



(10) **DE 10 2011 055 777 A1** 2013.05.29

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2011 055 777.6**

(22) Anmeldetag: **28.11.2011**

(43) Offenlegungstag: **29.05.2013**

(51) Int Cl.: **G02B 13/18 (2011.01)**

G02B 15/14 (2011.01)

(71) Anmelder:
Carl Zeiss AG, 73447, Oberkochen, DE

(74) Vertreter:
**PATERIS Theobald Elbel Fischer, Patentanwälte,
Partnerschaft, 10117, Berlin, DE**

(72) Erfinder:
**Pretorius, Marco, Dr., 73447, Oberkochen, DE;
Seeßelberg, Markus, Dr., 73431, Aalen, DE**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

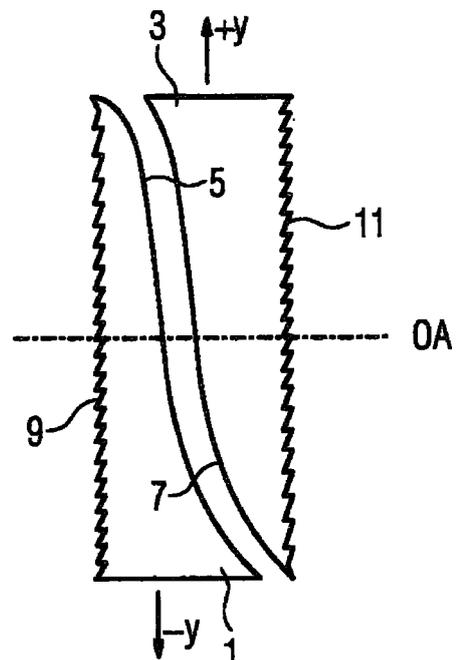
GB	2 474 921	A
US	7 841 715	B1
US	327 798	A
WO	2011/ 019 283	A1

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Optisches Gerät, optisches Element und Verfahren zu seiner Herstellung**

(57) Zusammenfassung: Es wird ein optisches Element mit wenigstens einer ersten optischen Komponente (1) und einer zweiten optischen Komponente (3), die entlang einer optischen Achse (OA) hintereinander angeordnet sind, zur Verfügung gestellt. Die erste optische Komponente (1) und die zweite optische Komponente (3) sind jeweils in einer Bewegungsrichtung senkrecht zur optischen Achse (OA) relativ zueinander bewegbar angeordnet und weisen jeweils mindestens eine refraktive Freiformfläche (5, 7) auf. Der refraktiven Freiformfläche (5) der ersten Komponente (1) ist eine erste diffraktive Struktur (9) zugeordnet, der refraktiven Freiformfläche (7) der zweiten Komponente (3) eine zweite diffraktive Struktur (11), wobei die zugeordneten diffraktiven Strukturen (9, 11) eine wellenlängenabhängige Wirkung der jeweiligen refraktiven Freiformfläche (5, 7) beeinflussen, insbesondere kompensieren.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein optisches Element mit wenigstens einer ersten optischen Komponente und einer zweiten optischen Komponente, die entlang einer optischen Achse hintereinander angeordnet sind sowie ein optisches Gerät mit einem derartigen optischen Element. Daneben betrifft die Erfindung ein Verfahren zur Herstellung eines optischen Elements.

[0002] Optische Elemente mit wenigstens einer ersten optischen Komponente und einer zweiten optischen Komponente, die entlang einer optischen Achse hintereinander angeordnet sind, jeweils eine refraktive Freiformfläche aufweisen und senkrecht zur optischen Achse gegeneinander verschiebbar sind, sind in der US 3,305,294 von Luiz W. Alvarez beschrieben. Durch laterales Verschieben der optischen Komponenten mit den Freiformflächen lässt sich die Brechkraftwirkung eines aus den beiden Komponenten aufgebauten optischen Elements variieren. Derartig optische Elemente werden daher auch Alvarez-Elemente oder Variolinsen genannt.

