



(10) **DE 10 2013 222 927 B4** 2016.02.04

(12)

## Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2013 222 927.5**

(22) Anmeldetag: **11.11.2013**

(43) Offenlegungstag: **13.05.2015**

(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **04.02.2016**

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

**G02B 3/04 (2006.01)**

**G01B 21/20 (2006.01)**

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

(73) Patentinhaber:

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

(72) Erfinder:

**Wiegmann, Axel, 38176 Wendeburg, DE; Schulz, Michael, 38550 Isenbüttel, DE; Blobel, Gernot, 38114 Braunschweig, DE**

(74) Vertreter:

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

(56) Ermittelter Stand der Technik:

**DE 10 2006 035 022 A1**

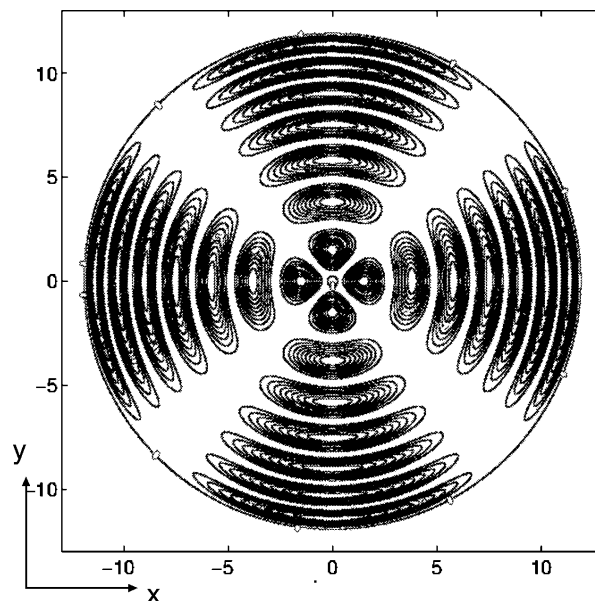
(54) Bezeichnung: **Asphärennormal und Verfahren zum Herstellen eines Asphärennormals**

(57) Hauptanspruch: Asphärennormal, das gebildet ist durch eine Kugel oder einen Teil einer Kugel, in dessen Oberfläche eine Struktur eingebracht ist,

– wobei die Abweichung der Oberfläche von einer idealen Kugeloberfläche durch eine stetig differenzierbare Funktion  $f$  beschreibbar ist,

– wobei die Struktur zumindest vier Referenzpunkte aufweist, in denen die Funktion  $f$  null ist und die erste Ableitung der Funktion null ist und

– wobei die Funktion zwischen den Referenzpunkten von null verschieden ist.



## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Normal. Bei der Fertigung von optischen Komponenten müssen häufig Asphären vermessen werden. Die Kalibrierung von Messgeräten, mittels denen die Maßhaltigkeit von Asphären gemessen wird, stellt bislang ein Problem dar. Der Grund hierfür ist, dass ein Normal, mit dem die Messvorrichtung kalibriert werden soll, mit einer hohen Genauigkeit relativ zum Messgerät ausgerichtet werden muss. Jeder Positionsfehler des Normals im zu kalibrierenden Messgerät führt zu einem überproportional großen Messfehler bei der Vermessung der Oberfläche. Asphärennormale, mittels denen die Maßhaltigkeit von Asphären rückführbar gemessen werden können, sind daher bislang nicht verfügbar.

**[0002]** Zur Vermessung von Asphären werden taktile Messverfahren, beispielsweise Koordinatenmessgeräte, aber auch optische Messverfahren eingesetzt. Optische Messverfahren und taktile Messverfahren reagieren jedoch grundverschieden auf Steigungen und Krümmungen der Asphären. Kleine Ortswellenlängen, das heißt systematische Oberflächenimperfectionen, die durch eine Sinusfunktion mit einer kleinen Wellenlänge besser beschrieben werden können als durch eine Sinusfunktion mit einer größeren Wellenlänge, sind durch taktile Messverfahren nur sehr schlecht nachzuweisen. Ein derartiges Normal ist daher nur schlecht mit einer Koordinatenmessmaschine rückführbar kalibrierbar.

**[0003]** Aus der DE 10 2006 035 022 A1 ist bekannt, Apparaturen zur Asphärenvermessung mit Kalibrierkörpern mit sphärischen oder rotationssymmetrisch asphärischen Oberflächen oder mit einer Freiformoberfläche zu kalibrieren. Nähere Angaben zur Art der Kalibrierkörper finden sich in der Druckschrift nicht.

**[0004]** Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, die Messgenauigkeit bei der Vermessung von Asphären zu verbessern.

**[0005]** Die Erfindung löst das Problem durch ein Asphärennormal mit den Merkmalen von Anspruch 1.

**[0006]** Vorteilhaft an diesem Asphärennormal ist, dass es überhaupt erst möglich ist, Asphären-Messgeräte rückführbar zu kalibrieren. Der Erfindung liegt die Erkenntnis zugrunde, dass Kugeln mit einer hohen Fertigungsgenauigkeit hergestellt werden können. In den Referenzpunkten ist die Oberfläche des Asphärennormals unverändert, so dass die Lage des Asphärennormals im Asphären-Messgerät anhand der Referenzpunkte mit hoher Genauigkeit bestimmt werden kann. Zwischen den Referenzpunkten ist die Funktion zudem von null verschieden und stetig differenzierbar, insbesondere im mathematischen Sinne glatt, so dass die Abweichung von der idealen Kugelgestalt mit interferometrischen Verfahren bestimmt

werden kann, ohne dass ein Phasensprung zu befürchten ist. Es wird daher ein Asphärennormal erhalten, das mit sehr hoher Genauigkeit rückführbar kalibrierbar ist.

