

(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

22. November 2012 (22.11.2012)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer

WO 2012/156081 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

G02B 27/00 (2006.01) A61F 2/16 (2006.01)
G02C 7/06 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2012/002098

(22) Internationales Anmeldedatum:
16. Mai 2012 (16.05.2012)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2011 101 899.2 18. Mai 2011 (18.05.2011) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme
von US): CARL ZEISS AG [DE/DE]; Carl-Zeiss-Strasse
22, 73447 Oberkochen (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): DOBSCHAL, Hans-
Jürgen [DE/DE]; Am Kötschauer Weg 26 a, 99510
Kleinromstedt (DE).

(74) Anwalt: LANGHEINRICH, Peter; Carl Zeiss AG -
Patentabteilung, c/o Carl Zeiss AG, Carl-Zeiss-Strasse 22,
73447 Oberkochen (DE).

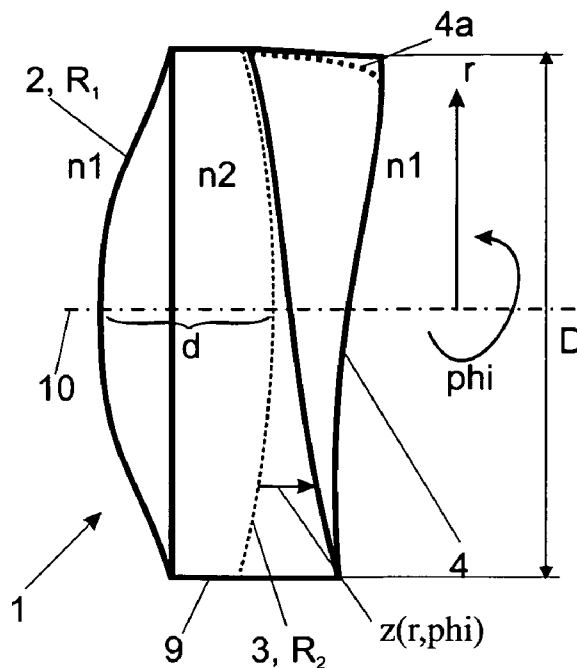
(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,
AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY,
BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM,
DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG,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

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: LENS WITH AN EXTENDED FOCAL RANGE

(54) Bezeichnung : LINSE MIT EINEM ERWEITERTEN FOKUSBEREICH



Figur 2

(57) Abstract: The invention relates to a lens that has an extended focal range, said lens consisting of a solid material. The optical surfaces of the lens are transparent, and the lens has a refractive index distribution. According to the invention, the refractive index distribution F_G of the lens (1) with respect to a plane that is perpendicular to the optical axis (10) changes between a refractive index base value F_L that is not equal to zero and a maximum value F_{Smax} as a function of the radial height r and the azimuth angle ϕ of the aperture. Thus, the refractive index distribution results from $F(r, \phi) = F_L + F(r, \phi)$, with the spiral-shaped refractive index portion $F(r, \phi) = F(r) * w(\phi)$, wherein $F_{Smax}(r)$ is nonlinearly dependent on the radius and $w(\phi)$ is a factor for the refractive index portion with a spiral curve.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Linse, welche einen erweiterten Fokusbereich aufweist, wobei die Linse aus einem festen Material besteht, die optischen Flächen der Linse transparent sind und die Linse eine Brechkraftverteilung aufweist. Erfindungsgemäß ändert sich die Brechkraftverteilung

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



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, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

Erklärungen gemäß Regel 4.17:

— Erfindererklärung (Regel 4.17 Ziffer iv)

F_G der Linse (1) bezogen auf eine zur optischen Achse (10) senkrecht stehende Ebene als Funktion der radialen Höhe r und des Azimutwinkel ϕ der Apertur zwischen einem Grundwert der Brechkraft F_L ungleich Null und einem Maximalwert F_{Smax} . Somit ergibt sich die Brechkraftverteilung zu $F_G(r, \phi) = F_L + F_S(r, \phi)$, mit dem spiralförmigen Brechkraftanteil $F_S(r, \phi) = F_{Smax}(r) \cdot w(\phi)$, wobei $F_{Smax}(r)$ nichtlinear radienabhängig ist und $w(\phi)$ ein Faktor für den Brechkraftanteil mit einem spiralförmigen Verlauf ist.

Linse mit einem erweiterten Fokusbereich

Die Erfindung betrifft eine Linse, welche einen erweiterten Fokusbereich aufweist, wobei die Linse aus einem festen Material besteht, die optischen
5 Flächen der Linse transparent sind und die Linse eine Brechkraftverteilung aufweist. Weiterhin betrifft die Erfindung ein Verfahren zur Herstellung der Linse sowie ein Verfahren zur Beeinflussung der Abbildung eines Bildes auf die Retina und ein Objektiv mit einem erweiterten Fokusbereich.

- 10 Multifokale Linsen sollen gleichzeitig mehrere Forderungen erfüllen. Zunächst soll eine hinreichend gute Kontrastübertragungsfunktion in zwei oder mehr Fokusebenen gewährleistet werden. Weiterhin soll die Kontrastübertragungsfunktion unabhängig von der Größe der Pupille sein. Und schließlich soll die Linse leicht herstellbar sein, sie soll keine Absätze sowie
15 Kanten und daher möglichst glatte Kurven aufweisen.

Derartige Linsen werden insbesondere bei der Korrektur von Sehfehlern mittels Brillengläsern oder als Intraokularlinsen (IOL-Linsen) verwendet.

- Im Gegensatz zu den schon seit vielen Jahren eingeführten monofokalen IOL-
20 Linsen sind multifokale Linsen bisher nur für den bifokalen Fall umgesetzt, da es erhebliche Probleme bereitet, die oben genannten Forderungen gleichzeitig zu erfüllen. Eine Variante basiert hierbei auf einem speziellen rotationssymmetrischen Ringsystem, wobei durch eine geschickte Abstimmung von Ringradien, Ringbreiten und Ringtiefen eine ausreichend gute Abbildung für
25 zwei diskrete objektseitige Brennebenen erfolgt, beispielsweise bei 0 dpt und ca. 3 dpt Korrekturstärke.

- Eine derartige bifokale Linse wird in der Patentschrift US 5982543 A beschrieben und verwendet ein rotationssymmetrisches Fresnel-ähnliches
30 Ringsystem.

In US 6120148A wird ein rotationssymmetrisches diffraktives Ringsystem beschrieben. Die bifokale Linse aus US 6536899 B verwendet ebenfalls ein Ringsystem, wobei jeder Ring aus zwei Subringen besteht, die jeweils die zwei gewünschten Brennweiten realisieren.

5

In etwas modifizierter Form sind hieraus auch Lösungen abgeleitet, bei denen eine einzige Linse einen erweiterten, kontinuierlichen Fokusbereich abdeckt. Derartige Linsen sind auch unter dem Begriff „Extended Depth of Focus-Linse“ oder auch „EDoF-Linse“ bekannt. In US 2006176572 A wird ein

10 rotationssymmetrisches System aus Ringen verwendet, wobei die Einzelbrennweiten der Ringe innerhalb des gewünschten kontinuierlichen Brennweitenbereiches liegen. Der „Extended Depth of Focus“-Effekt entsteht durch die Vermischung der verschiedenen Brennweiten.

15 Das System gemäß WO 100 835 46A besteht aus Sektoren („Tortenstücken“) mit azimuthal ansteigender Brechkraft. Die Brechkraftverteilung weist hierbei diskrete Sprünge zwischen den Sektoren auf.

In US20100002310 A1 ist ein optisches Abbildungssystem für eine Kamera
20 beschrieben, welches einen erweiterten Schärfentiefenbereich aufweist. Die erweiterte Schärfentiefe wird durch eine Kombination mehrerer Linsen mit asphärischen Oberflächen erreicht.

Die Aufgabe der Erfindung besteht darin, eine neue Linse mit einem erweiterten
25 Fokusbereich zu schaffen. Die neue Linse soll einzeln, insbesondere als Intraokularlinse oder in Verbindung mit anderen optischen Komponenten optische Systeme liefern, welche bei einer hinreichend guten Abbildungsqualität einen großen Schärfentiefenbereich liefern und kostengünstig herstellbar sind.

30 Die Aufgabe der Erfindung wird erfindungsgemäß für die neue Linse mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst. Die Aufgabe der Erfindung wird erfindungsgemäß für die neue Linse mit den Merkmalen des Anspruchs 2

gelöst. Die Aufgabe der Erfindung wird erfindungsgemäß bei dem Verfahren zur Herstellung der Linse mit den Merkmalen des Anspruchs 11 gelöst.

Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind Gegenstand der Unteransprüche. Die Aufgabe der Erfindung wird erfindungsgemäß bei dem Verfahren zur Beeinflussung der Abbildung eines Bildes auf die Retina mit den Merkmalen des Anspruchs 15 gelöst. Die Aufgabe der Erfindung wird erfindungsgemäß bei einem Objektiv mit einem erweiterten Fokusbereich mit den Merkmalen des Anspruchs 16 gelöst.

- 10 Die Erfindung betrifft eine Linse mit einem erweiterten Fokusbereich, wobei die Linse aus einem festen, transparenten Material besteht sowie zwei gefertigte optische Flächen hat. Die Linse hat eine Brechkraftverteilung F_G , die sich bezogen auf eine zur optischen Achse senkrecht stehende Ebene als Funktion der radialen Höhe r und des Azimutwinkels ϕ der Apertur zwischen einem Grundwert der Brechkraft F_L ungleich Null und einem Maximalwert $F_{S_{\max}}$ ändert.
- 15 Somit ergibt sich die Brechkraftverteilung zu $F_G(r, \phi) = F_L + F_S(r, \phi)$, wobei $F_S(r, \phi) = F_{S_{\max}}(r) * w(\phi)$ ein spiralförmiger Brechkraftanteil ist. In der Formel $F_S(r, \phi) = F_{S_{\max}}(r) * w(\phi)$ ist $F_{S_{\max}}(r)$ nichtlinear radienabhängig und $w(\phi)$ ist ein Faktor für den Brechkraftanteil mit dem spiralförmigen Verlauf, welcher allgemein mit der Formel

$$w(\phi) = \sum_{i=1}^M I_i \exp\left[-a_i (\phi - w_i)^2\right]$$

beschrieben ist, wobei w_i die Peaklagen der Winkelverteilungsfunktion; I_i Intensitätswerte der Einzelpeaks; $a_i > 0$

Dämpfungskoeffizienten für die jeweiligen Peaklagen sowie i ein Zählwert und $M \geq i$ ein Endwert sind.

25

Die Erfindung betrifft weiterhin eine Linse mit einem erweiterten Fokusbereich, wobei die Linse aus einem festen, transparenten Material besteht sowie zwei gefertigte optische Flächen hat. Die Linse hat eine Brechkraftverteilung F_G , die sich bezogen auf eine zur optischen Achse senkrecht stehende Ebene als Funktion der radialen Höhe r und des Azimutwinkels ϕ der Apertur zwischen

30

einem Grundwert der Brechkraft F_L ungleich Null und einem Maximalwert $F_{S\max}$ ändert. Somit ergibt sich die Brechkraftverteilung zu

$F_G(r, \phi) = F_L + F_S(r, \phi)$, wobei $F_S(r, \phi) = F_{S\max}(r) * w(\phi)$ ein spiralförmiger Brechkraftanteil ist.

- 5 In der Formel $F_S(r, \phi) = F_{S\max}(r) * w(\phi)$ ist $F_{S\max}(r)$ nichtlinear radienabhängig, und $w(\phi)$ ist ein Faktor für den Brechkraftanteil mit dem spiralförmigen Verlauf, der mit der Formel $w(\phi) = \frac{\phi}{2\pi}$ als linearer Verlauf beschrieben ist.

- 10 Die Linse zeichnet sich dadurch aus, dass die maximale Brechkraft $F_{S\max}(r)$ nichtlinear radienabhängig ist und mit den Polynomformeln

$$F_{S\max}(r) = \sum_{j=2}^N c_j * r^j \text{ oder } F_{S\max}(r) = \sum_{j=1}^N c_j * r^{2*j}$$

mit den Polynomkoeffizienten c_j für eine refraktive Brechkraft und

$$F_{S\max}(r) = \sum_{j=2}^N k_j * r^j \text{ oder } F_{S\max}(r) = \sum_{j=1}^N k_j * r^{2*j}$$

- 15 mit dem Polynomkoeffizienten k_j für eine diffraktive Brechkraft beschrieben ist, wobei j ein Zählwert und $N \geq j$ ein Endwert sind.

Um weitere Freiheitsgrade zur Dimensionierung der Linse zu erhalten ist die maximale Brechkraft $F_{S\max}$ nichtlinear radienabhängig und zusätzlich vom
20 Azimutwinkel ϕ der Apertur abhängig. Im diesem Fall gelten die Polynomformeln

$$F_{S\max}(r, \phi) = \sum_{j=2}^N c_j(\phi) * r^j \text{ oder } F_{S\max}(r, \phi) = \sum_{j=1}^N c_j(\phi) * r^{2*j}$$

mit den Polynomkoeffizienten c_j für eine refraktive Brechkraft und

$$F_{S\max}(r, \phi) = \sum_{j=2}^N k_j(\phi) * r^j \text{ oder } F_{S\max}(r, \phi) = \sum_{j=1}^N k_j(\phi) * r^{2*j}$$

- 25 mit dem Polynomkoeffizienten k_j für eine diffraktive Brechkraft, wobei j ein

Zählwert und $N \geq j$ ein Endwert sind.