[0003] Daneben sind aus I. M. Barton et al. I. „Diffractive Alvarez Lens“ Optics Letters 2000 (25), Seiten 1–3 Elemente bekannt, die entlang einer optischen Achse hintereinander angeordnet sind, in Bezug auf die optische Achse lateral gegeneinander verschiebbar sind und diffraktive Flächen aufweisen. Die diffraktive Wirkung eines aus den beiden verschiebbaren Elementen gebildeten optischen Elements hängt dabei von der lateralen Stellung der beiden Elemente zueinander ab.

[0004] Variolinsen, die gemäß der Lehre aus US 3,305,294 bereit gestellt werden können, kommen für zahlreiche Anwendungen in Betracht. Beispiele hierfür sind das Durchführen schneller Z-Scans einer Fokusslage zur Erfassung dreidimensionaler Bildinformationen, die dreidimensionale Bildstabilisierung, wie sie bspw. in DE 10 2011 054 087.3 beschrieben ist oder die Kompensation einer Defokussierung, die beispielsweise im Bereich der Mikroskopie durch Variation einer Deckglasdicke oder durch Variation eines Brechungsindex auftreten kann. Daneben gibt es zahlreiche weitere Anwendungen, in denen Variolinsen zur Realisierung einer Zoomfunktionalität eingesetzt werden können, wie etwa Foto- oder Filmkameraobjektive, insbesondere flachbauende Varioobjektive in Kompaktkameras und Mobiltelefonen.

[0005] In nahezu allen praktisch relevanten Fällen ist es dabei höchst wünschenswert, die optische Abbildung über den Zoombereich hinweg weitgehend frei von Farbfehlern zu halten. Insbesondere bei flachbauenden Varioobjektiven ist jedoch keine praktikable Lehre bekannt, die es ermöglichen würde, über den gesamten Zoombereich hinweg eine konstante achromatische Korrektur zu erhalten.

[0006] Es ist daher Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein vorteilhaftes optisches Element mit wenigstens einer ersten optischen Komponente und einer zweiten optischen Komponente, die entlang einer optischen Achse hintereinander angeordnet sind und senkrecht zur optischen Achse relativ zueinander bewegt werden können, zur Verfügung zu stellen. Es ist eine weitere Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein vorteilhaftes optisches Gerät zur Verfügung zu stellen. Schließlich ist es eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren zum Herstellen eines derartigen optischen Elements zur Verfügung zu stellen.

[0007] Die erste Aufgabe wird durch ein optisches Element nach Anspruch 1 gelöst, die zweite Aufgabe durch ein optisches Gerät nach Anspruch 16 und die dritte Aufgabe durch ein Verfahren zur Konstruktion eines optischen Elements nach Anspruch 17. Die abhängigen Ansprüche enthalten vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung.

[0008] Ein erfindungsgemäßes optisches Element umfasst wenigstens eine erste optische Komponente und eine zweite optische Komponente, die entlang einer optischen Achse hintereinander angeordnet sind. Die erste optische Komponente und die zweite optische Komponente sind jeweils in einer Bewegungsrichtung senkrecht zur optischen Achse relativ zueinander bewegbar angeordnet und weisen jeweils mindestens eine refraktive Freiformfläche auf.

[0009] Durch laterales Verschieben (d. h. ein Verschieben senkrecht zur optischen Achse) der beiden optischen Komponenten relativ zueinander kann dank der Freiformflächen die Stärke der Brechkraft des optischen Elements verändert werden. Das Beeinflussen der Brechkraft durch laterales Verschieben ist in US 3,305,294 beschrieben, auf die in diesem Zusammenhang verwiesen wird. Ein derartiges optisches Element weist jedoch von der Einstellung der Stärke der Brechkraft abhängige, variable Farbfehler auf. Diese manifestieren sich bei Verwendung des optischen Elements in einem optischen System je nach seiner Anordnung im Strahlengang entweder vorwiegend als Farblängsfehler oder als Farbquerfehler, auch chromatische Vergrößerungsfehler

genannt. So treten bei pupillenaher Anordnung vorwiegend Farblängsfehler auf, bei feldnaher Anordnung vorwiegend Farbquerfehler.