**[0007]** Im Rahmen der vorliegenden Beschreibung wird unter einem Asphärennormal ein Normal verstanden, das zur Überwachung und Korrektur eines Messprozesses ausgebildet ist. Ein Normal umfasst stets einen zugehörigen Kalibrierschein, in dem die relevanten Größen, im vorliegenden Fall die Positionen und Abmaße der Referenzkörper angegeben sind.

**[0008]** Unter dem Merkmal, dass die Funktion  $f$  stetig differenzierbar ist, wird insbesondere verstanden, dass die Funktion auf zumindest 99% der Oberfläche des Asphärennormals unendlich oft stetig differenzierbar ist. Es ist möglich, dass die Funktion  $f$  nicht in allen Punkten stetig differenzierbar ist. Ist die Funktion  $f$  beispielsweise abschnittsweise definiert, ist es möglich, dass die Funktion  $f$  an den Intervallgrenzen lediglich stetig, nicht aber stetig differenzierbar ist. Vorzugsweise ist die Funktion zumindest außerhalb von Abschnittsgrenzen, wenn die Funktion abschnittsweise definiert ist, im mathematischen Sinne glatt.

**[0009]** Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform besitzt die Funktion  $f$  eine Ortswellenlänge, wobei sich die Ortswellenlänge in Abhängigkeit von einem Abstand von einem Nullpunkt stetig, insbesondere monoton, ändert. Unter dem Merkmal, dass sich die Ortswellenlänge monoton ändert, wird insbesondere verstanden, dass die Ortswellenlänge entweder monoton zunimmt oder monoton abnimmt. Unter einer monotonen Zunahme wird verstanden, dass bei zunehmendem Abstand die Ortswellenlänge nicht kleiner wird. Unter dem Merkmal, dass sich die Ortswellenlänge stetig ändert, wird eine stetige Änderung im mathematischen Sinne verstanden. Vorteilhaft hieran ist, dass das zu kalibrierende Asphären-Messgerät in seiner Messgenauigkeit beim Vorliegen von verschiedenen Ortswellenlängen untersucht werden kann. Die Messung der Formabweichung einer Asphäre ist ein nicht-linearer Messvorgang, so dass von der Messgenauigkeit bei einer ersten Ortswellenlänge nicht auf die Messgenauigkeit bei einer zweiten, von der ersten verschiedenen Ortswellenlänge geschlossen werden kann.

**[0010]** Vorzugsweise hat das Asphärennormal die Form einer Kugelkalotte, in die die Struktur eingebracht ist. Es lässt sich mit anderen Worten auch sagen, dass das Asphärennormal eine kugelförmige oder kugelkalottenförmige Grundgestalt hat.

**[0011]** Vorzugsweise ist die Funktion eine Kosinusfunktion, eine Sinusfunktion oder eine Summe aus Kosinus- und Sinusfunktion. Günstig ist, wenn die

Funktion  $f$  nicht von einer Radialkomponente abhängt, In anderen Worten ist die Funktion rotations-symmetrisch um eine Achse, die im Folgenden als z-Achse betrachtet wird. Der Abstand von dem Nullpunkt ist in diesem Fall der Abstand von der z-Achse. Vorteilhaft an der Rotations-symmetrie ist, dass die Orientierung des Asphärennormals relativ zum zu kalibrierenden Asphären-Messgerät in guter Näherung keine Rolle spielt, solange die Referenzpunkte korrekt ausgerichtet sind.

**[0012]** Gemäß einer alternativen Ausführungsform ist die Funktion  $f$  ein Produkt aus einer nur von dem Polarwinkel, nicht aber dem Azimutalwinkel abhängenden Funktion und einer nur von dem Azimutalwinkel, nicht aber dem Polarwinkel abhängenden Funktion. Auf diese Weise ergibt sich eine Funktion, die sowohl hinreichend symmetrisch ist als auch neben verschiedenen Ortswellenlängen unterschiedliche Amplituden für gleiche Ortswellenlängen aufweist.

**[0013]** Günstig ist es, wenn die für die Funktion  $f$

$$\Delta r = f(\vartheta, \varphi) = \text{chirp}(\vartheta)M(\varphi) \text{ mit } \text{chirp}(\vartheta) = k(-1 + \cos[\frac{2\pi}{\lambda(\vartheta)}\vartheta])$$

gilt. Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform gilt  $10 \text{ nm} < k < 10 \text{ }\mu\text{m}$ . Vorzugsweise ist  $\lambda(\vartheta)$  so gewählt ist, dass die Ortswellenlänge  $\lambda$  innerhalb eines Wellenzuges konstant ist. Alternativ kann  $\lambda$  proportional zu  $\vartheta$  sein.

**[0014]**  $M(\varphi)$  ist vorzugsweise als Kosinusfunktion beschreibbar ist. Es sei darauf hingewiesen, dass die tatsächliche Formulierung der Funktionen  $M(\varphi)$  oder  $\text{chirp}(\vartheta)$  von der Angegebenen abweichen kann, beispielsweise kann die gleiche Funktion auch durch eine Sinusfunktion beschrieben werden oder als Produkt als Sinus- und Kosinusfunktion.

**[0015]** Günstig ist es, wenn ein Quotient aus einer größten Ortswellenlänge und einer kleinsten Ortswellenlänge zumindest 5, insbesondere zumindest 7 beträgt. Das führt dazu, dass das Asphären-Messgerät an einer Vielzahl an unterschiedlichen Ortswellenlängen kalibriert werden kann. Vorzugsweise ist die Funktion  $f$  ein Zernike-Polynom oder eine Summe von Zernike-Polynomen, die entweder nur Astigmatismus-Terme oder nur Koma-Terme enthält. Die Zernike-Polynome sind besonders gut geeignet, um reine Abbildungsfehler zu beschreiben. Vorzugsweise beträgt die maximale Abweichung der Oberfläche von einer idealen Kugeloberfläche maximal  $10 \text{ }\mu\text{m}$  und mindestens  $10 \text{ nm}$ .

