden.
- 30 11. Prüfvorrichtung (100) für eine Form einer optischen Freiformfläche (40), aufweisend eine Prüfoptik, aufweisend:

- eine Wellenfronterzeugungseinrichtung (10) zum Erzeugen einer an die Freiformfläche (40) angepassten sphärisch-astigmatischen Wellenfront als eine Prüfwellenfront, wobei mittels der Prüfwellenfront jeweils mindestens Teilbereiche (SAp) der Freiformfläche (40) interferometrisch prüfbar sind und wobei die Abweichung der angepassten Wellenfront von ihrer Sollform mittels des Verfahrens nach einem der Ansprüche 4 bis 10 ermittelbar ist.
- 5
- 10 12. Prüfvorrichtung (100) nach Anspruch 11, wobei die Wellenfronterzeugungseinrichtung (10) ein Anpassungselement (20) zum Ändern einer Wellenfront in die Prüfwellenfront umfasst.
- 15 13. Prüfvorrichtung (100) nach Anspruch 11 oder 12, wobei für jede zu prüfende Freiformfläche (40) ein computergeneriertes Hologramm gebildet wird, welches eine Wellenfront erzeugt, die an eine Krümmung und einen mittleren Astigmatismus der Freiformfläche (40) angepasst ist.
- 20
14. Prüfvorrichtung (100) nach Anspruch 12 oder 13, wobei die Wellenfronterzeugungseinrichtung (10) eine plane oder sphärische Referenzfläche mit einer Zusatzoptik zur Erzeugung einer angepassten sphärisch-astigmatischen Wellenfront umfasst.
- 25
15. Verfahren zum Herstellen einer optischen Freiformfläche (40) unter Verwendung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 4 bis 10 und der Prüfvorrichtung (100) nach einem der Ansprüche 10 bis 14, wobei ein Ausbilden der Freiformfläche (40) durchgeführt wird, und wobei die Freiformfläche (40) formgebend bearbeitet und die Schritte a) bis c) so lange durchge-
- 30

führt werden, bis eine Ist-Form der Freiformfläche (40) einer Sollform der Freiformfläche (40) im Wesentlichen entspricht.

- 5 16. Optische Freiformfläche (40), wobei ein astigmatischer Anteil einer Abweichung der Freiformfläche (40) von einer bestangepassten Sphäre wenigstens ca. 80% beträgt.
- 10 17. Optische Freiformfläche (40) nach Anspruch 16, wobei die Abweichung einen rms-Wert der Abweichung repräsentiert.
18. Optische Freiformfläche (40) nach Anspruch 17, wobei die Abweichung einen PV-Wert der Abweichung repräsentiert.
- 15 19. Optische Freiformfläche (40) nach Anspruch 18, wobei ein astigmatischer Anteil an einer Gesamtabweichung der Freiformfläche (40) von einer bestangepassten Sphäre zwischen ca. 0,5mm und ca. 20mm PV-Wert beträgt, wobei ein Grundradius der bestangepassten Sphäre zwischen ca.  $\geq 300$ mm und ca. Unendlich beträgt.
- 20 20. Abbildendes optisches System, wobei das abbildende optische System wenigstens ein EUVL-Projektionsobjektiv umfasst, wobei das wenigstens eine EUVL-Projektionsobjektiv wenigstens  
25 eine optische Freiformfläche (40) nach einem der Ansprüche 16 bis 19 aufweist.
- 30 21. Abbildendes optisches System, wobei das abbildende optische System wenigstens ein EUVL-Projektionsobjektiv umfasst, von dessen beiden in Strahlrichtung gesehen letzten Spiegeln wenigstens einer eine optische Freiformfläche (40) nach einem der Ansprüche 16 bis 19 aufweist.