In einem ersten Fall ergibt sich die Brechkraftverteilung $F_G(r, \phi)$ der Linse aus einem Höhenprofil $z_G(r, \phi)$ einer zu fertigenden zweiten optischen Fläche. Die

5 Form der zu fertigenden Fläche ergibt sich aus der Addition des Höhenprofils $z_L(r)$ einer berechneten Basisfläche und eines Höhenprofils $z(r, \phi)$, wobei gilt

$$F_G(r, \phi) = F_L + F_S(r, \phi) = z_G(r, \phi) = z_L(r) + z(r, \phi)$$

Die additive Höhe $z(r, \phi)$ ändert sich ausgehend von Null bis zu einem Maximalwert $z_{\max}(r)$, welcher die maximale Brechkraft $F_{S\max}(r)$ liefert, nichtlinear
10 radienabhängig und ergibt sich als Funktion

$$z(r, \phi) = z_{\max}(r) * w(\phi) \text{ mit}$$

$$z_{\max}(r) = \sum_{j=2}^N c_j * r^j \text{ oder } z_{\max}(r) = \sum_{j=1}^N c_j * r^{2*j}, \text{ wobei der Radius } r \text{ zwischen } 0$$

und $D/2$ und der Azimutwinkel ϕ der Apertur zwischen 0 und 2π sich stetig ändern, wodurch die zu fertigende optische Fläche mit dem spiralförmigen
15 Höhenprofil beschrieben ist.

In einer alternativen Variante ändert sich die additive Höhe $z(r, \phi)$ ausgehend von Null bis zu einem Maximalwert $z_{\max}(r, \phi)$, welcher die maximale Brechkraft $F_{S\max}(r, \phi)$ liefert, nichtlinear radienabhängig und vom Azimutwinkel ϕ der
20 Apertur abhängig und ergibt sich als Funktion

$$z(r, \phi) = z_{\max}(r, \phi) * w(\phi) \text{ mit}$$

$$z_{\max}(r, \phi) = \sum_{j=2}^N c_j(\phi) * r^j \text{ oder } z_{\max}(r, \phi) = \sum_{j=1}^N c_j(\phi) * r^{2*j}$$

In einem zweiten Fall ergibt sich der Brechkraftanteil mit dem spiralförmigen
25 Verlauf $F_S(r, \phi)$ aus der Wirkung eines optischen Gitters, welches auf eine gefertigte zweite optische Fläche mit der Brechkraft F_L aufgebracht ist, wobei gilt $F_G(r, \phi) = F_L + F_S(r, \phi) = F_L + \text{Phase}(r, \phi)$.

Die Frequenz des optischen Gitters ändert sich von einem Grundwert Null aus

bis zu einem Maximalwert $Phase_{\max}$, welche die maximale Brechkraft $F_{S\max}$ liefert, nichtlinear radienabhängig. Für den spiralförmigen Brechkraftverlauf gilt

$$F_S(r, \phi) = F_{S\max}(r) * w(\phi) = Phase(r, \phi) = Phase_{\max}(r) * w(\phi) \text{ mit}$$

$$Phase_{\max}(r) = \sum_{j=2}^N k_j * r^j \text{ oder } Phase_{\max}(r) = \sum_{j=1}^N k_j * r^{2*j},$$

- 5 wobei der Radius r zwischen 0 und $D/2$ und der Azimutwinkel ϕ der Apertur zwischen 0 und 2π sich stetig ändern, wodurch das optische Gitter einen spiralförmigen Phasenverlauf aufweist.

- 10 In einer alternativen Variante ändert sich die Frequenz des optischen Gitters von einem Grundwert Null ausgehend bis zu einem Maximalwert $Phase_{\max}$, welche die maximale Brechkraft $F_{S\max}(r, \phi)$ liefert, nichtlinear radienabhängig und ist vom Azimutwinkel ϕ der Apertur abhängig. Für den spiralförmigen Brechkraftverlauf gilt

$$F_S(r, \phi) = F_{S\max}(r, \phi) * w(\phi) =$$

$$Phase(r, \phi) = Phase_{\max}(r, \phi) * w(\phi)$$

- 15 mit

$$Phase_{\max}(r, \phi) = \sum_{j=2}^N k_j(\phi) * r^j$$

oder

$$Phase_{\max}(r, \phi) = \sum_{j=1}^N k_j(\phi) * r^{2*j}.$$

- 20 In einem dritten Fall ergibt sich der Brechkraftanteil mit dem spiralförmigen Verlauf F_S durch eine additive oder subtraktive Brechungsindexverteilung $\Delta n(r, \phi)$, wobei das Material der Linse eine Brechungsindexverteilung aufweist, die sich von einem Grundwert n_2 ausgehend bis zu einem Maximalwert $\Delta n_{\max}$ nichtlinear radienabhängig ändert, wobei gilt

- 25 $F_G(r, \phi) = F_L + F_S(r, \phi) = F_L + \Delta n(r, \phi)$, und für den spiralförmigen Brechkraftverlauf gilt

$$F_S(r, \phi) = F_{S_{\max}}(r) * w(\phi) = \Delta n(r, \phi) = \Delta n_{\max}(r) * w(\phi) \text{ mit}$$

$$\Delta n_{\max}(r) = \sum_{j=2}^N c_j * r^j \text{ oder } \Delta n_{\max}(r) = \sum_{j=1}^N c_j * r^{2*j},$$

wobei der Radius r zwischen 0 und $D/2$ und der Azimutwinkel ϕ der Apertur zwischen 0 und 2π sich stetig ändern, wodurch eine spiralförmige

5 Brechungsindexverteilung des Linsenmaterials beschrieben ist.

In einer alternativen Variante weist das Material der Linse (1) eine Brechungsindexverteilung auf, die sich von einem Grundwert n_2 ausgehend bis zu einem Maximalwert $\Delta n_{\max}$ nichtlinear radienabhängig und vom Azimutwinkel ϕ der Apertur abhängig ändert, wobei gilt

$$F_G(r, \phi) = F_L + F_S(r, \phi) = F_L + \Delta n(r, \phi), \text{ und für den spiralförmigen}$$

Brechkraftverlauf gilt

$$F_S(r, \phi) = F_{S_{\max}}(r, \phi) * w(\phi) = \Delta n(r, \phi) = \Delta n_{\max}(r, \phi) * w(\phi) \text{ mit}$$

$$\Delta n_{\max}(r, \phi) = \sum_{j=2}^N c_j(\phi) * r^j \text{ oder } \Delta n_{\max}(r, \phi) = \sum_{j=1}^N c_j(\phi) * r^{2*j}.$$

15

Die beschriebenen Varianten liefern spezielle neue Linsenformen, mit denen es möglich ist, einen vorgegebenen Brennweitenbereich simultan abzudecken, das heißt über einen ausgedehnten Fokalbereich eine hinreichend gute Bildqualität zu generieren.

20

Derartige Linsen mit einem erweiterten Fokusbereich finden in optischen Systemen für eine Kamera, ein Mikroskop oder optischen Messeinrichtungen Anwendung.

25

Ein Hauptanwendungsgebiet ist eine Intraokularlinse mit variablem Brennweitenbereich, die einen Fokussierbereich von 0 bis ca. 3.5 dpt bezogen auf eine feste Basisbrechkraft realisiert. Eine solche Intraokularlinse wird meist nach Entfernung der natürlichen Linse ins Auge implantiert. Diese kann aber

auch zusätzlich zur natürlichen Linse eingesetzt werden. Es ist auch vorgesehen, eine spiralförmige Brechkraftverteilung in die natürliche Augenlinse aufzuprägen oder einzuarbeiten.

5 Die erfindungsgemäße Linse wird in folgenden Schritten hergestellt:

Schritt 1: Berechnung eines monofokalen Basissystems mit einer Grundbrechkraft F_L unter Festlegung der Parameter einer ersten optischen Fläche, der Parameter einer optischen Basisfläche und einer Linsendicke d
10 sowie einer Werkstoffart mit einem Brechungsindex und einer Abbe-Zahl,

Schritt 2: Aufaddieren oder subtrahieren einer zusätzlichen Brechkraftverteilung $F_S(r, \phi)$, welche sich bezogen auf eine zur optischen Achse senkrecht stehende Ebene als Funktion der radialen Höhe r und des Azimutwinkels ϕ der Apertur zwischen einem Grundwert und einem Maximalwert $F_{Smax}(r)$ oder $F_{Smax}(r, \phi)$ nichtlinear radienabhängig ändert, womit die zusätzliche Brechkraft $F_S(r, \phi)$ spiralförmig veränderlich über die Basisfläche verteilt wird.
15

Schritt 3: Herstellung der spiralförmigen Brechkraftverteilung an der Linse und/oder auf der Linse und/oder innerhalb der Linse.
20

Das „Aufaddieren“ der spiralförmigen Brechkraftverteilung kann durch mehrere Varianten erfolgen, welche jeweils einzeln oder in beliebiger Kombination miteinander eingesetzt werden:
25

a) „Aufaddieren“ eines spiralförmigen Höhenprofils $z(r, \phi)$ auf eine der im Schritt 1 berechneten Flächen der Linse, welche die Basisfläche ist, wobei damit das Profil der zweiten optischen Fläche festgelegt ist.

Die erfindungsgemäße Linse wird durch ein Verfahren hergestellt, bei dem die
30 zusätzliche Brechkraftverteilung $F_S(r, \phi)$, welche sich zwischen dem Grundwert und dem Maximalwert ändert, durch eine Addition eines spiralförmigen Höhenprofils $z(r, \phi)$ auf die berechnete Basisfläche des Basissystems erzeugt

wird, wobei die additive Höhe z eine Funktion des Radius r und des Azimutwinkels ϕ der Apertur ist. Dabei ändert sich die additive Höhe z zwischen dem Wert Null und einem Maximalwert $z_{\max}(r)$ oder $z_{\max}(r, \phi)$ nichtlinear radienabhängig. Somit liegt ein spiralförmiges Höhenprofil der zu fertigen zweiten optischen Fläche fest.

b) „Aufaddieren“ einer spiralförmigen diffraktiven Struktur auf eine der berechneten Flächen der Linse gemäß Schritt 1.

Hier wird die zusätzliche Brechkraftverteilung $F_S(r, \phi)$, welche sich zwischen dem Grundwert und dem Maximalwert ändert, durch eine Addition der Wirkung eines spiralförmigen Gitterprofils Phase (r, ϕ) auf der gefertigten zweiten optischen Fläche erzeugt. Dabei entspricht die gefertigte zweite optische Fläche der berechneten Basisfläche und das Gitterprofil ist eine Funktion des Radius r und des Azimutwinkels ϕ der Apertur. Die Brechungswirkung ändert sich zwischen dem Wert Null und dem Maximalwert $\text{Phase}_{\max}(r)$ oder $\text{Phase}_{\max}(r, \phi)$ nichtlinear radienabhängig. Somit wird das spiralförmige optische Gitter auf der gefertigten optischen Fläche aufgebracht.

c) „Aufaddieren“ eines spiralförmigen Brechungsindexverlaufes im Material der Linse. In diesem Fall werden die berechneten Flächen gemäß Schritt 1 nicht verändert. Die zweite optische Fläche entspricht der Basisfläche.

Die Brechkraftverteilung $F_S(r, \phi)$, welche sich zwischen dem Grundwert und dem Maximalwert $\Delta n_{\max}(r)$ oder $\Delta n_{\max}(r, \phi)$ nichtlinear radienabhängig ändert, wird durch einen spiralförmigen Brechungsindexverlauf $\Delta n(r, \phi)$ im Material der Linse hergestellt.

Der oben bezeichnete Schritt 3, welcher die reale, körperliche Herstellung der erfindungsgemäßen Linse betrifft, beinhaltet das Herstellen der ersten optischen Fläche und der zweiten optischen Fläche sowie der spiralförmigen Brechkraftverteilung an und/oder auf und /oder innerhalb der Linse.

Die Herstellungsverfahren für optische Linsen, die im Zusammenhang mit der Erfindung auch mindestens eine nichtsphärische Fläche aufweisen kann, sind bekannt. Insbesondere sind dies:

- 5 aa) Herstellung eines Höhenprofils der optischen Flächen durch Heißprägen oder Spritzgießen
- ab) Herstellung eines Höhenprofils der optischen Flächen durch Diamantdrehen
- ba) Herstellung einer diffraktiven Struktur durch lithographische Ätzverfahren
- 10 auf der zweiten optischen Fläche
- bb) Herstellung einer diffraktiven Struktur durch Diamantdrehen auf der zweiten optischen Fläche
- ca) Herstellung eines Brechungsindex-Gradienten durch Schleuderguß aus
- 15 dem flüssigen Zustand
- cb) Herstellung eines Brechungsindex-Gradienten durch Ionenimplantation.

Die Varianten a) und/oder b) können natürlich auch auf beiden optischen Flächen einer Linse in einer die Wirkung aufteilenden Weise angewendet

20 werden. Diffraktive Optische Elemente können ergänzend oder zusammen mit der Erzeugung der Brechkraftverteilung zur Farbkorrektur eingesetzt werden. Zum Umfang der Erfindung gehören auch andere Verfahren und Maßnahmen, mit denen die erfindungsgemäße spiralförmige Brechkraftverteilung in einer Linse erzielt werden kann, beispielsweise durch Einbringen von Nanoteilchen.

25 Durch das beschriebene Vorgehen erreicht man zum Beispiel bei einer Intraokularlinse eine stetige Variation der zusätzlichen Brechkraft zur Brechkraft des Basissystems zwischen 0 und ca. 3.5 dpt bei einer in vielen Anwendungsfällen hinreichend guten Bildgüte.