**[0016]** Alternativ ist das Asphärennormal gebildet durch eine Kugel oder einen Teil einer Kugel mit einem Kugelradius, in dessen Oberfläche eine Struktur eingebracht ist, wobei die Oberfläche einen ersten Abschnitt und zumindest einen zweiten Abschnitt

hat, dass die Oberfläche im ersten Abschnitt eine relative Abweichung höchstens  $10^{-5}$  vom Kugelradius hat und dass die Oberfläche im zweiten Abschnitt einen Krümmungsradius hat, der zumindest um  $10 \text{ }\mu\text{m}$  vom Kugelradius abweicht. Vorteilhaft hieran ist, dass ein solches Normal mit einem Standard-Radius-Messverfahren messbar ist.

**[0017]** Besonders günstig ist es, wenn das Asphärennormal zumindest vier Abschnitte aufweist, die längenkreisartig nebeneinander angeordnet ist und in Azimutalrichtung glatt ineinander übergehen. Beispielsweise können die Übergänge durch eine Kosinusfunktion beschreibbar sein.

**[0018]** Günstig ist es, wenn die Oberfläche eine gerade Anzahl an Abschnitten hat, wobei jeweils einander gegenüberliegende Abschnitte den gleichen Krümmungsradius haben und wobei sich die Krümmungsradien paarweise um zumindest  $10 \text{ }\mu\text{m}$  unterscheiden. Das führt dazu, dass die gegenüberliegenden Abschnitte durch Ausgleichskreise beschrieben werden können. Das ermöglicht die Kalibrierung eines Asphären-Messgeräts auf seine Messgenauigkeit bei der Erfassung von unterschiedlichen Krümmungsradien.

**[0019]** Erfindungsgemäß ist zudem ein Verfahren zum Herstellen eines Asphärennormals, mit den Schritten (i) Herstellen einer Kugel oder eines Teils einer Kugel, insbesondere einer Kugelkalotte, mit einer Formabweichung von weniger als  $100 \text{ nm}$  von einer idealen Kugelform und (ii) Einbringen einer Struktur in einer Oberfläche der Kugel oder des Teils der Kugel, wobei eine Abweichung der Oberfläche von einer idealen Kugeloberfläche durch eine zweimal stetig differenzierbare Funktion beschreibbar ist und wobei die Struktur zumindest vier, insbesondere sechs Referenzpunkte aufweist, in denen die erste Ableitung der Funktion null ist. Vorzugsweise ist in den Referenzpunkten zudem die die Funktion null und die zweite Ableitung null.

**[0020]** Im Folgenden wird die Erfindung anhand der beigefügten Zeichnungen näher erläutert. Dabei zeigt:

**[0021]** Fig. 1a schematisch ein Asphärennormal zur Darstellung des relevanten Koordinatensystems,

**[0022]** Fig. 1b das Asphärennormal mit Benennung der Koordinaten,

**[0023]** Fig. 2 eine Höhenlinie-Darstellung der Funktion  $f$  gemäß einer bevorzugten Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Asphärennormals,

**[0024]** Fig. 3 den Radialanteil der Funktion  $f$  in Abhängigkeit vom Polarwinkel  $\vartheta$

**[0025]** Fig. 4a einen beispielhaften Verlauf der Ortswellenlänge in Abhängigkeit von dem Polarwinkel  $\vartheta$

**[0026]** Fig. 4b einen zweiten beispielhaften Verlauf der Ortswellenlänge in Abhängigkeit von dem Polarwinkel  $\vartheta$

**[0027]** Fig. 5 eine Darstellung einer Modulationsfunktion in Abhängigkeit von dem Azimutalwinkel  $\varphi$ ,

**[0028]** Fig. 6a eine Höhenlinien-Darstellung der Funktion  $f$  für ein Asphärennormal gemäß einer zweiten Ausführungsform der Erfindung,

**[0029]** Fig. 6b eine dreidimensionale Darstellung der Funktion  $f$  gemäß Fig. 6a,

**[0030]** Fig. 7 eine Höhenlinien-Darstellung einer Funktion  $f$  für eine weitere Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Asphärennormals und

**[0031]** Fig. 8 eine weitere Höhenlinien-Darstellung für eine Funktion  $f$  für eine weitere Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Asphärennormals.

**[0032]** Fig. 1a zeigt schematisch ein Asphärennormal **10**, das eine kugelkalottenförmige Grundgestalt hat. Es ist eine Polarregion **12** dargestellt, von der aus gedachte Längengrade **14.1**, **14.2** ausgehen. Fig. 1b zeigt die Nomenklatur für einen Polarwinkel, einen Azimutalwinkel  $\phi$ , die Radialkomponente  $r$  sowie die drei kartesischen Achsen. Im Fall einer Kugelkalotte liegt der Polarwinkel in einem Intervall  $\vartheta \in [-\vartheta_{\max}, \vartheta_{\max}]$ . Dabei gilt vorzugsweise  $\vartheta_{\max} \in [-50^\circ, 50^\circ]$ . In allen Ausführungsformen beträgt der Kugelradius  $R_1$  zwischen 1 und 10 Millimeter. Die Oberflächenkontur des Asphärennormals kann also beschrieben werden durch eine Abweichung  $\Delta r$  von einer Kugel mit dem Kugelradius  $R_1$ .