[0010] Im erfindungsgemäßen optischen Element ist der refraktiven Freiformfläche der ersten Komponente daher eine erste diffraktive Struktur zugeordnet, der refraktiven Freiformfläche der zweiten Komponente eine zweite diffraktive Struktur. Die zugeordneten diffraktiven Strukturen beeinflussen eine wellenlängenabhängige Wirkung der jeweiligen refraktiven Freiformfläche. Die den refraktiven Freiformflächen zugeordneten diffraktiven Strukturen können insbesondere derart auf die jeweilige refraktive Freiformfläche abgestimmt sein, dass die Beeinflussung in einer Kompensation der wellenlängenabhängigen Wirkung der jeweiligen refraktiven Freiformfläche besteht.

[0011] Mit dem erfindungsgemäßen optischen Element lässt sich eine variabel einstellbare Wellenfrontmanipulation erreichen, deren Wirkung über einen ausgedehnten Wellenlängenbereich hinweg unabhängig von der Wellenlänge ist. Mit der erfindungsgemäßen Ausgestaltung des optischen Elements lassen sich daher insbesondere die oben beschriebenen Farbfehler weitgehend vermeiden. Da lediglich eine laterale Bewegung der ersten optischen Komponente und der zweiten optischen Komponente erfolgt, kann das optische Element eine flache Bauweise besitzen, d. h. eine geringe Ausdehnung entlang seiner optischen Achse.

[0012] Das erfindungsgemäße optische Element kann als eine Variolinse angesehen werden, wobei der Begriff „Variolinse“ auch Ausbildungen umfasst, bei denen nicht lediglich eine variable parabolische Phasenwirkung, d. h. eine variable optische Brechkraft, bereitgestellt wird, sondern auch eine gezielte Beeinflussung höherer Fehlerordnungen der Wellenfront, beispielsweise zur gezielten Beeinflussung von sphärischer Aberration, Koma oder Astigmatismus. Dabei wird die variable Wirkung des erfindungsgemäßen optischen Elements nahezu oder vollständig unabhängig von der Wellenlänge des benutzten Lichtes, also quasi achromatisch, bereit gestellt. In einem allgemeinen Sinne kann man daher vom erfindungsgemäßen optischen Element als einem variabel einstellbaren achromatischen Wellenfrontkompensationselement für vorgegebene Wellenaberrationen sprechen, wobei die parabolische Wellenfrontaberration, also die Defokussierung, lediglich ein möglicher Spezialfall ist. Das erfindungsgemäße optische Element kann insbesondere als eine geeignete Lösung für die eingangs beschriebene Problematik der Kompensation von Dicken- und Indexschwankungen bei der Mikroskopie mit hochaperturigen Objektiven zum Einsatz kommen.

[0013] Eine Anwendung für variabel einstellbare achromatische Wellenfrontkompensationselemente ist bspw. auch dort vorstellbar, wo eine Vario-Grundoptik, die etwa konventionell aus entlang der optischen Achse verschiebbaren Linsengruppen bestehen kann, über einen Verstellbereich veränderliche Werte des Bildfehlers aufweist. Dieser kann dann durch ein erfindungsgemäßes optisches Element über den gesamten Verstellbereich hinweg gezielt kompensiert werden. Möglich ist bspw. ein Einsatz als Kompensationsglied in einem photographischen Zoomobjektiv, in dem dann eine von der Zoomstellung abhängige Kompensation der auftretenden und mit konventionellen Mitteln nicht korrigierbaren Bildfehler stattfindet. In Anwendungen dieser Art ist eine achromatische Ausbildung der Kompensation in der Regel zumindest sehr vorteilhaft, wenn nicht gar notwendig.

[0014] Das erfindungsgemäße optische Element kann insbesondere so ausgebildet sein, dass

- die Form einer refraktiven Freiformfläche jeweils durch eine Polynomentwicklung beschrieben wird, die in endlich vielen bestimmten Polynomordnungen von Null verschiedene Entwicklungskoeffizienten aufweist,
- die einer refraktiven Freiformfläche zugehörige diffraktive Struktur durch eine Polynomentwicklung beschrieben wird, die in denselben Polynomordnungen wie die Polynomentwicklung der refraktiven Freiformfläche von Null verschiedene Entwicklungskoeffizienten aufweist, und
- diejenigen Entwicklungskoeffizienten einer eine refraktive Freiformfläche beschreibenden Polynomentwicklung und der die zugehörige diffraktive Struktur beschreibenden Polynomentwicklung, welche jeweils derselben Polynomordnung zugeordnet sind, in einen festen funktionalen Zusammenhang zueinander stehen.