Die radienabhängige und Azimut-winkelabhängige Brechkraft $F_G(r, \phi)$ ergibt sich aus der Summe einer Grundbrechkraft des Basissystems F_L und der radien- und winkelabhängigen Zusatzbrechkraft $F_S(r, \phi)$:

$$F_G(r, \phi) = F_L + F_S(r, \phi) = \frac{1}{f_L} + \frac{1}{f_S(r, \phi)}$$

- 5 Da standardisierte Optikverfahren zur Herstellung der Linse mit dem erweiterten Fokusbereich eingesetzt werden, ist diese Linse kostengünstig herstellbar.

Für den Fall a) „Aufaddieren“ eines spiralförmigen Höhenprofils auf eine der optischen Flächen der Linse und damit die Realisierung einer spiralförmigen

- 10 Brechkraftverteilung des Gesamtsystems gelten die nachfolgenden Betrachtungen:

Die Gesamtbrechkraft F_G setzt sich aus einer Addition der Grundbrechkraft des Basissystems F_L und der Zusatzbrechkraft F_S zusammen.

$$F_G(r, \phi) = F_L + F_S(r, \phi), \text{ wobei der spiralförmigen Brechkraftanteil}$$

- 15 $F_S(r, \phi) = F_{S_{\max}}(r, \phi) * w(\phi)$ ist.

Da in diesem Fall die Verteilung der Zusatzbrechkraft durch eine radiale Höhenverteilung erreicht wird, gilt

$$F_G(r, \phi) = F_L + F_S(r, \phi) = z_G(r, \phi) = z_L(r) + z(r, \phi)$$

Das Höhenprofil, welches die spiralförmige Zusatzbrechkraft liefert, ist

- 20 allgemein durch $z(r, \phi) = z_{\max}(r, \phi) * w(\phi)$ beschrieben.

Die Grundbrechkraft des Basissystems ergibt sich für sphärische Linsen aus

$$\text{der Formel } F_L = \left[\frac{n_2 - n_1}{n_1} * \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + \frac{(n_2 - n_1)^2 * d}{n_1 * n_2 * R_1 * R_2} \right].$$

Dabei ist beispielsweise R_1 der Radius der ersten optischen Fläche, welcher real hergestellt wird und R_2 ist der Radius der berechneten Basisfläche (die

- 25 additive Höhe z , welche die Zusatzbrechkraft liefert, kann auch auf den Radius R_1 aufaddiert werden oder auf beide Radien R_1 und R_2 aufgeteilt werden, die Formeln müssen dann entsprechend verändert werden).

Das Höhenprofil z_L für die errechnete Basisfläche mit dem Radius R_2 der sphärischen Linse ergibt sich zu $z_L(x, y) = R_2 - \sqrt{R_2^2 - x^2 - y^2}$, und mit $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ergeben sich die Daten der Basisfläche in Polarkoordinaten zu $z_L(r) = R - \sqrt{R^2 - r^2}$.

- 5 Für den Fall einer sphärischen Basisfläche gilt daher

$$z_G(r, \phi) = \left(R - \sqrt{R^2 - r^2} \right) + z_{\max}(r, \phi) * w(\phi)$$

Sofern nichtsphärische Basisflächen für die Linse zu Grunde gelegt werden, werden die bekannten Polynome für die Beschreibung nichtsphärischer Flächen zur Bestimmung der optischen Flächen und/oder der Basisfläche verwendet.

- 10 Die Zusatzbrechkraft wird hier im Fall a) durch einen additiven Term $z(r, \phi)$ als Materialhöhe erzeugt, welcher beispielsweise auf die optische Basisfläche mit dem Radius R_2 aufaddiert oder auch subtrahiert wird. Analoge Betrachtungen gelten auch für asphärische und Freiformflächen, die sich nicht mit einer einfachen Angabe eines Radius beschreiben lassen.
- 15 Das Radialpolynom für den maximalen Höhenanteil als Funktion des Radius r Brechkraft $z_{\max}(r)$, welches die maximale zu erzielende Dioptrienzahl verkörpert, ist:

$$z_{\max}(r) = \sum_{j=2}^N c_j * r^j$$

mit r als radiale Höhe und c_i : Koeffizientensatz des Radialpolynoms.

- 20 $w(\phi) = \frac{\phi}{2\pi}$ ist der winkelabhängige, lineare normierte Anteil, mit ϕ als azimuthalem Winkel auf der Basisfläche des Basissystems (Trägerlinse). Der additive Term $z(r, \phi)$, welcher auf die Basisfläche der Linse addiert wird, ergibt sich aus

$$z(r, \phi) = z_{\max}(r) * w(\phi) = \sum_{j=2}^N c_j * r^j * \frac{\phi}{2\pi}$$

Im einfachsten Falle reicht es daher bereits aus, die zusätzliche radiale Brechkraftverteilung als Produkt des normierten Azimutwinkels mit der maximal zu erreichenden Dioptrienzahl zu realisieren.

Für das Radialpolynom $z_{\max}(r)$ kann in analoger Weise auch der Ansatz

$$z_{\max}(r) = \sum_{j=1}^N c_j * r^{2*j} \text{ verwendet werden.}$$

Für den einfachsten Fall des Radialpolynoms $z_{\max}(r) = c_1 * r^2$ mit c_1 als Koeffizienten vor dem quadratischen Term lautet die Gleichung für den additiven Term also

$$z(r, \phi) = z_{\max}(r) * w(\phi) = c_1 * r^2 * \frac{\phi}{2\pi}$$

Das obige beschriebene Vorgehen stellt einen linearen „Schraubenanstieg“ dar. In dieser Form ist die Abbildungsqualität über den gesamten Dioptrienbereich in etwa gleichbleibend gut.

Oftmals ist es aber gewünscht, bestimmte Dioptrienbereiche wie zum Beispiel die Null-Dioptrien-Position zu bevorzugen. Hierzu ist es notwendig, die lineare Abhängigkeit der z-Höhe vom Winkel zu verlassen.

Der winkelabhängige Anteil kann allgemein durch die Formel

$$w(\phi) = \sum_{i=1}^M I_i * \exp[-a_i * (\phi - w_i)^2]$$

beschrieben werden, wobei w_i die Peaklagen (zwischen 0 und 2π), I_i die Peakintensitäten und $a_i > 0$ die Dämpfungskoeffizienten für die jeweiligen Peaklagen sind.

Beispielsweise lässt sich für $M=1$; $I_1=1$ und $w_1=2\pi$ durch die Funktion

$$z(r, \phi) = z_{\max}(r) * w(\phi) = \sum_{j=2}^N c_j * r^j * \exp[-a_1 * (\phi - 2\pi)^2]$$

mit $a_1=0.25$ eine Bevorzugung des Null-Dioptrienbereiches realisieren.

Der geringe Anstieg zwischen $\phi=0$ und $\phi=2\pi$ verursacht eine geringe

Addition von Brechkraft in diesem Winkelbereich und somit einen größeren Flächenanteil für die Null-Dioptrienentfernung.

Im Zusammenhang mit der Optimierung der Linse mit dem erweiterten Fokusbereich lassen sich weitere Vorteile erzielen, indem weitere Freiheitsgrade bei der Dimensionierung zur Verfügung stehen. Beispielsweise erfolgt dies, wenn die radiale Funktion $z_{\max}(r)$ ebenfalls einen azimutabhängigen

- 5 Koeffizientensatz erhält und so das Radialpolynom $z_{\max}(r, \phi)$ bestimmt wird als

$$z_{\max}(r, \phi) = \sum_{j=2}^N c_j(\phi) * r^j \quad \text{oder} \quad z_{\max}(r, \phi) = \sum_{j=1}^N c_j(\phi) * r^{2*j}$$

Daraus ergibt sich der additive Term $z(r, \phi)$ beispielsweise allgemein zu

$$z(r, \phi) = z_{\max}(r, \phi) * w(\phi) = \sum_{j=2}^N c_j(\phi) * r^j * \sum_{i=1}^M I_i * \exp[-a_i * (\phi - w_i)^2]$$

- 10 Daher lassen sich für den Winkelterm $w(\phi)$ noch weitere Varianten aus der

$$\text{allgemeinen Formel } w(\phi) = \sum_{i=1}^M I_i * \exp[-a_i * (\phi - w_i)^2]$$

heraus benennen, mit denen man die „Wirkungsdauer“ der einzelnen Azimutbereiche steuern kann.

- 15 Die vorstehenden Ausführungen basierten auf einem additiven Term, welcher refraktiv ist und auf eine der optischen Flächen des Basissystems addiert wird. Der Additionsterm kann natürlich auch in diffraktiver Form vorliegen, d.h. auf die sphärische Trägerfläche des Basissystems wird ein Diffraktives Optisches Element (DOE) aufgebracht, welches eine spiralförmige Phasenfunktion besitzt (Fall b)). Die Gestaltung dieser Phasenfunktion erfolgt dabei in vollkommener
20 Analogie zum refraktiven Ansatz. Es eignen sich insbesondere Blaze-Gitter, Sinusgitter und Binär-Gitter.

Die Gitterfrequenz ändert sich radial und winkelabhängig spiralförmig stetig von einem Wert Null bis zu einem Maximalwert, welcher der maximalen Brechkraft
25 entspricht.

$$Phase_{\max}(r) = \sum_{j=2}^N k_j * r^j \quad \text{oder} \quad Phase_{\max}(r) = \sum_{j=1}^N k_j * r^{2*j}$$

mit k_1 als Koeffizient des quadratischen Terms ergibt sich die maximale

Brechkraft, $F_{S \max \text{ diffraktiv}} = 2k_1 \frac{\lambda}{wl}$ und der winkelabhängige Term $F_{S \text{ diffraktiv}}(\phi)$

ergibt sich zu $F_{S \text{ diffraktiv}} = 2k_1 \frac{\lambda}{wl} * w(\phi)$ mit wl als

Konstruktionswellenlänge des Diffraktiven Optischen Elements und λ als

5 Anwendungswellenlänge.

Die Gesamtbrechkraft der Linse ergibt sich aus einer vergleichsweise starken refraktiven Grundbrechkraft des monofokalen Basissystems und aus einem relativ kleinen Brechkraftanteil der diffraktiv erzeugten Zusatzbrechkraft:

$$10 \quad F_{G \text{ diffraktiv}} = F_L + F_{S \text{ diffraktiv}} = F_L + 2k_1 \frac{\lambda}{wl} * w(\phi) .$$

So entsteht durch den diffraktiven Anteil ein relativ nur kleiner Farbfehler und die Linse mit dem erweiterten Fokusbereich ist auch für weißes Licht geeignet.

Der Additionsterm kann jedoch auch durch die Herstellung eines spiralförmigen Brechzahlgradienten realisiert werden (Fall c)). In DE 10 2009 033 984 A1 ist beschrieben, wie in einem optischen Material inhomogene optische Eigenschaften erzeugbar sind. In Abwandlung des dort beschriebenen Verfahrens lässt sich auch ein spiralförmiger Brechungsindex-Verlauf realisieren. Die Eigenschaften und die Gestaltung des Brechzahlgradienten erfolgt dabei in vollkommener Analogie zum refraktiven Ansatz.

Die Gesamtbrechkraft F_G ergibt sich aus der Grundbrechkraft F_L des monofokalen Basissystems plus der Zusatzbrechkraft F_S , welche durch die spiralförmige Brechkrafterhöhung bereitgestellt wird.

$$F_G = F_L + F_S(r, \phi) = \frac{1}{f_L} + \frac{1}{f_S(r, \phi)},$$

25 wobei f_L die Brennweite des Basissystems ist und f_S die Brennweite der spiralförmigen Zusatzbrechkraft, welche durch den Brechungsindexgradienten hervorgerufen wird. Die Zusatzbrechkraft $F_S(r, \phi)$ ist proportional der

Brechungsindexdifferenz $\Delta n(r, \phi)$ gemäß der Formel

$$\Delta n(r, \phi) = \Delta n_{\max}(r) * w(\phi)$$

oder

$$\Delta n(r, \phi) = \Delta n_{\max}(r, \phi) * w(\phi).$$

- 5 Die Brechungsindexdifferenz $\Delta n(r, \phi)$ läuft stetig von 0 (bei $r=0$ und $\phi=0$) bis zur maximalen Brechungsindexerhöhung $\Delta n_{\max}$ (bei $r=D/2$ und $\phi=2\pi$), wobei die Funktion $w(\phi)$ den oben beschriebenen linearen oder allgemeinen Verlauf vorgeben kann.
- 10 Dabei kann $\Delta n_{\max}$ gegenüber der Basisbrechzahl n_2 der Linse sowohl positiv als auch negativ sein.

Die zuvor beschriebenen Verfahren werden eingesetzt um die spiralförmige Brechkraftverteilung $F_s(r, \phi)$ an und/oder in eine Augenlinse, eine phake

- 15 Intraokularlinse oder eine aphake Intraokularlinse aufzuprägen und/oder einzuprägen.

Die Erfindung betrifft weiterhin ein Objektiv mit einem erweiterten Fokusbereich, welches im Strahlengang eine erfindungsgemäße Linse mit einem erweiterten

- 20 Fokusbereich als abbildendes Element aufweist.

Es versteht sich, dass die vorstehend genannten und die nachstehend noch zu erläuternden Merkmale nicht nur in den angegebenen Kombinationen, sondern auch in anderen Kombinationen oder in Alleinstellung einsetzbar sind, ohne den

- 25 Rahmen der vorliegenden Erfindung zu verlassen.