**[0033]** Fig. 2 zeigt die Abweichung  $\Delta r$ , für die gilt:

$$\Delta r = f(\vartheta, \varphi) = \text{chirp}(\vartheta)M(\varphi) \text{ mit}$$

$$\Delta r = f(\vartheta, \varphi) = \text{chirp}(\vartheta)M(\varphi) \text{ mit } \text{chirp}(\vartheta) = k(-1 + \cos[\frac{2\pi}{\lambda(\vartheta)}\vartheta]),$$

$$k = 100 \text{ nm},$$

$$M(\varphi) = \frac{1}{2}(\cos(N\varphi) + 1) \text{ mit } N = 4$$

**[0034]** Für  $N$  kann jede ganze Zahl gewählt werden, besonders günstig ist  $N = 1, \dots, 10$ . In anderen Worten ist die Abweichung der Oberfläche von der idealen Kugeloberfläche, die durch  $\Delta r$  beschrieben wird, als Produkt zweier Funktionen geschrieben werden kann, wobei die erste Funktion  $\text{chirp}(\vartheta)$  lediglich vom Polarwinkel  $\vartheta$  abhängt, die zweite nur vom Azimutalwinkel  $\varphi$ . Auf diese Weise ergibt sich eine Struktur mit einem weiten Spektrum an Ortswellenlängen und zudem unterschiedlichen Amplituden zu jeder Ortswel-

lenlänge. Mit einem derartigen Asphärennormal können typische Messfehler von Asphären-Messgeräten besonders gut erfasst werden.

**[0035]** Fig. 3 zeigt die Funktion  $\text{chirp}(\vartheta)$ . Es ist zu erkennen, dass die Ortsfrequenz mit zunehmendem Polarwinkel  $\vartheta$  größer wird. Die Ortswellenlänge nimmt dadurch ab.

**[0036]** Fig. 4 zeigt die Abhängigkeit der Ortswellenlänge vom Polarwinkel  $\vartheta$ . Es ist zu erkennen, dass die Ortswellenlänge linear mit dem Polarwinkel  $\vartheta$  zusammenhängt. Fig. 4b zeigt die Abhängigkeit der Ortswellenlänge vom Polarwinkel  $\vartheta$  für eine alternative Funktion  $f$ . Mit zunehmendem Polarwinkel  $\vartheta$  fällt die Ortswellenlänge monoton, nicht aber streng monoton.

**[0037]** Es ist zu erkennen, dass ein Quotient aus der größten Ortswellenlänge und der kleinsten Ortswellenlänge sich ungefähr zu  $q = \frac{1000}{80} = 12,5$  errechnet.

**[0038]** Fig. 5 zeigt die grafische Darstellung der Funktion  $M(\varphi)$ .

**[0039]** Fig. 6 zeigt die Höhenlinien einer grafischen Darstellung der Funktion  $f$  für ein Asphärennormal gemäß einer weiteren Ausführungsform. Es ist zu erkennen, dass die Oberfläche der Kugel einen ersten Abschnitt **16.1**, einen zweiten Abschnitt **16.2**, einen dritten Abschnitt **16.3**, einen vierten Abschnitt **16.4** sowie weitere Abschnitte **16.5**, **16.6**, **16.7** und **16.8** aufweist. Jeweils gegenüberliegende Abschnitte besitzen gleiche Krümmungsradien. So besitzen die Abschnitte **16.1** und **16.5** einen Radius  $R_1$ , der gleich dem Kugelradius ist. In anderen Worten ist die Funktion  $f$  konstant 0. Im zweiten Abschnitt **16.2** und dem gegenüberliegenden Abschnitt **16.6** hat die Oberfläche einen Krümmungsradius  $R_2$ , der im vorliegenden Fall das 0,6-fache des ersten Radius  $R_1$  beträgt. Die einzelnen Abschnitte sind, wie in Fig. 6 gezeigt, längengkreisartig nebeneinander angeordnet und gehen in Azimutalrichtung differenzierbar ineinander über.

**[0040]** Fig. 7 zeigt eine Höhenliniendarstellung der Funktion  $f$  für ein Asphärennormal gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung. Die Funktion  $f$  ist ein Zernike-Polynom:

$$\Delta r = \sqrt{6} k_1 \left( \frac{\vartheta}{\vartheta_{\max}} \right)^2 \cos 2\varphi$$

$$\text{mit } k_1 = 1 \text{ } \mu\text{m}.$$

**[0041]** Fig. 8 zeigt eine Höhenliniendarstellung einer weiteren Funktion  $f$ , die ein Zernike-Polynom ist:

$$\Delta r = \sqrt{8} k_2 \left[ 3 \left( \frac{g}{g_{\max}} \right)^3 - 2 \frac{g}{g_{\max}} \cos \varphi \right]$$

mit  $k_2 = 1 \mu\text{m}$ .

**[0042]** Ein Asphärennormal **10** wird hergestellt, indem zunächst eine Kugel oder einen Teils einer Kugel hergestellt wird. Die Formabweichung beträgt dabei weniger als 100 Nanometer von einer idealen Kugelform. Danach wird mit einem Diamantwerkzeug die oben beschriebene Struktur in die Oberfläche der Kugel oder des Teils der Kugel eingebracht. Nachfolgend wird das Asphärennormal **10** eingemessen.

#### Bezugszeichenliste

<b>10</b>	Asphärennormal
<b>12</b>	Polarregion
<b>14</b>	Längenkreis
<b>16</b>	Abschnitt
$\vartheta$	Polarwinkel
$\phi$	Azimutalwinkel
<b>r</b>	Radialkomponente
<b>R1</b>	Kugelradius
<b><math>\Delta r</math></b>	Abweichung von der Kugelgestalt

#### Patentansprüche

1. Asphärennormal, das gebildet ist durch eine Kugel oder einen Teil einer Kugel, in dessen Oberfläche eine Struktur eingebracht ist,

- wobei die Abweichung der Oberfläche von einer idealen Kugeloberfläche durch eine stetig differenzierbare Funktion  $f$  beschreibbar ist,
- wobei die Struktur zumindest vier Referenzpunkte aufweist, in denen die Funktion  $f$  null ist und die erste Ableitung der Funktion null ist und
- wobei die Funktion zwischen den Referenzpunkten von null verschieden ist.