[0015] Insbesondere kann hierbei ein gleicher funktionaler Zusammenhang für alle Polynomordnungen mit von Null verschiedenen Koeffizienten vorliegen. Der funktionale Zusammenhang kann insbesondere von dem in der jeweiligen optischen Komponente verwendeten Material, d. h. von dessen Dispersion, abhängen. Das Material kann insbesondere ein Glas oder ein Kunststoff sein.

[0016] Die jeweils derselben Polynomordnung zugeordneten Entwicklungskoeffizienten einer eine refraktive Freiformfläche beschreibenden Polynomentwicklung und der die zugehörige diffraktive Struktur beschreibenden

den Polynomentwicklung können vor allem in einem linearen funktionalen Zusammenhang stehen, wobei sie insbesondere über einen festen Proportionalitätsfaktor miteinander gekoppelt sein können.

[0017] Die Polynome der ersten und der zweiten Polynomentwicklung können jeweils von zwei Variablen abhängen, die verschiedene Richtungen senkrecht zur optischen Achse des optischen Elements repräsentieren. Dabei können

- die beiden Richtungen senkrecht aufeinander stehen, wobei die eine Richtung der Bewegungsrichtung der optischen Komponenten entspricht,
- die eine refraktive Freiformfläche beschreibende Polynomentwicklung und die die zugehörige diffraktive Struktur beschreibende Polynomentwicklung jeweils nur ungerade Polynomordnungen in derjenigen Variablen aufweisen, welche die Bewegungsrichtung der optischen Komponenten repräsentiert, und
- die eine refraktive Freiformfläche beschreibende Polynomentwicklung und die die zugehörige diffraktive Struktur beschreibende Polynomentwicklung jeweils nur gerade Polynomordnungen in derjenigen Variablen aufweisen, welche die zur Bewegungsrichtung der optischen Komponenten senkrechte Richtung repräsentiert.

[0018] Die refraktive Freiformfläche und die diffraktive Struktur einer optischen Komponente können zumindest teilweise auf entgegengesetzten Seiten der optischen Komponente angeordnet sein. Es besteht aber auch die Möglichkeit, dass eine refraktive Freiformfläche und eine diffraktive Struktur einer optischen Komponente jeweils zumindest teilweise auf derselben Seite der optischen Komponente angeordnet sind. Dabei können sich die beiden Strukturen grundsätzlich auch überlagern. Die beiden Strukturen können aber auch in getrennten Sektoren auf derselben Seite der optischen Komponente angeordnet sein. Dann sind auf beiden Seiten der optischen Komponente jeweils beide Strukturen in getrennten Sektoren vorhanden, wobei in einem Sektor auf der einen Seite der Komponente eine diffraktive Struktur angeordnet ist, wenn auf der anderen Seite in demselben Sektor eine refraktive Struktur angeordnet ist.

[0019] Die refraktiven Freiformflächen der optischen Komponenten können im erfindungsgemäßen optischen Element einander zugewandt oder voneinander abgewandt sein.