22. Optische Freiformfläche (40), wobei ein astigmatischer Anteil einer Abweichung der Freiformfläche (40) von einer bestangepassten Sphäre wenigstens ca. 90% beträgt.
- 5 23. Optische Freiformfläche (40) nach Anspruch 22, wobei die Abweichung einen rms-Wert der Abweichung repräsentiert.
24. Optische Freiformfläche (40) nach Anspruch 22, wobei die Abweichung einen PV-Wert der Abweichung repräsentiert.
- 10 25. Optische Freiformfläche (40) nach Anspruch 24, wobei ein astigmatischer Anteil an einer Gesamtabweichung der Freiformfläche (40) von einer bestangepassten Sphäre zwischen ca. 0,5mm und ca. 20mm PV-Wert beträgt, wobei ein Grundradius der bestangepassten Sphäre zwischen ca.  $\geq 300$ mm und ca. Unendlich beträgt.
- 15 26. Abbildendes optisches System, welches wenigstens ein EUVL-Projektionsobjektiv umfasst, mit wenigstens einer optischen Freiformfläche (40) nach einem der Ansprüche 22 bis 25.
- 20 27. Abbildendes optisches System, wobei das abbildende optische System wenigstens ein EUVL-Projektionsobjektiv umfasst, von dessen beiden in Strahlrichtung gesehen letzten Spiegeln wenigstens einer eine optische Freiformfläche (40) nach einem der Ansprüche 22 bis 25 aufweist.
- 25