2. Asphärennormal nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Funktion  $f$  eine Ortswellenlänge besitzt, wobei sich die Ortswellenlänge in Abhängigkeit von einem Polarwinkel oder einem Abstand von einem Nullpunkt stetig ändert.

3. Asphärennormal nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Funktion  $f$  ein Produkt ist aus

- einer nur von dem Polarwinkel, nicht aber dem Azimutalwinkel abhängenden Funktion und
- einer nur von dem Azimutalwinkel, nicht aber dem Polarwinkel abhängenden Funktion.

4. Asphärennormal nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass für die Funktion  $f$  gilt:

$$\Delta r = f(\vartheta, \varphi) = \text{chirp}(\vartheta)M(\varphi) \text{ mit } \text{chirp}(\vartheta) = k(-1 + \cos[\frac{2\pi}{\lambda(\vartheta)}\vartheta])$$

mit  $10 \text{ nm} < k < 10 \mu\text{m}$ , wobei  $\lambda(\vartheta)$  so gewählt ist, dass die Ortswellenlänge  $\lambda$  innerhalb eines Wellenzuges konstant ist.

5. Asphärennormal nach einem der vorstehenden Ansprüche 2 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Quotient aus einer größten Ortswellenlänge und einer kleinsten Ortswellenlänge zumindest 5 beträgt.

6. Asphärennormal nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Funktion  $f$  ein Zernike-Polynom oder eine Summe von Zernike-Polynomen ist oder nur Astigmatismus-Terme oder nur Koma-Terme enthält.

7. Asphärennormal nach Anspruch 1, das gebildet ist durch eine Kugel oder einen Teil einer Kugel, mit einem Kugelradius ( $R1$ ), in dessen Oberfläche eine Struktur eingebracht ist, **dadurch gekennzeichnet**, dass

- die Oberfläche einen ersten Abschnitt und zumindest einen zweiten Abschnitt hat, dass
- die Oberfläche im ersten Abschnitt eine relative Abweichung um höchstens  $10^{-5}$  vom Kugelradius ( $R1$ ) hat und dass
- die Oberfläche im zweiten Abschnitt einen Krümmungsradius ( $R2$ ) hat, der betragsmäßig um zumindest  $10 \mu\text{m}$  vom Kugelradius ( $R1$ ) abweicht.

8. Asphärennormal nach Anspruch 7, gekennzeichnet durch zumindest vier Abschnitte, die längenkreisartig nebeneinander angeordnet sind und in Azimutalrichtung glatt ineinander übergehen.

9. Asphärennormal nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Oberfläche eine gerade Anzahl an Abschnitten hat, wobei jeweils einander gegenüberliegende Abschnitte den gleichen Krümmungsradius haben und wobei sich die Krümmungsradien paarweise um zumindest  $10 \mu\text{m}$  unterscheiden.

10. Verfahren zum Herstellen eines Asphärennormals, mit den Schritten:

- (i) Herstellen einer Kugel oder eines Teils einer Kugel mit einer Formabweichung von weniger als 100 Nanometern von einer idealen Kugelform,
- (ii) Einbringen einer Struktur in eine Oberfläche der Kugel oder des Teils der Kugel, wobei eine Abweichung der Oberfläche von einer idealen Kugeloberfläche durch eine zweimal stetig differenzierbare Funktion  $f$  beschreibbar ist,
- (iii) wobei die Struktur zumindest vier Referenzpunkte aufweist, in denen die Funktion null ist, die erste

Ableitung der Funktion null ist und vorzugsweise zudem die zweite Ableitung null ist.