Die Erfindung wird nachfolgend an Hand von Figuren beschrieben. Es zeigen:

Figur 1: eine Linse mit erweitertem Fokusbereich in der Draufsicht in einem Graustufenbild mit dem spiralförmigen Brechkraftverlauf;

- Figur 2: eine Linse mit erweitertem Fokusbereich in der Seitenansicht mit Darstellung des spiralförmigen refraktiven Anteils;
- Figur 3: ein optisches System einer Kamera mit einer Linse mit dem erweiterten Fokusbereich;
- 5 Figur 4: eine schematische Darstellung einer Intraokularlinse im Auge;
- Figur 5: Azimutaler Verlauf des spiralförmigen aufmodulierten Anteils des Brechkraftverlaufes mit vorrangig linearem Anstieg;
- Figur 6: Azimutaler Verlauf des spiralförmigen aufmodulierten Anteils des Brechkraftverlaufes mit Bevorzugung des Null-Dioptrienbereiches;
- 10 Figur 7: Erweiterte Fokuslinsen-Oberfläche mit aufmoduliertem spiralförmigen Höhenprofil, stark überhöhte Darstellung;
- Figur 8: Linse mit erweitertem Fokusbereich in der Draufsicht mit Darstellung des spiralförmigen diffraktiven Anteils;
- Figur 9: Linse mit erweitertem Fokusbereich in einer perspektivischen
15 Draufsicht mit Darstellung des spiralförmigen diffraktiven Anteils;
- Figur 10: Azimutaler Verlauf der Zusatzbrechkraft mit ausgedehntem Bereich für die starke Dioptrienlage; und
- Figur 11: Azimutaler Verlauf der Zusatzbrechkraft mit Bevorzugung des Null-Dioptrienbereiches.

20

Figur 1 zeigt eine Linse mit einem erweiterten Fokusbereich mit dem spiralförmigen Brechkraftverlauf in der Draufsicht als Stufenbild der Brechkraftänderung. Die Darstellung gilt prinzipiell für die Fälle:

- a) „Aufaddieren“ eines spiralförmigen Höhenprofils auf eine der optischen
25 Flächen der Linse gemäß Schritt 1, welche die Basisfläche ist.
- b) „Aufaddieren“ einer spiralförmigen diffraktiven Struktur auf eine der optischen Flächen der Linse gemäß Schritt 1, welche die Basisfläche ist.
- c) „Aufaddieren“ eines spiralförmigen Brechungsindexverlaufes im Material der Linse.

30

Im Beispiel hat die Linse herkömmliche sphärische optische Flächen und eine Linsendicke, die ein Basissystem bilden, welches mit einer „Basis-Brechzahl“

von 1,5995 für 0 dpt Korrektur ausgelegt ist. Die zusätzliche spiralförmige Brechkraftverteilung wird durch einen spiralförmigen Brechungsindexgradienten realisiert und beginnt bei $\phi=0$ mit der Brechzahl von 1,5995. Die Brechzahl steigt radial- und winkelabhängig stetig spiralförmig und hat beispielsweise bei $\phi=\pi$ und $r= D/2$ eine Brechzahl von 1,61366. Das entspricht einer Brechkraft von 1,0 dpt. Die Brechzahl steigt weiter stetig an und hat bei $\phi=2 \pi$ und $r= D/2$ eine Brechzahl von 1,64615, was einer Brechkraft von 3,5 dpt entspricht. Zwischen $\phi=0$ und $\phi=2 \pi$ beträgt die Brechzahldifferenz 0,04665. Das entspricht einem nutzbaren kontinuierlichen Fokusbereich zwischen 0 dpt und 3,5 dpt.

Figur 2 zeigt eine Linse mit einem erweiterten Fokusbereich in der Seitenansicht mit Darstellung des spiralförmigen refraktiven Anteils. Die Linse 1 ist zunächst durch ihr Basissystem mit dem Radius R_1 der ersten optischen Fläche 2 und dem Radius R_2 für die errechnete Basisfläche 3, sowie der Linsendicke d und der Brechungsindex n_2 bestimmt. Diese Parameter sind für eine vorgesehene Grundvergrößerung bestimmt. Auf die errechnete Form der Basisfläche 3 mit dem Radius R_2 wird eine zusätzliche Materialdicke z „aufaddiert“, wobei bei $\phi=0$ die zusätzliche Materialdicke $z=0$ mm ist, dann stetig ansteigt und bei $\phi=2 \pi$ seinen maximalen Wert im Millimeterbereich hat. In der Praxis wird der Maximalwert etwas vor dem Azimutwinkel $\phi=2 \pi$ liegen, um einen stetigen, wenn auch sehr steilen Übergang zurück zum Wert Null bei $\phi=0$ zu realisieren, wie das durch die mit 4a bezeichnete gestrichelte Kurve angedeutet ist.

Als Beispiel werden Parameter für eine Linse angegeben:

$R_1= -15,1411$ mm herzustellender Radius

$R_2= 22,3164$ mm berechneter Radius

$d= 0,8$ mm

$n_1= 1$ (Brechzahl außerhalb der Linse)

$n_2= 1,56$ (Brechzahl des Linsenmediums)

Somit ergibt sich aus der Formel

$$f = \frac{1}{\left[\frac{n_2 - n_1}{n_1} * \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + \frac{(n_2 - n_1)^2 * d}{n_1 * n_2 * R_1 * R_2} \right]}$$

die Brennweite der „Basislinse“ zu 16,233 mm.

- 5 Auf die errechnete Basisfläche mit dem Radius $R_2 = 22,3164$ mm wird ein linearer Schraubenanstieg gemäß der Formel

$$z(r, \phi) = z_{\max}(r) * w(\phi) = c_1 * r^2 * \frac{\phi}{2\pi}$$

als stetiges, linear verlaufendes spiralförmiges Höhenprofil aufaddiert.

- 10 Mit $c_1 = -0,013$ erhält man einen spiralförmigen Zusatz, welcher die Brennweite in Luft bis auf 20,57 mm erhöht, was 3,5 dpt entspricht.

Figur 3 zeigt ein optisches System einer Kamera mit einer erfindungsgemäßen Linse 1, welche den erweiterten Fokusbereich aufweist. Das optische System besteht aus der erweiterten Fokuslinse 1, und in Lichtausbreitungsrichtung folgt
15 eine asphärische Linse 5 mit den optischen Flächen 17 und 18, dann folgen ein Filter 6 und ein Sensor 7. Die erweiterte Fokuslinse 1 hat objektseitig eine erste optische Fläche 2. Bildseitig ist die spiralförmig ausgebildete zweite optische Fläche 4 angeordnet.

- 20 Als Beispiel ist ein Objektiv eines Mobiltelefons mit einer Brennweite von 5,61 mm gezeigt. Gemäß der Formel für den spiralförmigen, linearen

Schraubenanstieg $z(r, \phi) = c_1 * r^2 * \frac{\phi}{2\pi}$ ergibt sich mit den Parametern

$c_1 = -0,01$; $\phi = 0$ bis 2π (Azimutwinkel), r = radiale Höhe zwischen 0 und $D/2$, die Form der spiralförmigen optische Fläche 4 über der berechneten

- 25 Basisfläche 3 in Analogie wie zu Figur 2 beschrieben. Die Basisfläche 3 ist im Beispiel konkav und sphärisch, mit dem Radius $R_2 = 5,21369$ mm.

Die optischen Flächen 17 und 18 der Linse 5 sowie die erste optische Fläche 2 der erweiterten Fokuslinse 1 sind rotationsasphärisch. Die Parameter des Objektivs sind: Brennweite $f = 5,61$ mm; Baulänge 6,8 mm; Öffnung 1:2.8.

5 Linse 1:

Dicke 1,738 mm; Material = Zeonex

Erste optische Fläche 2: $R_1 = 1,7668$ mm

Asphärenkoeffizienten:

10 $K = -0,162288$

$A = 0,472171E-04$

$B = 0,225901E-02$

$C = -0,179019E-03$

$D = -0,290228E-03$

15 $E = 0,131193E-03$

Zweite optische Fläche 4

Der berechnete Radius der Basisfläche 3 für die Grundbrechkraft der Linse F_L ist $R_2 = 5,21369$ mm (konkav, sphärisch). Die Grundbrennweite der Linse ist 20 330 mm, was einer Zusatzbrechkraft von maximal 3,0 dpt entspricht.

Die Oberflächenform der Basisfläche kann mit der Formel

$z_L(r) = R_2 - \text{signum}(R_2) \sqrt{R_2^2 - r^2}$ beschrieben werden. Die additive Höhe

ergibt sich aus $z(r, \phi) = z_{\max}(r) * w(\phi) = c_1 * r^2 * \frac{\phi}{2\pi}$ mit dem Koeffizient

des Polynoms $c_1 = -0,01$.

25

Für jeden Flächenpunkt der Basisfläche ist die additive Höhe hinzuzurechnen, so dass das Gesamthöhenprofil der zweiten optischen Fläche durch folgende Formel bestimmt ist:

$$z_G(r, \phi) = \left(R_2 - \text{signum}(R_2) \sqrt{R_2^2 - r^2} \right) + c_1 * r^2 * \frac{\phi}{2\pi}$$

Linse 5:

Dicke 2,703 mm; Material = Polycarbonat

5 Fläche 17: $R = -3,85282 \text{ mm}$

Asphärenkoeffizienten:

$K = 16,027906$

$A = -0,687655E-01$

$B = 0,676838E-01$

10 $C = -0,101439E+00$

$D = 0,900331E-02$

$E = 0,345714E-01$

$F = -0,101087E-01$

$G = 0,950453E-16$

15 $H = 0,443668E-17$

$J = 0,105965E-19$

Fläche 18: $R_4 = 413.75417 \text{ mm}$

Asphärenkoeffizienten:

20 $K = -0.238656e57$

$A = -.200963E-01$

$B = 0.297531E-02$

$C = -.110276E-02$

$D = 0.209745E-03$

25 $E = -.935430E-05$

$F = -.430237E-05$

$G = 0.434653E-06$

$H = 0.475646E-07$

$J = -.612564E-08$

30

Abstand Linse 1 bis zur Linse 5 :

0,571 mm

Abstand Linse 5 bis zum Filter 6:

0,4 mm

Abstand Filter bis zur Bildebene des Detektors 7: 0,4 mm
Dicke des Filters 6 0,4 mm

Das optische System hat eine Baulänge von 6,8 mm. Die Öffnung beträgt 1:2,8.

- 5 Das Objektiv liefert für einen Objektstand von 330 mm bis unendlich eine ausreichend gute Bildqualität, welche ohne Nachfokussieren erreicht wird. Es ist vorteilhaft, dass sich die spiralförmige optische zweite Fläche auf der Rückseite der Frontlinse befindet, wobei die übrige Fläche der Rückseite, welche nicht von der spiralförmigen optischen Fläche ausgefüllt ist, eine Blende
10 15 bildet.

Ein weiteres Ausführungsbeispiel beschreibt ein Objektiv für eine Kamera mit einer Brennweite von $f = 6,1$ mm, bei einer Baulänge von 6,8 mm und einer Öffnung von 1:2,8. Die Darstellung entspricht der in Figur 3 gezeigten.

- 15 Die Linse 1 mit dem erweiterten Fokusbereich hat objektseitig eine erste optische Fläche 2. Ihre zweite optische Fläche 4 entspricht in ihrer Oberflächenform der errechneten Basisfläche 3 und trägt das Diffraktive Optische Element 16, welches den spiralförmigen Brechkraftverlauf zusätzlich zur Brechkraft des Basissystems liefert.

20

Alle optischen Flächen 3, 4, 17 und 18 der Linsen 1 und 5 besitzen eine rotationsasphärische Grundform.

Linse1: Linsendicke = 1,59mm, Material = Zeonex

optische Fläche 2: $R_1 = 1,77985$

- 25 Asphärenkoeffizienten:

$K = 0,113528$

$A = -0,369422E-02$

$B = 0,497838E-05$

$C = -0,526491E-03$

30

optische Fläche 4 (entspricht der errechneten Fläche 3): $R_2 = 4,43773$

Asphärenkoeffizienten:

$$K = 20,010847$$

$$A = -0,165668E-01$$

$$B = 0,598703E-01$$

$$5 \quad C = -0,239849E+00$$

$$D = 0,363395E+00$$

$$E = -0,231421E+00$$

Das Diffraktive Optische Element 16 hat den Koeffizienten des spiralförmigen Polynoms $k_1 = -2,1350E-03$

10 Der zusätzliche spiralförmige Brechkraftanteil berechnet sich zu

$$F_{S \text{ diffraktiv}} = 2k_1 * \frac{\phi}{2\pi} * \frac{\lambda}{wl}$$

Und die Gesamtbrechkraft ergibt sich zu

$$F_{G \text{ diffraktiv}} = F_L + F_{S \text{ diffraktiv}} = F_L + 2k_1 * \frac{\phi}{2\pi} * \frac{\lambda}{wl}$$

15 Die Linse 5 hat eine Dicke von 2,98 mm, Material = Polycarbonat

Fläche 17: $R_3 = -4,60229 \text{ mm}$

Asphärenkoeffizienten:

$$K = 12.980316$$

$$A = -.289939E-01$$

$$20 \quad B = -.193341E-01$$

$$C = 0.430879E-01$$

$$D = -.575934E-01$$

$$E = 0.345714E-01$$

$$F = -.101087E-01$$

25

Fläche 18: $R_4 = -51,75016 \text{ mm}$

Asphärenkoeffizienten:

$$K = -0,238656E-01$$

$$A = -0,128992E-01$$

$$30 \quad B = 0,257544E-02$$

$$C = -0,116486E-02$$

$$D = 0,176791E-03$$

$$E = -0,381907E-06$$

$$F = -0,294503E-05$$

$$5 \quad G = 0,250155E-06$$

$$H = 0,303670E-08$$

$$J = -0,768736E-09$$

Der Abstand zwischen der Linse 1 bis zur Linse 5 beträgt 1,05 mm, der Abstand
 10 zwischen der Linse 5 bis zum Filter 6 beträgt 0,4 mm und der Abstand vom
 Filter 6 bis zur Bildebene des Detektors 7 beträgt 0,4 mm, wobei die Filterdicke
 ebenfalls 0,4 mm beträgt.