1/5

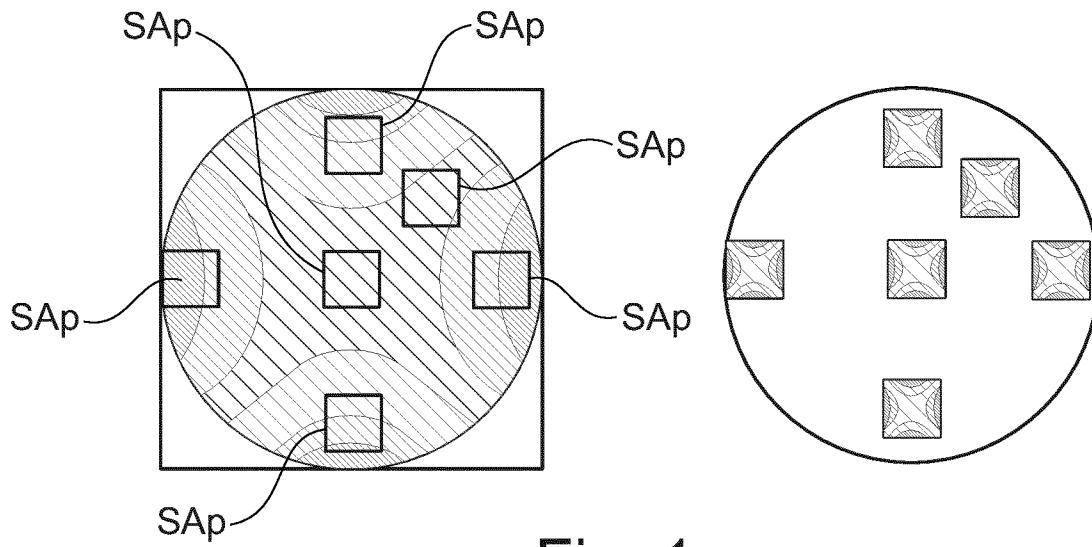


Fig. 1

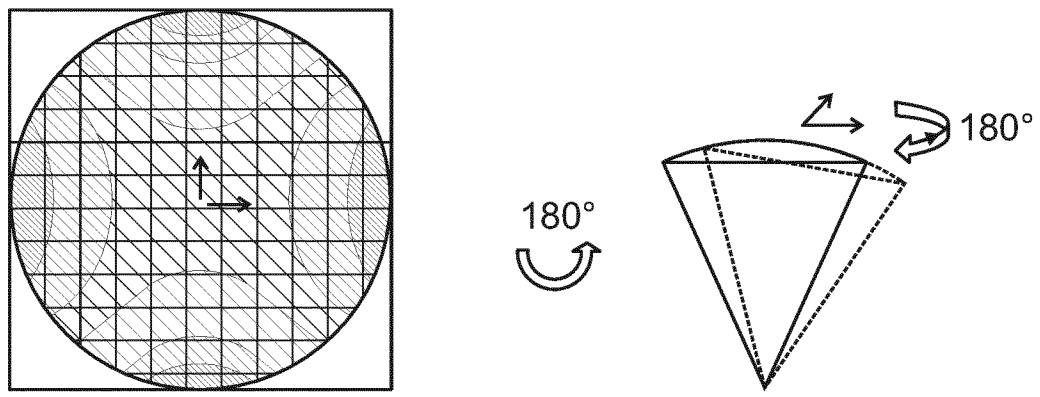


Fig. 2

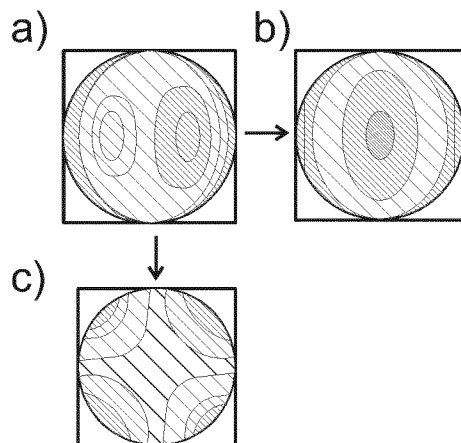


Fig. 3