Es folgen 5 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

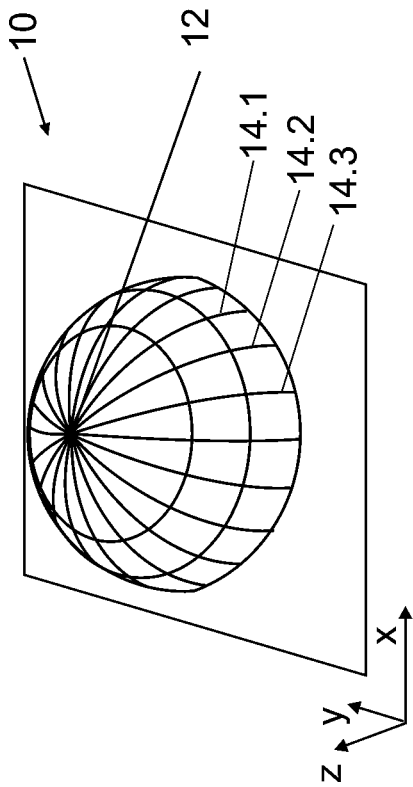


Fig. 1a

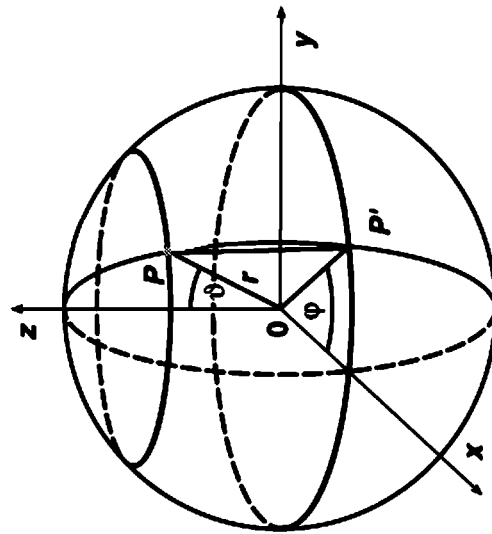


Fig. 1b

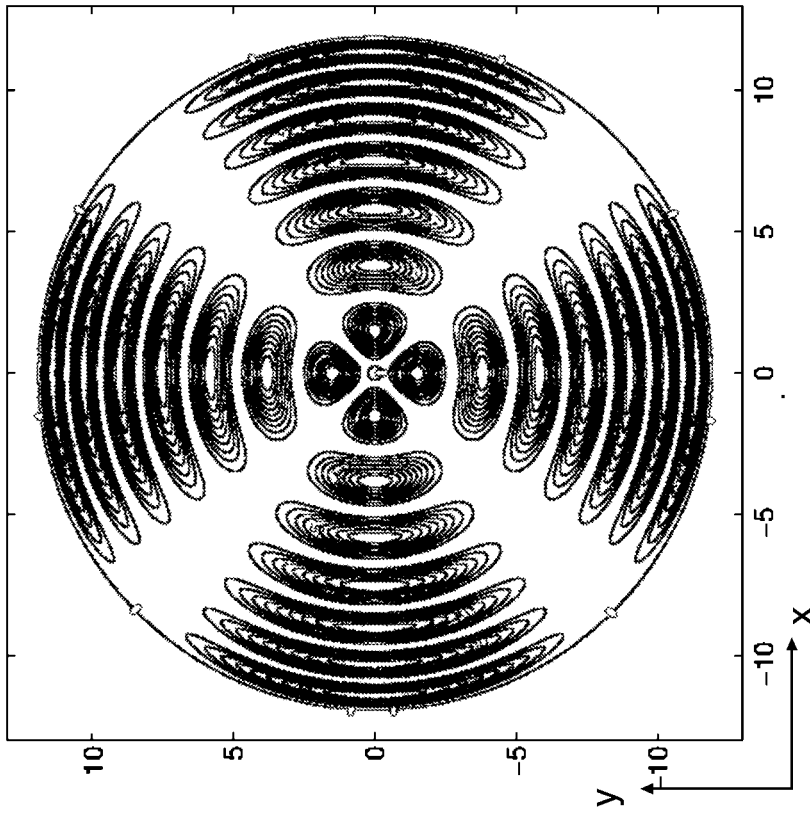