Das Objektiv liefert einen gleichzeitigen Fokusbereich von 330 mm bis
 15 unendlich.

Dabei unterstützt insbesondere die zweckmäßige Wahl des Koeffizienten c vor
 dem quadratischen Term die Achromatisierung des Objektivs.

20 Figur 4 zeigt eine schematische Darstellung einer Intraokularlinse 11, welche
 als erweiterte Fokuslinse 1 ins Auge implantiert ist. Im Beispiel ersetzt diese die
 natürliche Augenlinse und befindet sich im Lichtweg zwischen der Cornea 12
 und der Retina 14 im Kammerwasser 13.

25 Die Intraokularlinse 11 hat eine sphärische erste optische Fläche 2 sowie die
 spiralförmige zweite optische Fläche 4. Beispielsweise hat die Intraokularlinse
 11 mit dem erweiterten Fokusbereich folgende Parameter für das Basissystem:

$R_1 = -15,1411$ mm (hergestellte erste optische Fläche 2)

$R_2 = 22,3164$ mm (berechnete Basisfläche 3)

30 Linsendicke $d = 0,8$ mm

Brechzahl außerhalb der Linse $n_1 = 1,33$

Brechzahl des Linsenmediums $n_2 = 1,56$

Mit der Formel

$$f = \frac{1}{\left[\frac{n_2 - n_1}{n_1} * \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + \frac{(n_2 - n_1)^2 * d}{n_1 * n_2 * R_1 * R_2} \right]}$$

ergibt sich die Basis-Brennweite $f = 53,97$ mm für das Basissystem der Intraokularlinse 11 im Kammerwasser 13.

- 5 Die Zusatzbrechkraft ergibt sich aus der additiven Höhe auf der Basisfläche mit

der Formel $z(r, \phi) = c_1 * r^2 * \frac{\phi}{2\pi}$

mit $c_1 = -0,013$

- 10 Die „aufaddierte“ Spiralfäche würde den Wert der Basisbrennweite von 16,233 mm auf 17.2 mm verlängern, was 3.5 dpt entspricht. Die erweiterte Fokuslinse liefert demnach eine Varianz des Dioptrienbereiches zwischen 0 dpt und 3,5 dpt.

- 15 Figur 5 zeigt den azimuthalen Verlauf des spiralförmigen aufmodulierten Anteils des Brechkraftverlaufes auf die Basisfläche mit einem vorrangig linearen Anstieg entsprechend der Formel

$$z(r, \phi) = z_{\max}(r) * w(\phi) = c_1 * r^2 * \frac{\phi}{2\pi}$$

für den additiven Anteil an der Brechkraft.

- 20 Aus Gründen der besseren Herstellbarkeit und um scharfe Übergänge zu vermeiden ist der Kurvenverlauf in der Nähe von 2π geglättet.

Figur 6 zeigt den azimuthalen Verlauf des spiralförmigen aufmodulierten Anteils des Brechkraftverlaufes mit Bevorzugung des Null-Dioptrienbereiches

- 25 In der Praxis ist es oftmals gewünscht, bestimmte Dioptrienbereiche wie zum Beispiel die Null-Dioptrien-Position zu bevorzugen. Hierzu ist es notwendig, die

lineare Abhängigkeit der z-Höhe vom Winkel zu verlassen. Beispielsweise lässt sich durch die Funktion

$$z(r, \phi) = z_{\max}(r) * w(\phi) = \sum_{j=1}^N c_j * r^{2*j} * \exp[-a * (\phi - 2\pi)^2]$$

mit $a=0.25$ eine Bevorzugung des Null-Dioptrienbereiches verwirklichen.

5 Der winkelabhängige Anteil $w(\phi) = \exp[-a * (\phi - 2\pi)^2]$

ist in Figur 6 dargestellt. Der geringe Anstieg zwischen $\phi=0$ und $\phi=2$ verursacht eine geringe Addition von Brechkraft in diesem Winkelbereich und somit einen größeren Flächenanteil für die Nulldioptrienentfernung.

10

Figur 7 zeigt eine überhöhte Darstellung des spiralförmig verlaufenden additiven Höhenprofils gemäß der Figur 2. Die spiralförmige optische Fläche 4 entsteht dadurch, dass auf die sphärische Basisfläche 3 die azimuthal-abhängige Polynomfunktion aufaddiert ist. Dargestellt ist die auf die sphärische Basisfläche 3 gemäß Figur 2 rein aufaddierte Höhe z über dem Durchmesser der Linsenoberfläche.

15

Figur 8 zeigt eine Linse mit einem erweiterten Fokusbereich, welche nach dem diffraktiven Ansatz gemäß Variante b) berechnet wurde in der Draufsicht, wobei nur der spiralförmige diffraktive Anteil sichtbar ist. In diesem Fall der Erzeugung der spiralförmigen Brechkraftverteilung der Linse mittels des diffraktiven Ansatzes lautet die Phasenfunktion:

20

$$Phase(r, \phi) = Phase_{\max}(r) * w(\phi) = \left\langle \sum_{j=2}^N k_j * r^j \right\rangle * \left\langle \sum_{i=1}^M I_i * \exp[-a_i * (\phi - w_i)^2] \right\rangle$$

Mit

25

$$t = \sum_{j=2}^N k_j * r^j * \sum_{i=1}^M I_i * \exp[-a_i * (\phi - w_i)^2]$$

ergibt sich das Profil (r, ϕ) zu

$$Profil(r, \phi) = \left(\frac{t}{wl} - floor\left(\frac{t}{wl}\right) \right) * h$$

$$Pr ofil(r, phi) = \left(\frac{\sum_{j=2}^N k_j * r^j * \sum_{i=1}^M I_i * \exp[-a_i * (phi - w_i)^2]}{wl} - floor\left(\frac{\sum_{j=2}^N k_j * r^j * \sum_{i=1}^M I_i * \exp[-a_i * (phi - w_i)^2]}{wl}\right) \right) * h$$

mit k_i Koeffizient des diffraktiven Polynoms; r Radius (radiale Höhe); I_i Intensitäten; a_i Dämpfungskoeffizienten; wl Konstruktionswellenlänge des DOE und h Profiltiefe.

5

Für den linearen Spezialfall gilt:

$$Phase(r, phi) = Phase_{\max}(r) * w(phi) = k_1 * r^2 * \frac{phi}{2\pi}$$

Mit $t = k_1 * r^2 * \frac{phi}{2\pi}$

ergibt sich

$$Pr ofil(r, phi) = \left(\frac{t}{wl} - floor\left(\frac{t}{wl}\right) \right) * h =$$

$$10 \left(\frac{k_1 * r^2 * phi}{wl * 2\pi} - floor\left(\frac{k_1 * r^2 * phi}{wl * 2\pi}\right) \right) * h$$

Beispieldaten sind: Koeffizient des diffraktiven Polynoms $k_1 = 0.0025$, die Höhe r im Bereich zwischen 0 bis 3 mm, der Azimutwinkel phi im Bereich von 0 bis 2π , Konstruktionswellenlänge des DOE $wl = 550\text{nm}$, Profiltiefe $h = 0.001\text{mm}$.

15 Figur 9 zeigt die Linse mit dem erweiterten Fokusbereich in einer perspektivischen Draufsicht auf den Durchmesser der Linse mit Darstellung des spiralförmigen diffraktiven Anteils.

Ein Verlauf des winkelabhängigen Faktors $w(phi)$ ist in Figur 10 dargestellt.

Mit der modifizierten Formel für die Winkelabhängigkeit

$$w(\phi) = I_1 * \exp[-a_1 * (\phi - w_1)^2] + I_2 * \exp[-a_2 * (\phi - w_2)^2]$$

wobei

w_1, w_2 : Peak-Lagen (zwischen 0 und 2π),

5 I_1, I_2 : Peakintensitäten und

a_1, a_2 : Dämpfungskoeffizienten für die beiden Peaks

sind, ergibt sich beispielsweise mit den Werten

$I_1 = 0,9$; $I_2 = 0,1$; $a_1 = 0,8$; $a_2 = 0,1$; $w_1 = 1,8$; $w_2 = 4,5$

ein Verlauf für die Azimutabhängigkeit, bei dem ein ausgedehnter Bereich für

10 die stärkste Dioptrienlage (ca. 3dpt) reserviert wird.

Mit den Werten $I_1 = 0,9$; $I_2 = 0,1$; $a_1 = 0,8$; $a_2 = 0,1$; $w_1 = 4,5$; $w_2 = 0,5$ wird mit der

Formel $w(\phi) = I_1 * \exp[-a_1 * (\phi - w_1)^2] + I_2 * \exp[-a_2 * (\phi - w_2)^2]$

der Null-Dioptrienbereich deutlich bevorzugt, was in Figur 11 dargestellt ist.

Bezugszeichen

	1	Linse
5	2	gefertigte erste optische Fläche (sphärisch, asphärisch, radialsymmetrisch, Freiformfläche)
	3	berechnete Basisfläche (sphärisch, asphärisch, radialsymmetrisch, Freiformfläche)
	4	gefertigte zweite optische Fläche (sphärisch, asphärisch, radialsymmetrisch, Freiformfläche, spiralförmige Oberfläche)
10		
	5	asphärische Linse
	6	Filter
	7	Sensor
	8	Lichtbündel
15	9	Linsenrand
	10	optische Achse
	11	Intraokularlinse
	12	Cornea
	13	Kammerwasser
20	14	Retina
	15	Blende
	16	spiralförmiges Diffraktives Optisches Element (DOE)
	17	optische Fläche
	18	optische Fläche
25		
	F_G	Gesamtbrechkraft der Linse
	F_L	Brechkraft des Basissystems der Linse
	$F_S(r, \phi)$	Brechkraft, die durch den spiralförmigen Anteil zur Brechkraft des Basissystems hinzu kommt
30	$F_{S \max}$	maximale Brechkraft
	f_L	Brennweite des Basissystems

	$f_s(r, \phi)$	Brennweite der spiralförmigen Zusatzbrechkraft
	N, M	Endwerte
	i, j	Zählwerte
	c_j, c_1, c_2	Polynomkoeffizienten für den refraktiven Fall
5	k_j, k_1, k_2	Polynomkoeffizienten für den diffraktiven Fall
	$z_{\max}(r)$	maximale Höhe in Abhängigkeit vom Radius
	$z_{\max}(r, \phi)$	maximale Höhe, in Abhängigkeit vom Radius und Azimutwinkel
	$z(r, \phi)$	additive Höhe auf der Basisfläche
	$z_L(r)$	Höhenprofil der berechneten Basisfläche
10	$z_G(r, \phi)$	Höhenprofil der gefertigten optischen Fläche
	$w(\phi)$	winkelabhängiger Anteil des Brechkraftverlaufes
	w_i, w_1, w_2	Peaklagen der Winkelverteilungsfunktion
	a_i, a_1, a_2	Dämpfungskoeffizienten für die jeweiligen Peaklagen
	I_i, I_1, I_2	Intensitätswerte der Einzelpeaks
15	D	Linsendurchmesser
	r	Radius (radiale Höhe)
	ϕ	Azimutwinkel
	R_1	Radius der ersten optischen Fläche
	R_2	Radius der optischen Basisfläche
20	n_1	Brechzahl des umgebenden Mediums
	n_2	Brechzahl der Linse
	d	Linsendicke
	h	Profiltiefe des diffraktiven Elements
	λ	Anwendungswellenlänge
25	w_l	Konstruktionswellenlänge des diffraktiven Elements
	t	Rechengröße
	$\text{floor}(t)$	ganzzahliger Anteil
	$\text{Phase}_{\max}(r, \phi)$	Maximalwert der Gitterfrequenz, welcher der maximalen Brechkraft entspricht
30	$\text{Phase}(r, \phi)$	Phasenfunktion
	$\text{Profil}(r, \phi)$	auf die Höhe h reduzierte Phasenfunktion
	x, y	kartesische Koordinaten

Patentansprüche

1. Linse mit einem erweiterten Fokusbereich, wobei die Linse (1) aus einem festen, transparenten Material besteht sowie zwei gefertigte optische Flächen (2, 4) hat, wobei die Linse (1) eine Brechkraftverteilung F_G aufweist, dadurch gekennzeichnet, dass sich die Brechkraftverteilung F_G der Linse (1) bezogen auf eine zur optischen Achse (10) senkrecht stehende Ebene als Funktion der radialen Höhe r und des Azimutwinkels ϕ der Apertur zwischen einem Grundwert der Brechkraft F_L ungleich Null und einem Maximalwert F_{Smax} ändert und somit sich die Brechkraftverteilung zu

$$F_G(r, \phi) = F_L + F_S(r, \phi) \text{ ergibt, mit einem spiralförmigen}$$

$$\text{Brechkraftanteil } F_S(r, \phi) = F_{Smax}(r) * w(\phi)$$

wobei $F_{Smax}(r)$ nichtlinear radienabhängig ist und $w(\phi)$ ein Faktor für den Brechkraftanteil mit dem spiralförmigen Verlauf ist, der allgemein

$$\text{mit der Formel } w(\phi) = \sum_{i=1}^M I_i \exp[-a_i(\phi - w_i)^2] \text{ beschrieben ist, und}$$

w_i die Peaklagen der Winkelverteilungsfunktion; I_i Intensitätswerte der Einzelpeaks; $a_i > 0$ Dämpfungskoeffizienten für die jeweiligen Peaklagen sowie i ein Zählwert und $M \geq i$ ein Endwert sind.