2/5

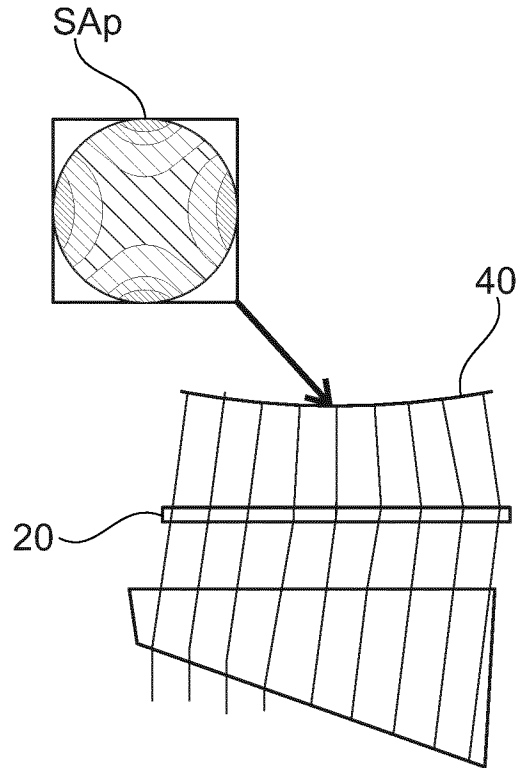


Fig. 4

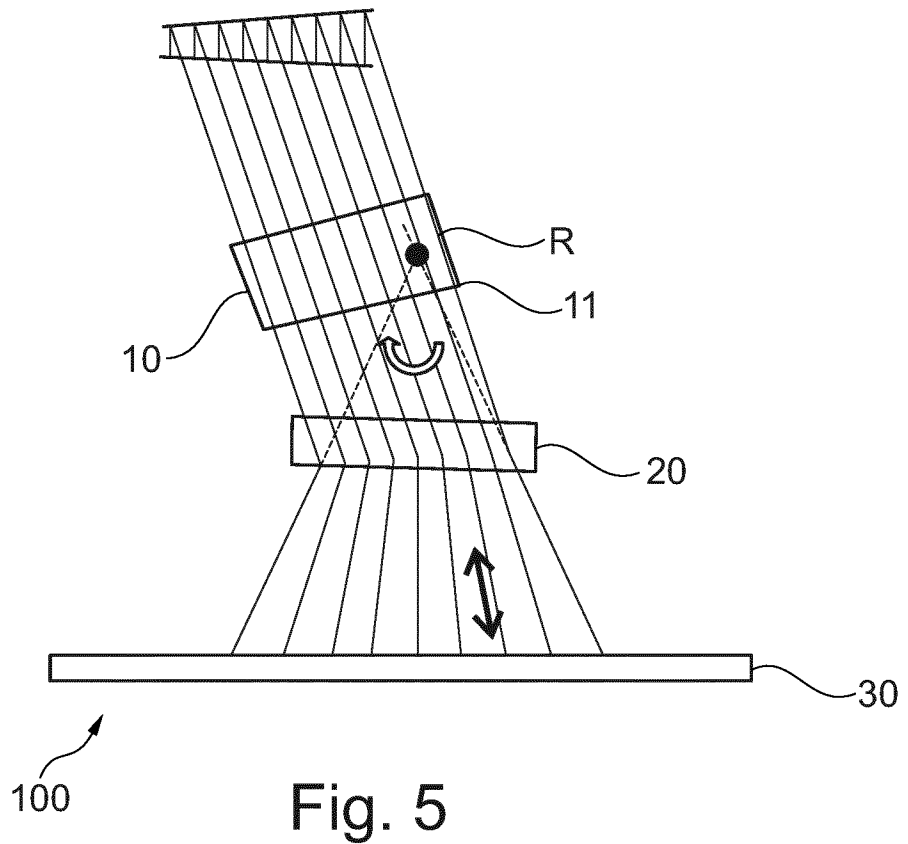


Fig. 5

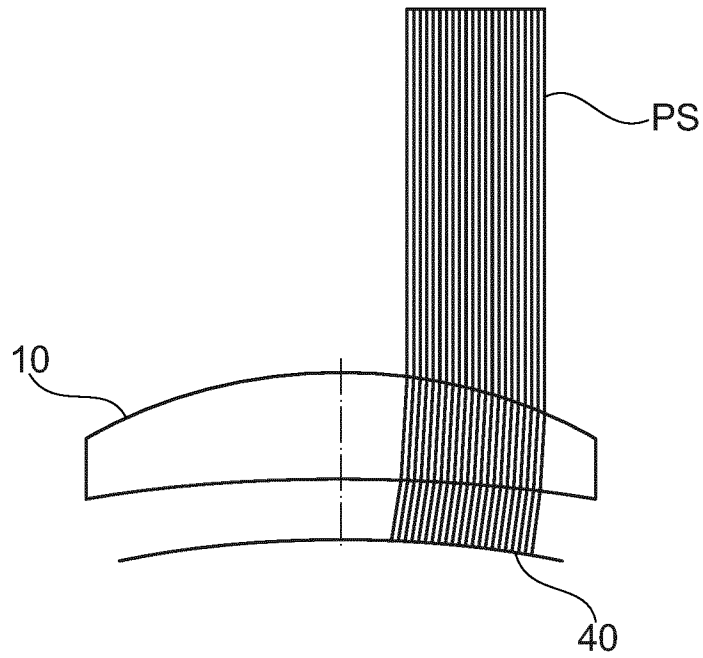


Fig. 6a