Fig. 2

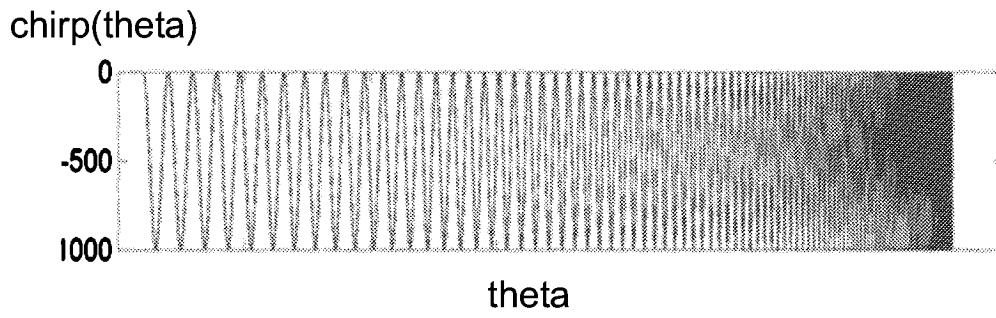


Fig. 3

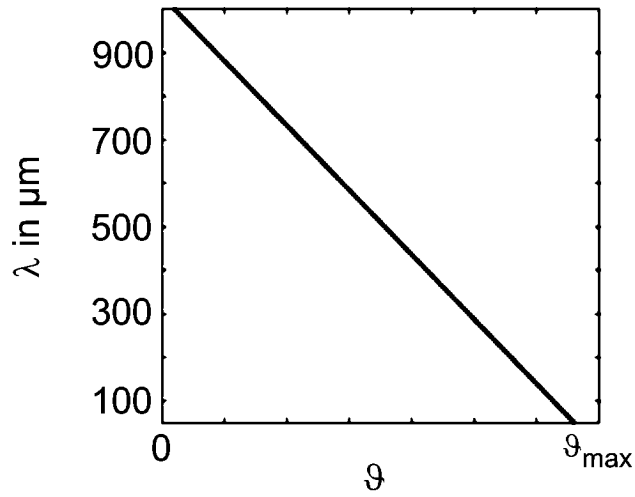


Fig. 4a

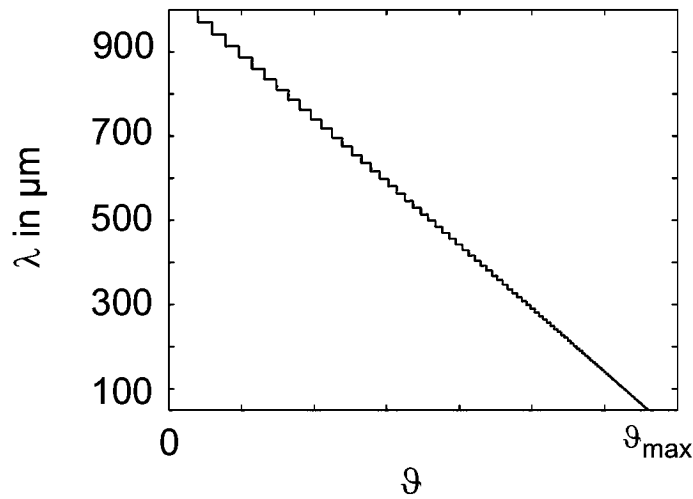


Fig. 4b



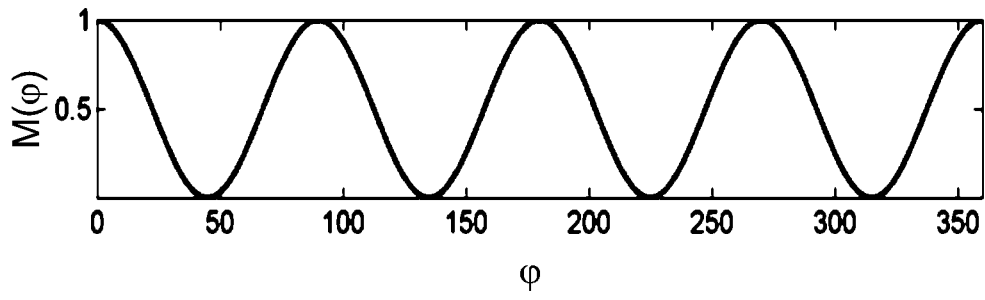