2. Linse mit einem erweiterten Fokusbereich, wobei die Linse (1) aus einem festen, transparenten Material besteht sowie zwei gefertigte optische Flächen (2, 4) hat, wobei die Linse (1) eine Brechkraftverteilung F_G aufweist, dadurch gekennzeichnet, dass sich die Brechkraftverteilung F_G der Linse (1) bezogen auf eine zur optischen Achse (10) senkrecht stehende Ebene als Funktion der radialen Höhe r und des Azimutwinkels ϕ der Apertur zwischen einem Grundwert der Brechkraft F_L ungleich Null und einem Maximalwert F_{Smax} ändert und somit sich die Brechkraftverteilung zu

$$F_G(r, \phi) = F_L + F_S(r, \phi) \text{ ergibt, mit einem spiralförmigen}$$

Brechkraftanteil

$$F_S(r, \phi) = F_{S_{\max}}(r) * w(\phi)$$

wobei $F_{S_{\max}}(r)$ nichtlinear radienabhängig ist und $w(\phi)$ ein Faktor für den Brechkraftanteil mit dem spiralförmigen Verlauf ist, der mit der

5 Formel $w(\phi) = \frac{\phi}{2\pi}$ als linearer Verlauf beschrieben ist.

3. Linse nach Anspruch 1 oder nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die maximale Brechkraft $F_{S_{\max}}(r)$ nichtlinear radienabhängig ist und mit den Polynomformeln

10
$$F_{S_{\max}}(r) = \sum_{j=2}^N c_j * r^j \text{ oder } F_{S_{\max}}(r) = \sum_{j=1}^N c_j * r^{2*j}$$

mit den Polynomkoeffizienten c_j für eine refraktive Brechkraft und

$$F_{S_{\max}}(r) = \sum_{j=2}^N k_j * r^j \text{ oder } F_{S_{\max}}(r) = \sum_{j=1}^N k_j * r^{2*j}$$

mit dem Polynomkoeffizienten k_j für eine diffraktive Brechkraft beschrieben ist, wobei j ein Zählwert und $N \geq j$ ein Endwert sind.

15

4. Linse nach Anspruch 1 oder nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die maximale Brechkraft $F_{S_{\max}}(r, \phi)$ nichtlinear radienabhängig und vom Azimutwinkel ϕ der Apertur abhängig ist mit den

Polynomformeln $F_{S_{\max}}(r, \phi) = \sum_{j=2}^N c_j(\phi) * r^j$ oder

20
$$F_{S_{\max}}(r, \phi) = \sum_{j=1}^N c_j(\phi) * r^{2*j}$$

mit den Polynomkoeffizienten c_j für eine refraktive Brechkraft und

$$F_{S_{\max}}(r, \phi) = \sum_{j=2}^N k_j(\phi) * r^j \text{ oder } F_{S_{\max}}(r, \phi) = \sum_{j=1}^N k_j(\phi) * r^{2*j}$$

mit dem Polynomkoeffizienten k_j für eine diffraktive Brechkraft

beschrieben ist, wobei j ein Zählwert und $N \geq j$ ein Endwert sind.

5. Linse nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Brechkraftverteilung $F_G(r, \phi)$ der Linse (1) sich aus einem Höhenprofil $z_G(r, \phi)$ einer zu fertigenden zweiten optischen Fläche (4) ergibt, welches sich aus der Addition des Höhenprofils $z_L(r)$ einer berechneten Basisfläche (3) und eines Höhenprofils $z(r, \phi)$ ergibt, wobei gilt

$$F_G(r, \phi) = F_L + F_S(r, \phi) = z_G(r, \phi) = z_L(r) + z(r, \phi), \text{ wobei}$$

sich die additive Höhe $z(r, \phi)$ ausgehend von Null bis zu einem

Maximalwert $z_{\max}(r)$, welcher die maximale Brechkraft $F_{S\max}(r)$ liefert, nichtlinear radienabhängig ändert und sich als Funktion

$$z(r, \phi) = z_{\max}(r) * w(\phi) \text{ mit}$$

$$z_{\max}(r) = \sum_{j=2}^N c_j * r^j \text{ oder } z_{\max}(r) = \sum_{j=1}^N c_j * r^{2*j}$$

ergibt, wobei der Radius r zwischen 0 und $D/2$ und der Azimutwinkel ϕ der Apertur zwischen 0 und 2π sich stetig ändern, wodurch die zu fertigende optische Fläche (4) mit dem spiralförmigen Höhenprofil beschrieben ist.

6. Linse nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Brechkraftverteilung $F_G(r, \phi)$ der Linse (1) sich aus einem Höhenprofil $z_G(r, \phi)$ der zu fertigenden zweiten optischen Fläche (4) ergibt, welches sich aus der Addition des Höhenprofils $z_L(r)$ einer berechneten Basisfläche (3) und eines Höhenprofils $z(r, \phi)$ ergibt, wobei gilt

$$F_G(r, \phi) = F_L + F_S(r, \phi) = z_G(r, \phi) = z_L(r) + z(r, \phi), \text{ wobei}$$

sich die additive Höhe $z(r, \phi)$ ausgehend von Null bis zu einem Maximalwert $z_{\max}(r, \phi)$, welcher die maximale Brechkraft $F_{S\max}(r, \phi)$ liefert, nichtlinear radienabhängig und vom Azimutwinkel ϕ der Apertur abhängig ändert und sich als Funktion

$$z(r, \phi) = z_{\max}(r, \phi) * w(\phi) \text{ mit}$$

$$z_{\max}(r, \phi) = \sum_{j=2}^N c_j(\phi) * r^j \text{ oder } z_{\max}(r, \phi) = \sum_{j=1}^N c_j(\phi) * r^{2*j}$$

ergibt, wobei der Radius r zwischen 0 und $D/2$ und der Azimutwinkel ϕ der Apertur zwischen 0 und 2π sich stetig ändern, wodurch die zu fertigende optische Fläche (4) mit dem spiralförmigen Höhenprofil beschrieben ist.

7. Linse nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass der Brechkraftanteil mit dem spiralförmigen Verlauf $F_S(r, \phi)$ sich aus der Wirkung eines optischen Gitters ergibt, welches auf eine gefertigte zweite optische Fläche (4) mit der Brechkraft F_L aufgebracht ist, wobei gilt $F_G(r, \phi) = F_L + F_S(r, \phi) = F_L + \text{Phase}(r, \phi)$, und sich die Frequenz des optischen Gitters von einem Grundwert Null ausgehend bis zu einem Maximalwert $\text{Phase}_{\max}$, welche die maximale Brechkraft $F_{S\max}$ liefert, nichtlinear radienabhängig ändert, wobei für den spiralförmigen Brechkraftverlauf gilt

$$F_S(r, \phi) = F_{S\max}(r) * w(\phi) = \text{Phase}(r, \phi) = \text{Phase}_{\max}(r) * w(\phi) \text{ mit}$$

$$\text{Phase}_{\max}(r) = \sum_{j=2}^N k_j * r^j \text{ oder } \text{Phase}_{\max}(r) = \sum_{j=1}^N k_j * r^{2*j},$$

wobei der Radius r zwischen 0 und $D/2$ und der Azimutwinkel ϕ der Apertur zwischen 0 und 2π sich stetig ändern, wodurch das optische Gitter einen spiralförmigen Phasenverlauf aufweist.

8. Linse nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass der Brechkraftanteil mit dem spiralförmigen Verlauf $F_S(r, \phi)$ sich aus der Wirkung eines optischen Gitters ergibt, welches auf eine gefertigte zweite optische Fläche (4) mit der Brechkraft F_L aufgebracht ist, wobei gilt $F_G(r, \phi) = F_L + F_S(r, \phi) = F_L + \text{Phase}(r, \phi)$, und sich die Frequenz des optischen Gitters von einem Grundwert Null ausgehend bis zu einem Maximalwert $\text{Phase}_{\max}$, welche die maximale

Brechkraft $F_{S\max}(r, \phi)$ liefert, nichtlinear radienabhängig und vom Azimutwinkel ϕ der Apertur abhängig ändert, wobei für den spiralförmigen Brechkraftverlauf gilt

$$F_S(r, \phi) = F_{S\max}(r, \phi) * w(\phi) = \\ \text{Phase}(r, \phi) = \text{Phase}_{\max}(r, \phi) * w(\phi)$$

5 mit

$$\text{Phase}_{\max}(r, \phi) = \sum_{j=2}^N k_j(\phi) * r^j \quad \text{oder} \quad \text{Phase}_{\max}(r, \phi) = \sum_{j=1}^N k_j(\phi) * r^{2*j},$$

wobei der Radius r zwischen 0 und $D/2$ und der Azimutwinkel ϕ der Apertur zwischen 0 und 2π sich stetig ändern, wodurch das optische Gitter einen spiralförmigen Phasenverlauf aufweist.

10

9. Linse nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass der Brechkraftanteil mit dem spiralförmigen Verlauf F_S sich durch eine additive oder subtraktive Brechungsindexverteilung $\Delta n(r, \phi)$ ergibt, wobei das Material der Linse (1) eine Brechungsindexverteilung aufweist, die sich von einem Grundwert n_2 ausgehend bis zu einem Maximalwert $\Delta n_{\max}$ nichtlinear radienabhängig ändert, wobei gilt

15

$F_G(r, \phi) = F_L + F_S(r, \phi) = F_L + \Delta n(r, \phi)$, und für den spiralförmigen Brechkraftverlauf gilt

$$F_S(r, \phi) = F_{S\max}(r) * w(\phi) = \Delta n(r, \phi) = \Delta n_{\max}(r) * w(\phi) \quad \text{mit}$$

20

$$\Delta n_{\max}(r) = \sum_{j=2}^N c_j * r^j \quad \text{oder} \quad \Delta n_{\max}(r) = \sum_{j=1}^N c_j * r^{2*j},$$

wobei der Radius r zwischen 0 und $D/2$ und der Azimutwinkel ϕ der Apertur zwischen 0 und 2π sich stetig ändern, wodurch eine spiralförmige Brechungsindexverteilung des Linsenmaterials beschrieben ist.

25

10. Linse nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass der Brechkraftanteil mit dem spiralförmigen Verlauf F_S sich durch eine

additive oder subtraktive Brechungsindexverteilung $\Delta n(r, \phi)$ ergibt, wobei das Material der Linse (1) eine Brechungsindexverteilung aufweist, die sich von einem Grundwert n_2 ausgehend bis zu einem Maximalwert $\Delta n_{\max}$ nichtlinear radienabhängig und vom Azimutwinkel ϕ der Apertur abhängig ändert, wobei gilt

$$F_G(r, \phi) = F_L + F_S(r, \phi) = F_L + \Delta n(r, \phi), \text{ und für den}$$

spiralförmigen Brechkraftverlauf gilt

$$F_S(r, \phi) = F_{S\max}(r, \phi) * w(\phi) = \Delta n(r, \phi) = \Delta n_{\max}(r, \phi) * w(\phi)$$

mit

$$\Delta n_{\max}(r, \phi) = \sum_{j=2}^N c_j(\phi) * r^j \text{ oder } \Delta n_{\max}(r, \phi) = \sum_{j=1}^N c_j(\phi) * r^{2*j},$$

wobei der Radius r zwischen 0 und $D/2$ und der Azimutwinkel ϕ der Apertur zwischen 0 und 2π sich stetig ändern, wodurch eine spiralförmige Brechungsindexverteilung des Linsenmaterials beschrieben ist.

11. Verfahren zur Herstellung einer Linse (1) mit einem erweiterten

Fokusbereich, welches folgende Schritte umfasst:

Schritt 1: Berechnung eines monofokalen Basissystems mit einer Grundbrechkraft F_L unter Festlegung der Parameter einer ersten optischen Fläche (2), der Parameter einer optischen Basisfläche (3) und einer Linsendicke d sowie einer Werkstoffart mit einem Brechungsindex und einer Abbe-Zahl;

Schritt 2: Aufaddieren oder Subtrahieren einer zusätzlichen Brechkraftverteilung $F_S(r, \phi)$, welche sich bezogen auf eine zur optischen Achse senkrecht stehende Ebene als Funktion der radialen Höhe r und des Azimutwinkels ϕ der Apertur zwischen einem Grundwert und einem Maximalwert $F_{S\max}(r)$ oder $F_{S\max}(r, \phi)$ nichtlinear radienabhängig ändert, womit die zusätzliche Brechkraft $F_S(r, \phi)$ spiralförmig veränderlich über die Basisfläche verteilt wird,

Schritt 3: Herstellung der spiralförmigen Brechkraftverteilung an der

Linse und/oder auf der Linse und/oder innerhalb der Linse.

12. Verfahren nach Anspruch 11, bei dem die zusätzliche

Brechkraftverteilung $F_S(r, \phi)$, welche sich zwischen dem Grundwert und dem Maximalwert ändert, durch eine Addition eines spiralförmigen Höhenprofils $z(r, \phi)$ auf eine berechnete Basisfläche (3) des Basissystems erzeugt wird, wobei die additive Höhe z eine Funktion des Radius r und des Azimutwinkels ϕ der Apertur ist, und wobei sich die additive Höhe z sich zwischen dem Wert Null und einem Maximalwert $z_{\max}(r)$ oder $z_{\max}(r, \phi)$ nichtlinear radienabhängig ändert und somit ein spiralförmiges Höhenprofil der zu fertigenden zweiten optischen Fläche (4) festliegt.