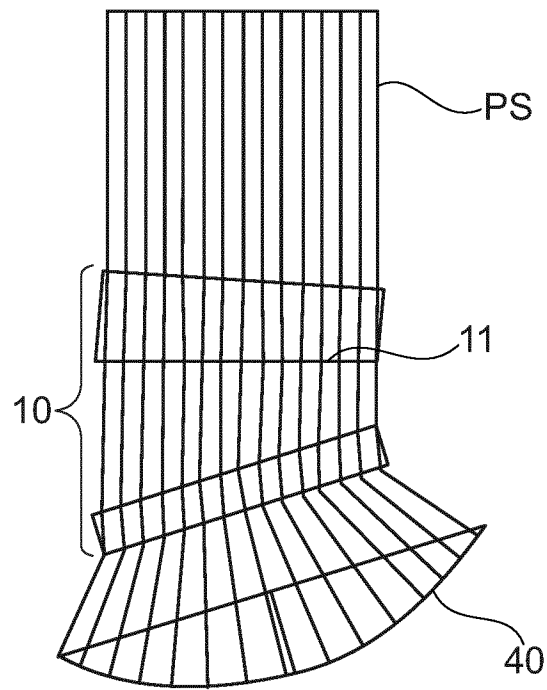


Fig. 6b

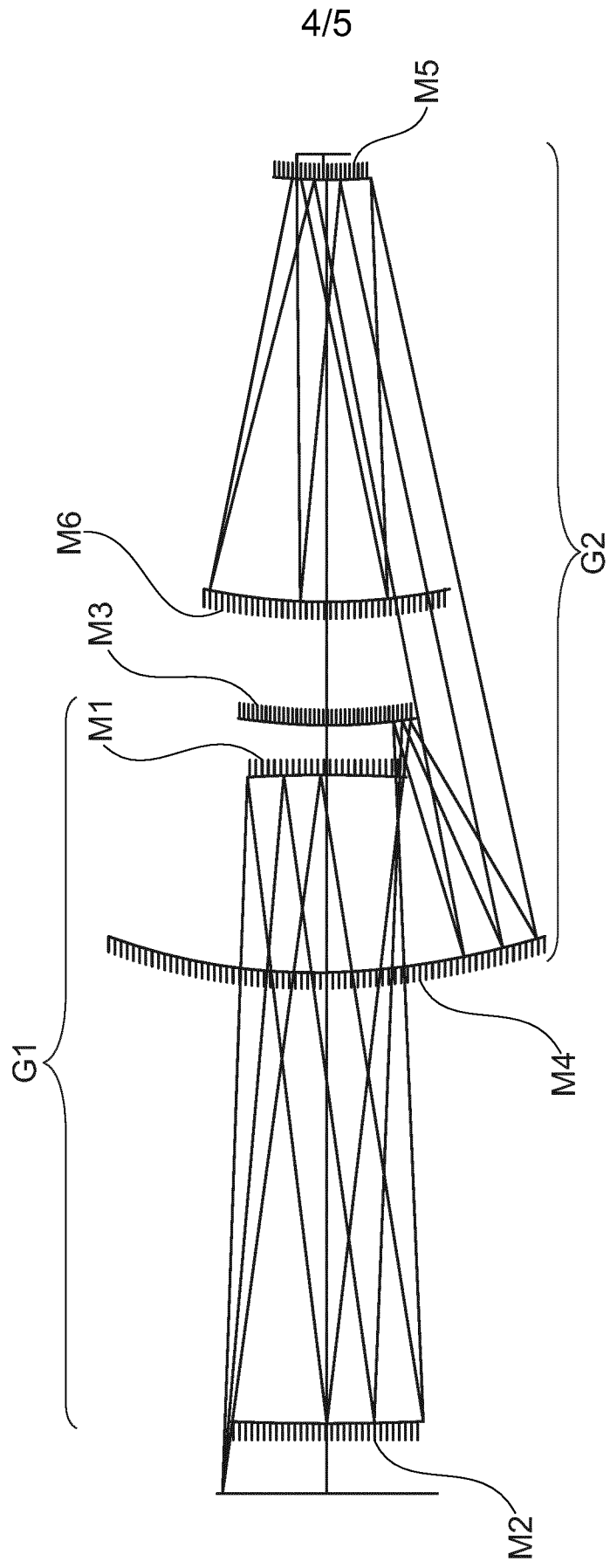


Fig. 7

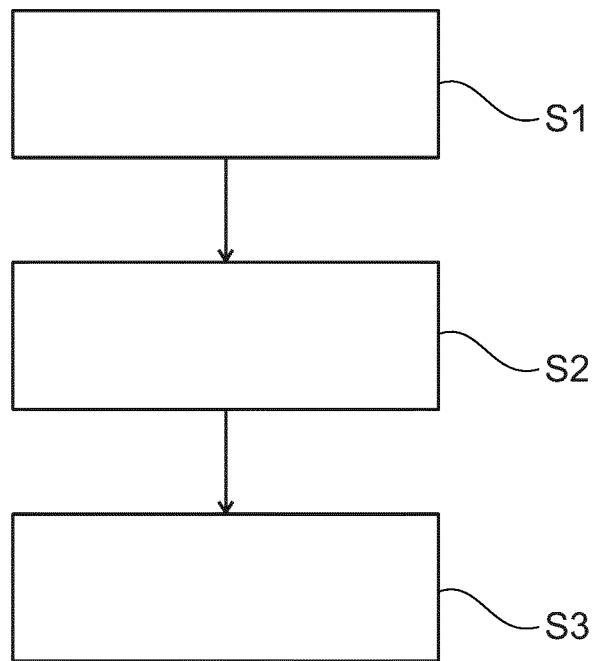


Fig. 8