Fig. 5

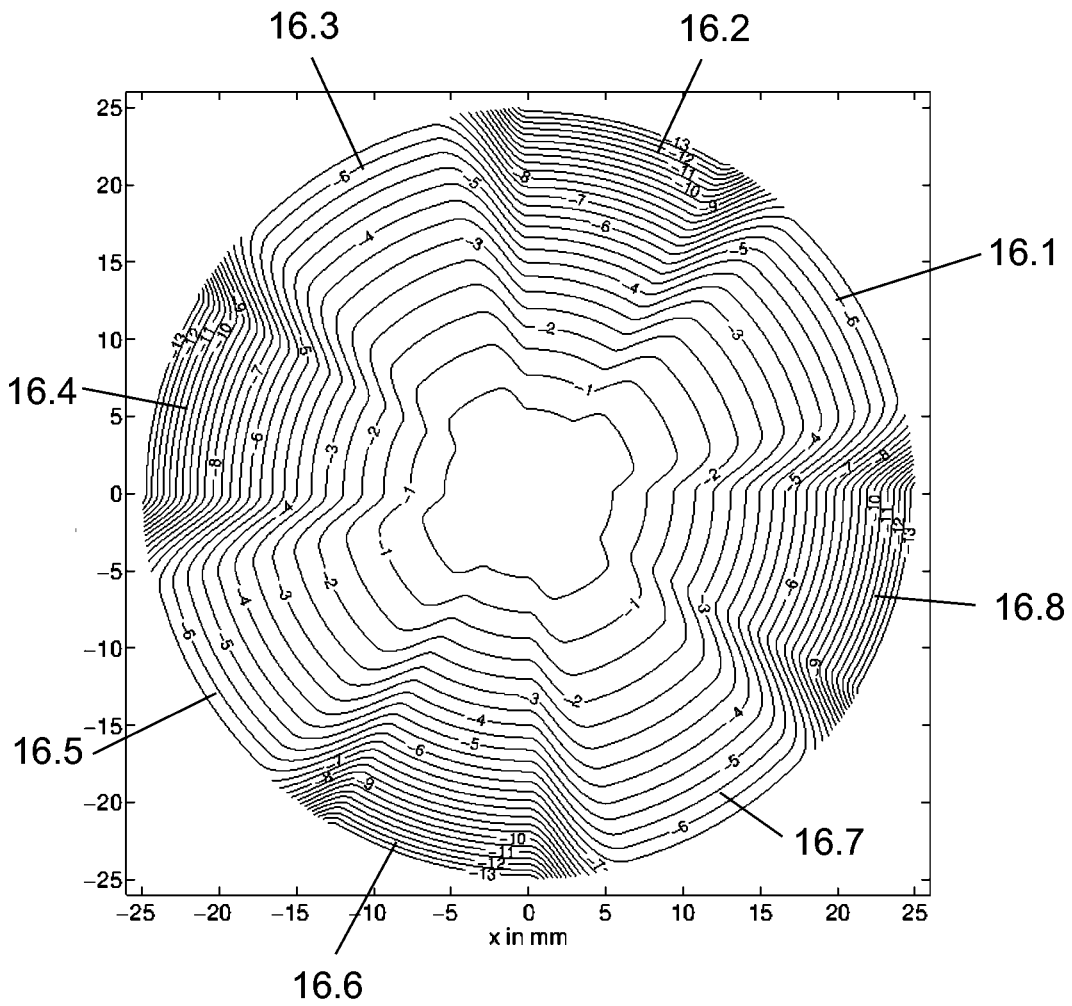


Fig. 6a

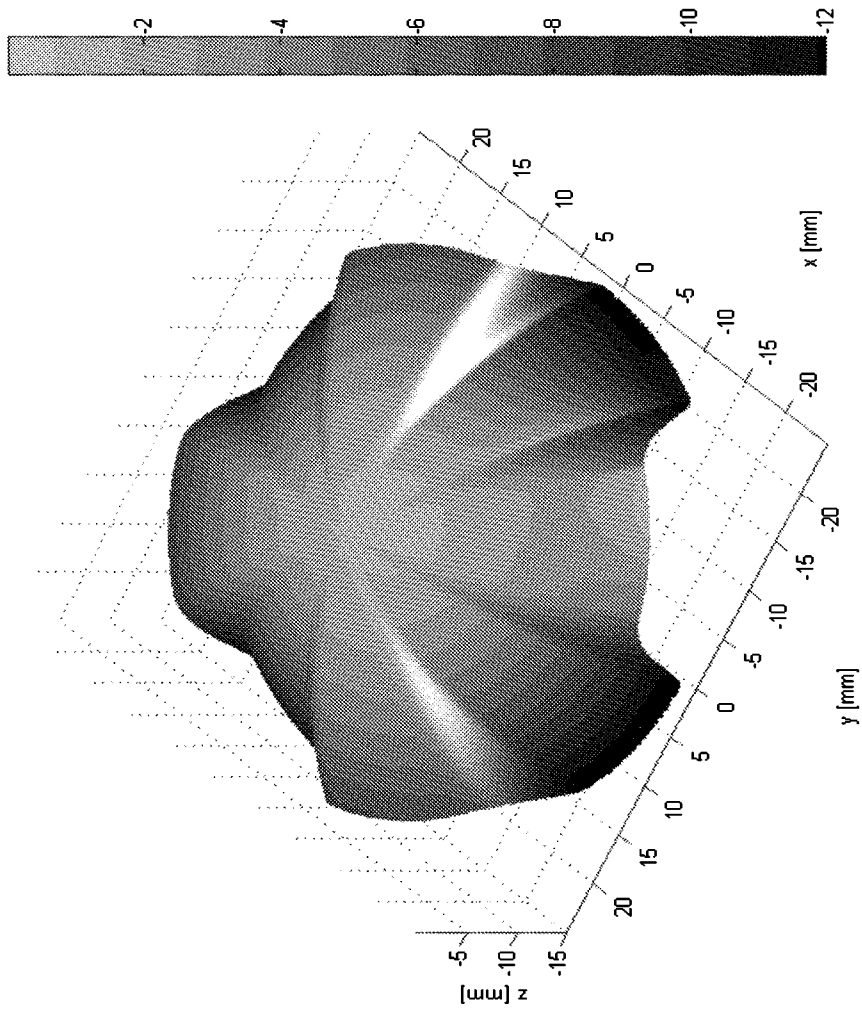


Fig. 6b

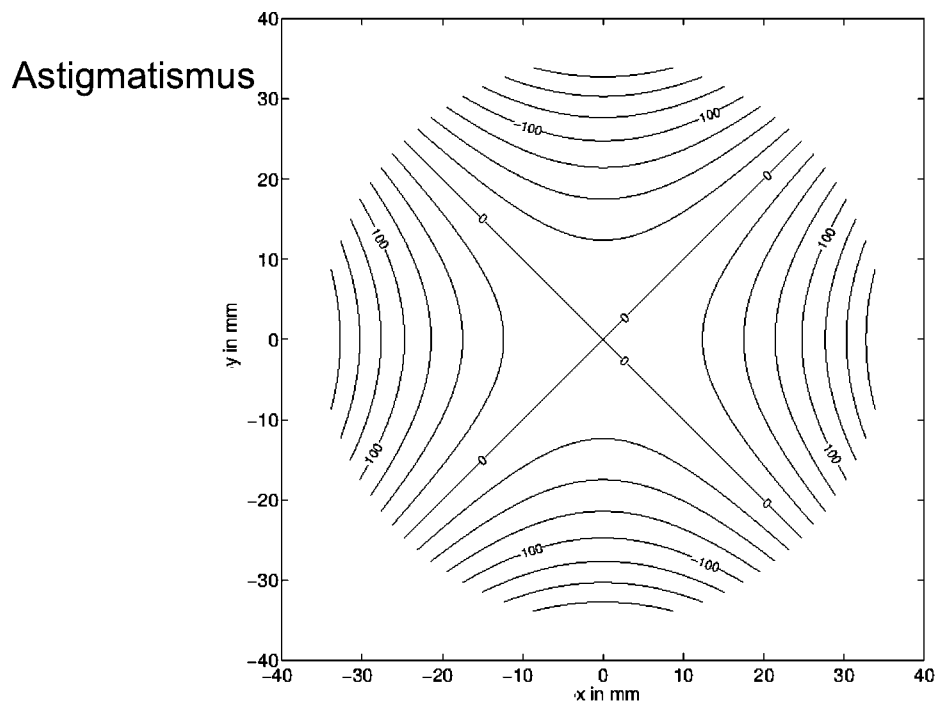


Fig. 7

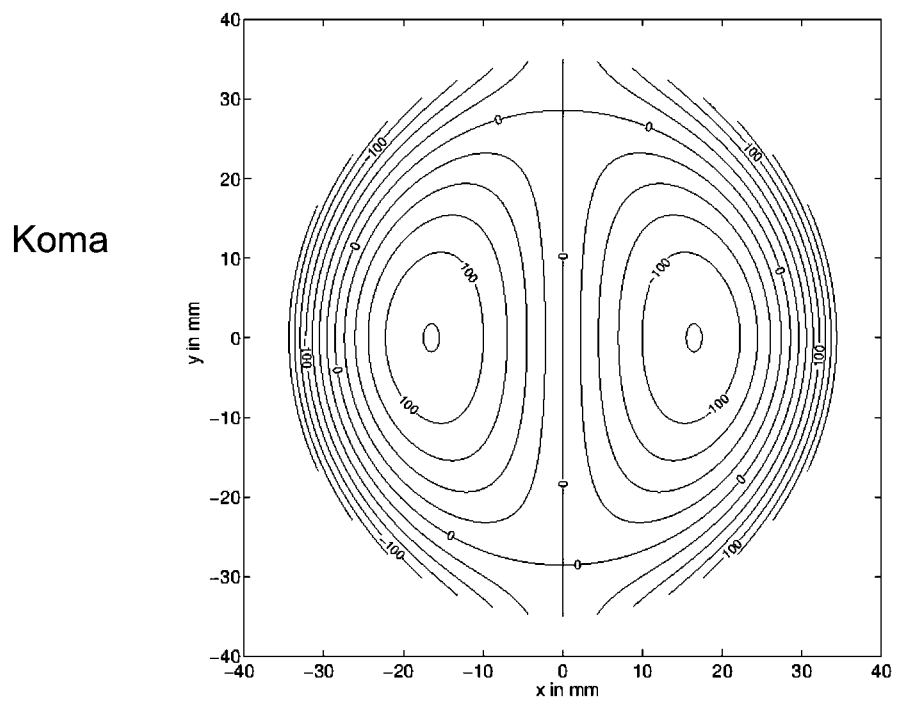


Fig. 8