13. Verfahren nach Anspruch 11, bei dem die zusätzliche

Brechkraftverteilung $F_S(r, \phi)$, welche sich zwischen dem Grundwert und dem Maximalwert ändert, durch eine Addition der Wirkung eines spiralförmigen Gitterprofils Phase (r, ϕ) auf die gefertigte zweite optische Fläche (4) erzeugt wird, wobei die gefertigte zweite optische Fläche (4) der berechneten Basisfläche (3) entspricht und das Gitterprofil eine Funktion des Radius r und des Azimutwinkels ϕ der Apertur ist, und sich die Brechungswirkung zwischen dem Wert Null und dem Maximalwert $\text{Phase}_{\max}(r)$ oder $\text{Phase}_{\max}(r, \phi)$ nichtlinear radienabhängig ändert und somit das spiralförmige optische Gitter auf der gefertigten optischen Fläche (4) aufgebracht wird.

14. Verfahren nach Anspruch 11, bei dem die Brechkraftverteilung $F_S(r, \phi)$, welche sich zwischen dem Grundwert und dem Maximalwert $\Delta n_{\max}(r)$ oder $\Delta n_{\max}(r, \phi)$ nichtlinear radienabhängig ändert, durch einen spiralförmigen Brechungsindexverlauf $\Delta n(r, \phi)$ im Material der Linse hergestellt wird.

15. Verfahren nach einem der Ansprüche von 11 bis 14, bei dem die spiralförmige Brechkraftverteilung $F_s(r, \phi)$ an und/oder in eine Augenlinse, eine phake Intraokularlinse oder eine aphake Intraokularlinse aufgeprägt und/oder eingeprägt wird.

5

16. Objektiv mit einem erweiterten Fokusbereich, dadurch gekennzeichnet, dass im Strahlengang des Objektivs eine Linse (1) mit einem erweiterten Fokusbereich gemäß der Merkmale in einem oder mehreren der Ansprüche von 1 bis 14 als abbildendes Element angeordnet ist.

10

1/5

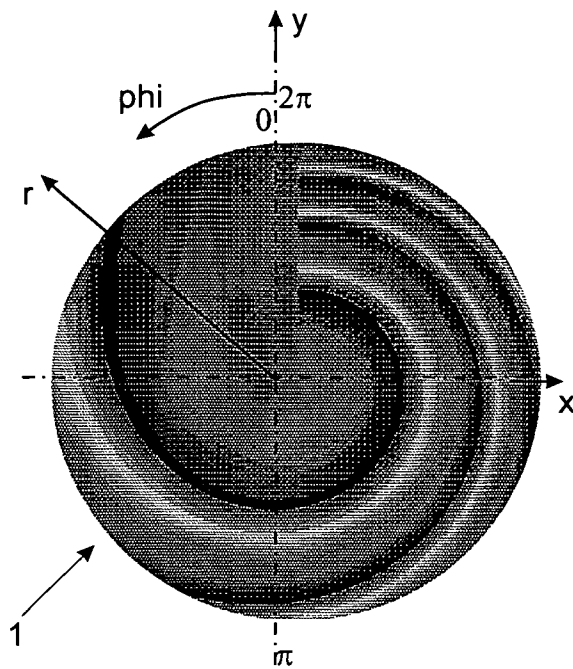


Figure 1

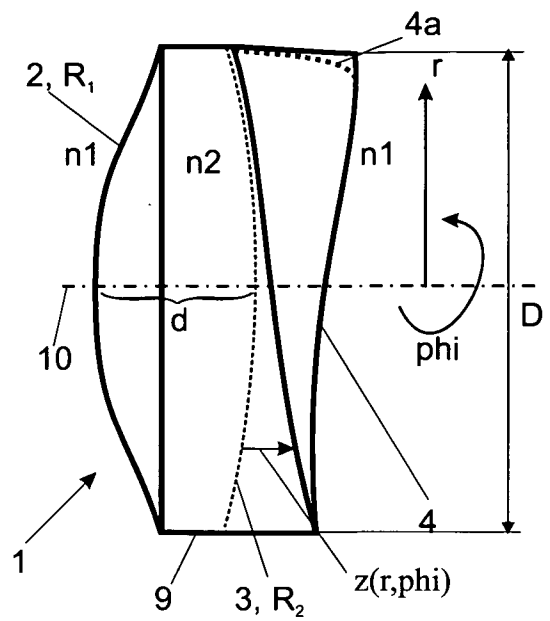


Figure 2

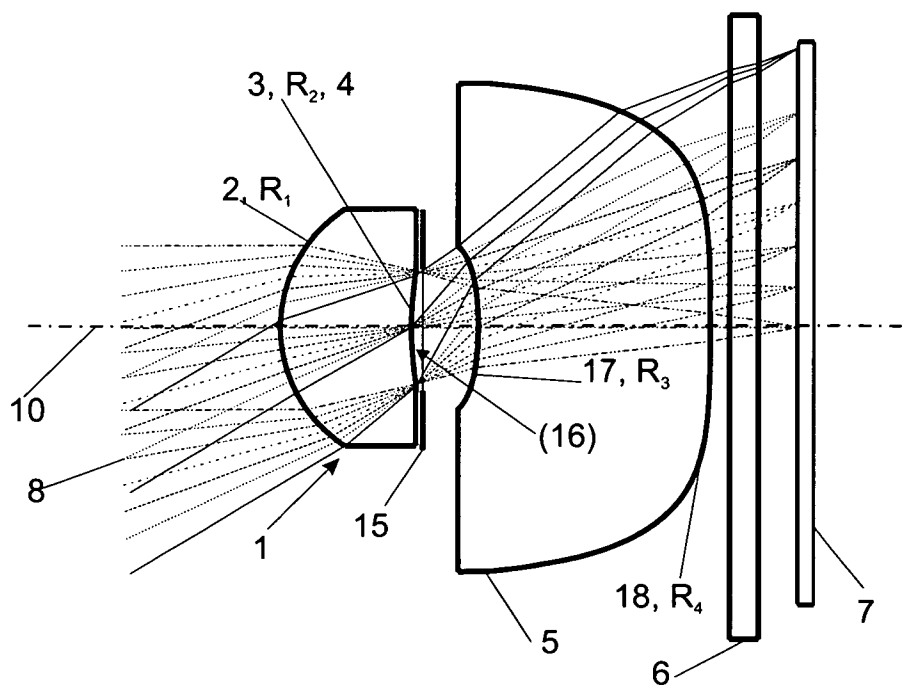
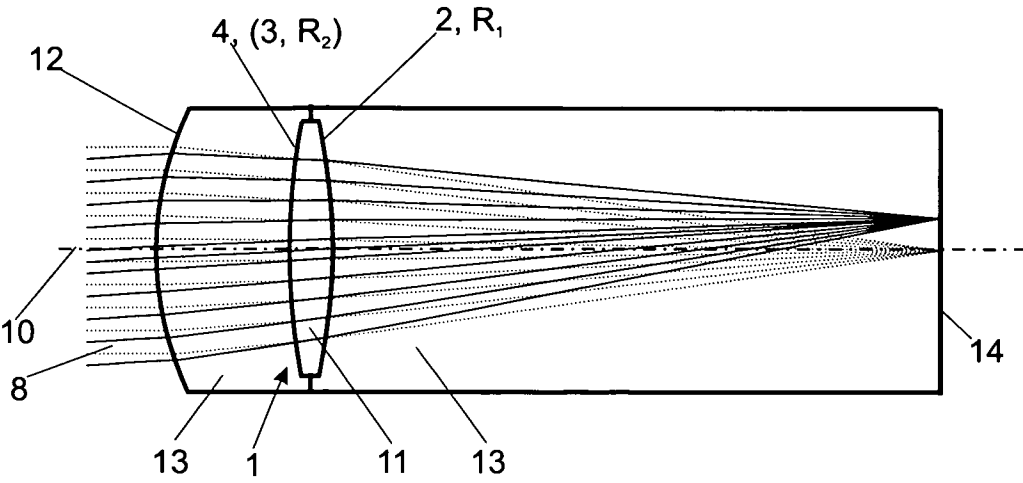
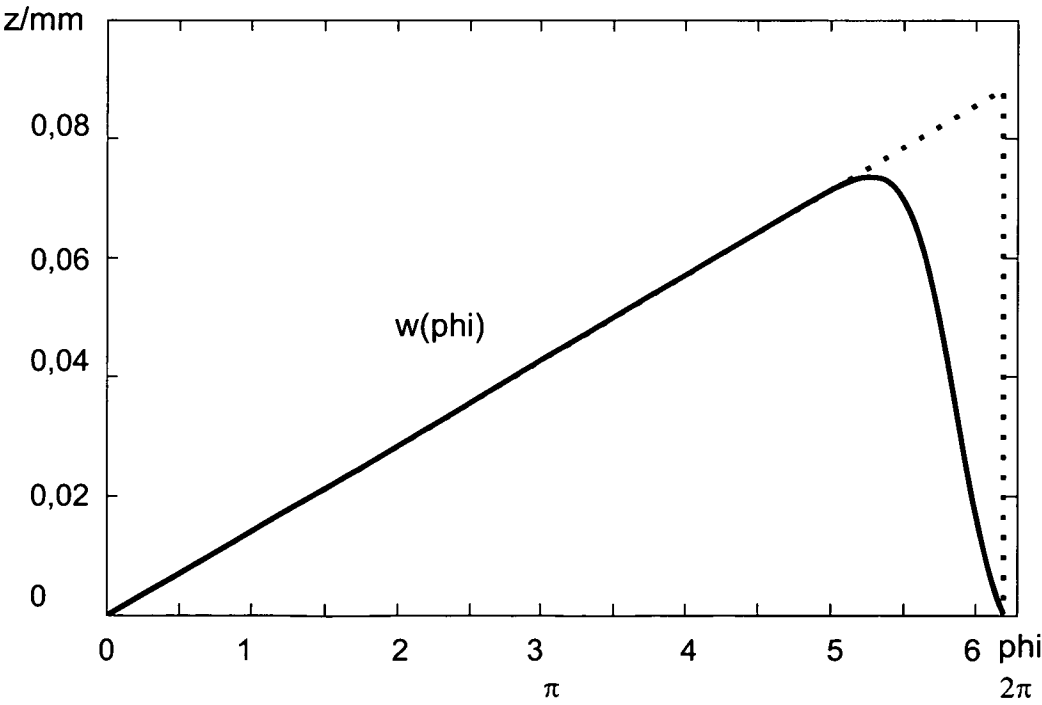


Figure 3

2/5

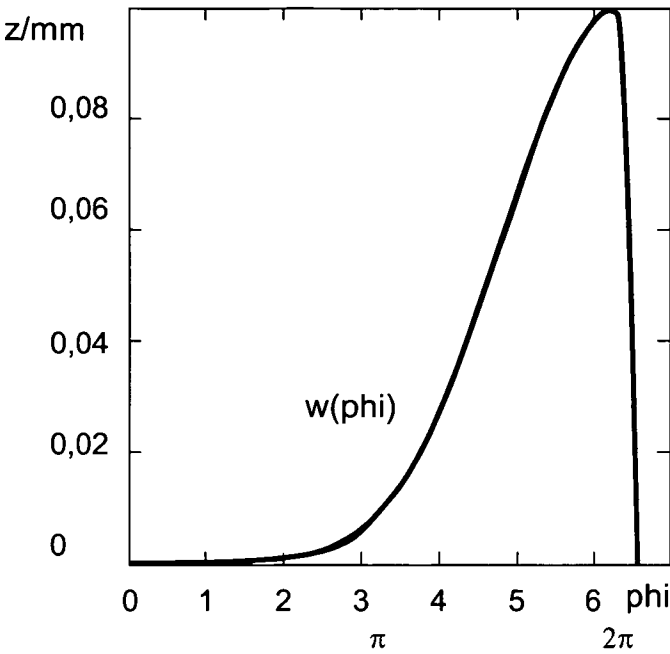


Figur 4

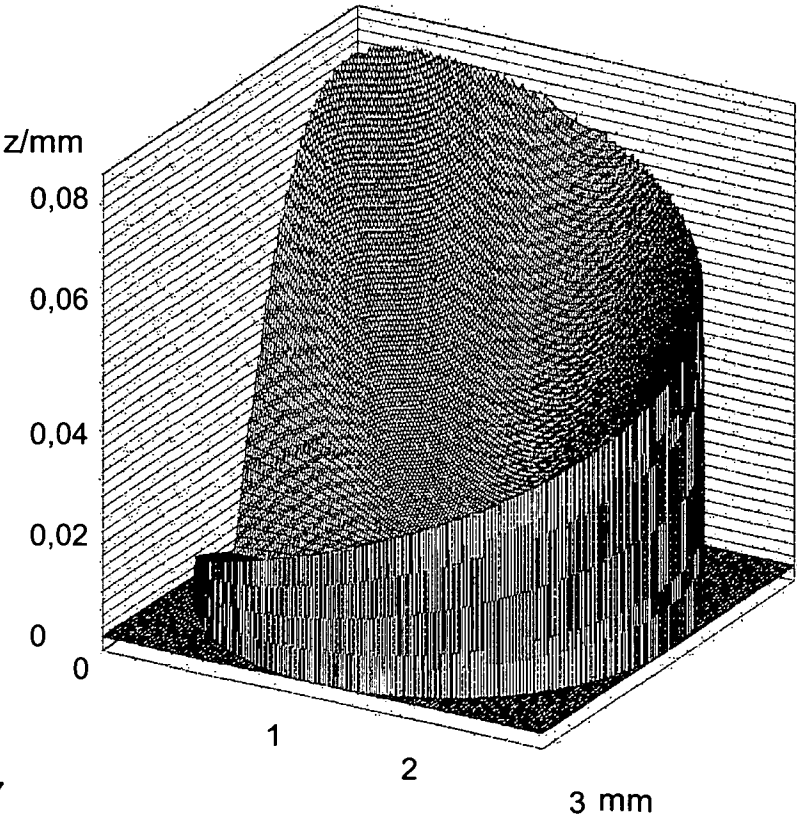


Figur 5

3/5

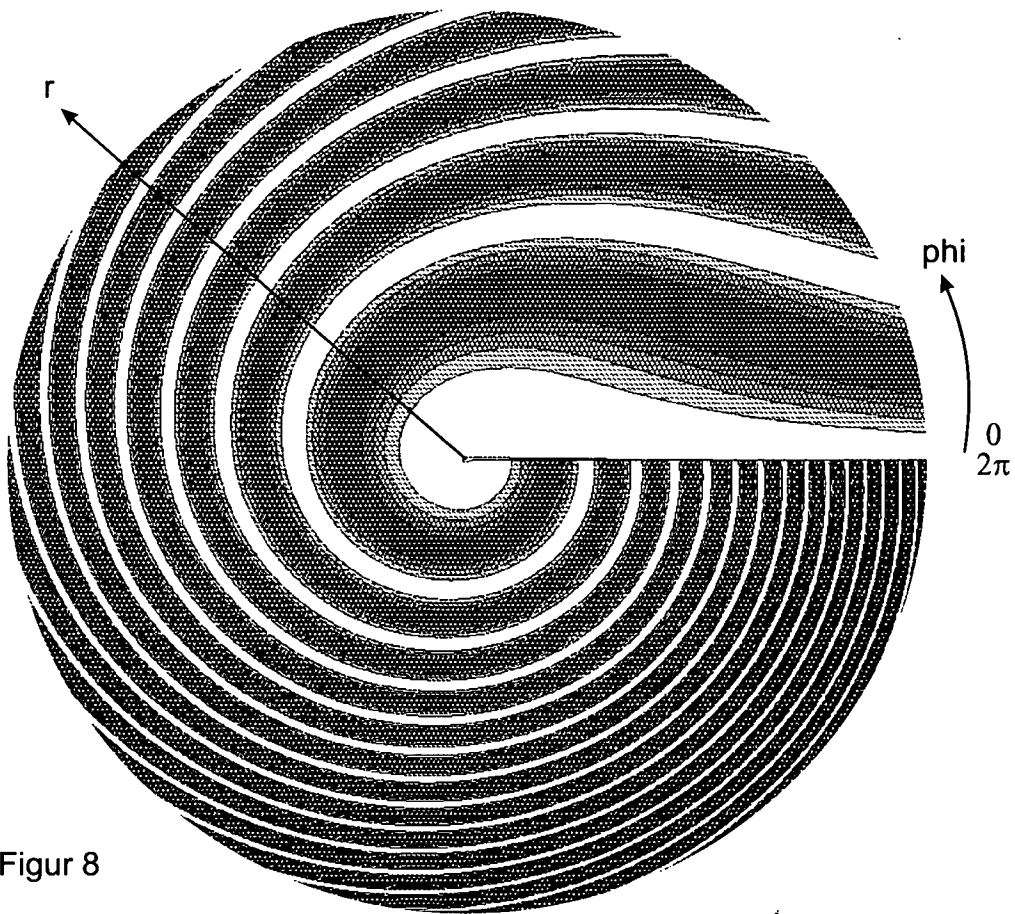


Figur 6

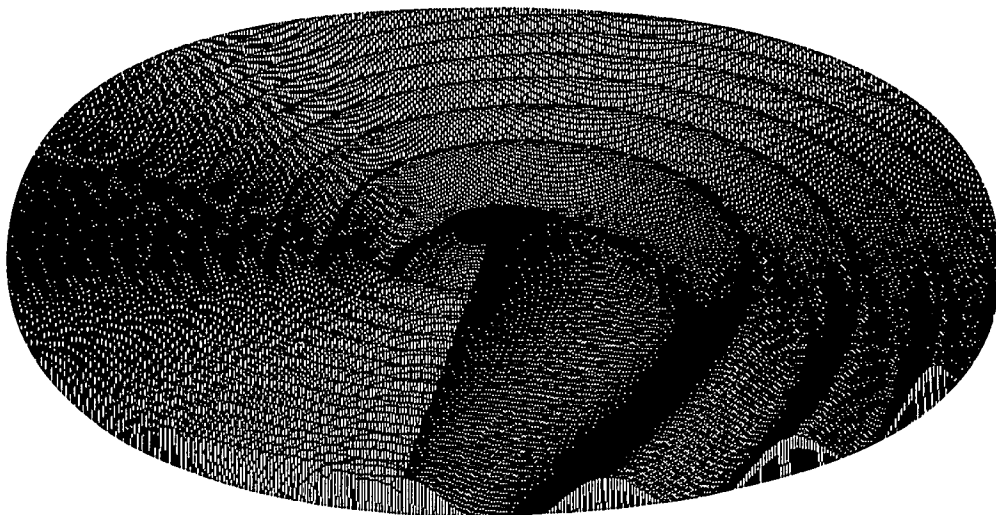


Figur 7

4/5

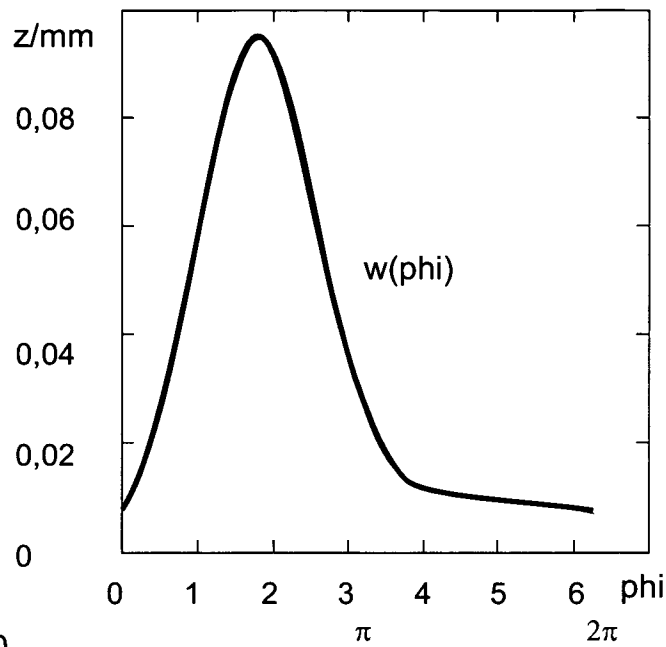


Figur 8

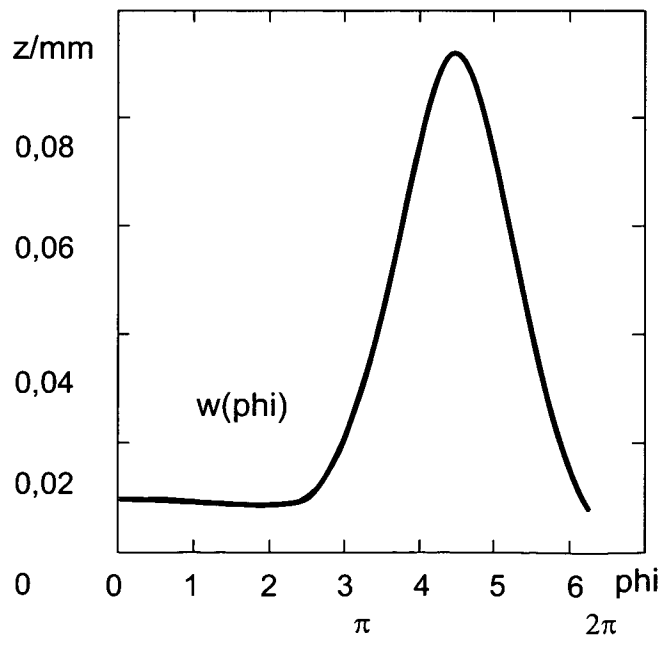


Figur 9

5/5



Figur 10



Figur 11

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2012/002098

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER INV. G02B27/00 G02C7/06 A61F2/16 ADD.		
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) G02B G02C A61F		
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, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	WO 2008/087486 A2 (TESSERA TECHNOLOGIES HUNGARY K [HU]; SHABTAY GAL [IL]; GOLDENBERG EFRA) 24 July 2008 (2008-07-24) figures paragraph [0035] - paragraph [0057]	1-16
X	WO 2008/087485 A2 (TESSERA TECHNOLOGIES HUNGARY K [HU]; SHABTAY GAL [IL]; GOLDENBERG EFRA) 24 July 2008 (2008-07-24) figures paragraph [0035] - paragraph [0061]	1-16
A	US 2003/117577 A1 (JONES LARRY G [US] ET AL) 26 June 2003 (2003-06-26) the whole document ----- -/-	1-16
☒ 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 17 August 2012		Date of mailing of the international search report 27/08/2012
Name and mailing address of the ISA/ European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Authorized officer Windecker, Robert

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2012/002098

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	PRASAD SUDHAKAR ET AL: "Pupil-phase optimization for extended-focus, aberration-corrected imaging systems", PROCEEDINGS OF SPIE, SPIE, US, vol. 5559, 1 January 2004 (2004-01-01), pages 335-345, XP002440110, ISSN: 0277-786X, DOI: 10.1117/12.560235 the whole document -----	1-16
A	SUDHAKAR PRASAD ET AL: "Engineering the pupil phase to improve image quality", PROCEEDINGS OF THE SPIE, SPIE, US, vol. 5108, 21 April 2003 (2003-04-21), pages 1-12, XP002632539, ISSN: 0277-786X, DOI: 10.1117/12.487572 [retrieved on 2004-02-03] the whole document -----	1-16

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2012/002098

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
WO 2008087486 A2	24-07-2008	EP 2104877 A2	30-09-2009
		US 2009122150 A1	14-05-2009
		WO 2008087486 A2	24-07-2008
WO 2008087485 A2	24-07-2008	EP 2069851 A2	17-06-2009
		US 2009122180 A1	14-05-2009
		WO 2008087485 A2	24-07-2008
US 2003117577 A1	26-06-2003	AR 037934 A1	22-12-2004
		AU 2002364132 A1	09-07-2003
		BR 0215049 A	03-11-2004
		CA 2471193 A1	03-07-2003
		CN 1608224 A	20-04-2005
		DE 60209558 T2	07-12-2006
		EP 1468324 A2	20-10-2004
		HK 1068962 A1	25-08-2006
		JP 2005514639 A	19-05-2005
		US 2003117577 A1	26-06-2003
		WO 03054616 A2	03-07-2003

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2012/002098

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
INV. G02B27/00 G02C7/06 A61F2/16
ADD.

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
G02B G02C A61F

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, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	WO 2008/087486 A2 (TESSERA TECHNOLOGIES HUNGARY K [HU]; SHABTAY GAL [IL]; GOLDENBERG EFRA) 24. Juli 2008 (2008-07-24) Abbildungen Absatz [0035] - Absatz [0057] -----	1-16
X	WO 2008/087485 A2 (TESSERA TECHNOLOGIES HUNGARY K [HU]; SHABTAY GAL [IL]; GOLDENBERG EFRA) 24. Juli 2008 (2008-07-24) Abbildungen Absatz [0035] - Absatz [0061] -----	1-16
A	US 2003/117577 A1 (JONES LARRY G [US] ET AL) 26. Juni 2003 (2003-06-26) das ganze Dokument ----- -/-	1-16

☒ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen ☒ 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	Absendedatum des internationalen Recherchenberichts
17. August 2012	27/08/2012
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 Windecker, Robert

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	PRASAD SUDHAKAR ET AL: "Pupil-phase optimization for extended-focus, aberration-corrected imaging systems", PROCEEDINGS OF SPIE, SPIE, US, Bd. 5559, 1. Januar 2004 (2004-01-01), Seiten 335-345, XP002440110, ISSN: 0277-786X, DOI: 10.1117/12.560235 das ganze Dokument -----	1-16
A	SUDHAKAR PRASAD ET AL: "Engineering the pupil phase to improve image quality", PROCEEDINGS OF THE SPIE, SPIE, US, Bd. 5108, 21. April 2003 (2003-04-21), Seiten 1-12, XP002632539, ISSN: 0277-786X, DOI: 10.1117/12.487572 [gefunden am 2004-02-03] das ganze Dokument -----	1-16

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2012/002098

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
WO 2008087486 A2	24-07-2008	EP 2104877 A2	30-09-2009
		US 2009122150 A1	14-05-2009
		WO 2008087486 A2	24-07-2008
WO 2008087485 A2	24-07-2008	EP 2069851 A2	17-06-2009
		US 2009122180 A1	14-05-2009
		WO 2008087485 A2	24-07-2008
US 2003117577 A1	26-06-2003	AR 037934 A1	22-12-2004
		AU 2002364132 A1	09-07-2003
		BR 0215049 A	03-11-2004
		CA 2471193 A1	03-07-2003
		CN 1608224 A	20-04-2005
		DE 60209558 T2	07-12-2006
		EP 1468324 A2	20-10-2004
		HK 1068962 A1	25-08-2006
		JP 2005514639 A	19-05-2005
		US 2003117577 A1	26-06-2003
		WO 03054616 A2	03-07-2003