[0020] Die erste optische Komponente kann aus einem ersten Material mit einer ersten Brechkraft und wenigstens einem zweiten Material mit einer zweiten Brechkraft zusammengesetzt sein. Zusätzlich oder alternativ kann die zweite optische Komponente aus einem ersten Material mit einer ersten Brechkraft und wenigstens einem zweiten Material mit einer zweiten Brechkraft zusammengesetzt sein. Die einer refraktiven Freiformfläche zugeordnete diffraktive Struktur ist dann an einer Grenzfläche zwischen dem ersten Material und dem zweiten Material angeordnet. Elemente, die aus einem ersten und einem zweiten Material mit unterschiedlichen Brechkräften zusammengesetzt sind und die an der Grenzfläche zwischen den beiden Materialien eine diffraktive Struktur besitzen werden auch effizienz-achromatisierte diffraktive optische Elemente genannt und sind in DE 10 2007 051 887 A1 beschrieben. Auf diese Druckschrift wird daher im Hinblick auf die Eigenschaften derartiger effizienz-achromatisierter diffraktiver optischer Elemente sowie deren Konstruktion verwiesen. Wenn die optischen Komponenten des erfindungsgemäßen optischen Elements als effizienz-achromatisierte diffraktive optische Komponenten ausgebildet sind, lassen sich optische Elemente bereitstellen, bei denen die Beugungseffizienz der diffraktiven Struktur über einen weiten Wellenlängenbereich nur geringfügig variiert und Falschlicht in unerwünschten Beugungsordnungen unterdrückt wird. Dadurch sind optische Elemente realisierbar, in denen die Beugungseffizienz über einen Wellenlängenbereich von mindestens 200 nm, insbesondere mindestens 300 nm nicht mehr als 5% variiert und insbesondere über einen Wellenlängenbereich von mindestens 200 nm nicht mehr als 1% variiert. Beispielsweise können optische Elemente für den sichtbaren Spektralbereich realisiert werden, in denen die Beugungseffizienz im Bereich von 410 nm bis 710 nm nicht mehr als 5% variiert und im Bereich von 425 nm bis 650 nm nicht mehr als 1% variiert.

[0021] Im Rahmen der Erfindung können die erste optische Komponente und die zweite optische Komponente auch jeweils zwei refraktive Freiformflächen aufweisen, die an entgegengesetzten Seiten der jeweiligen optischen Komponente angeordnet sind. Die zugehörige diffraktive Struktur kann dann wenigstens einer Freiformfläche überlagert sein oder in einer zusätzlichen weiteren optischen Komponente angeordnet sein, so dass dann wenigstens drei optische Komponenten vorhanden sind, wobei die optischen Komponenten mit den Freiformflächen und die optischen Komponenten mit der zugehörigen diffraktiven Struktur synchron zueinander senkrecht zur optischen Achse bewegt werden. Die synchrone Bewegung kann bspw. durch eine geeignete Steuerung oder durch eine starre Kopplung der optischen Komponenten realisiert werden. Wenn eine optische Komponente wenigstens aus einem ersten Material mit einer ersten Brechkraft und einem zweiten Material mit einer zweiten Brechkraft zusammengesetzt ist und die einer refraktiven Freiformfläche zugeordnete diffraktive Struktur an der Grenzfläche zwischen dem ersten Material und dem zweiten Material angeordnet ist, bestehet

ebenfalls die Möglichkeit, beide Seiten der jeweiligen optischen Komponente mit einer refraktiven Freiformfläche zu versehen.

[0022] In einer besonderen Ausgestaltung des erfindungsgemäßen optischen Elements umfasst dieses wenigstens zwei optische Komponenten aus Materialien mit unterschiedlichen Brechzahlen, wobei die unterschiedlichen Brechzahlen so gewählt sind, dass primäre Farbfehler kompensiert werden. Die optischen Komponenten weisen diffraktive Strukturen auf, die derart ausgebildet sind, dass sie sekundäre Farbfehler ausgleichen.

[0023] Es ist aus der elementaren Optik bekannt, dass sich sekundäre Farbfehler auch durch mehrere Linsen nur dann korrigieren lassen, wenn mindestens eine Linse bspw. aus einem Glas mit anormaler Teildispersion gebildet ist. Derartige Gläser mit anormaler Teildispersion werden je nach Vorzeichen der Abweichung der Teildispersion von der Normalgeraden als Langkron- oder Kurzflintgläser bezeichnet und weisen zahlreiche Nachteile und unerwünschte Eigenschaften auf. Insbesondere sind sie vergleichsweise teuer und nur erschwert zu bearbeiten, da sie chemisch empfindlich gegen alkalische oder säurehaltige Schleif- und Poliermittel sind. Bei optischen Systemen, die erfindungsgemäße optische Elemente enthalten, tritt das analoge Problem wie bei festen Linsen auf: Während sich durch Kombination optischer Komponenten aus bspw. Normalglasarten das primäre Spektrum der Farbfehler prinzipiell korrigieren lässt, verbleibt auch im Falle einer Kombination quasi beliebig vieler aus Normalgläsern gebildeter optischer Komponenten stets ein sekundäres Spektrum der Farbfehler, das sich über den Einstellbereich des optischen Elements hinweg ändern kann.

[0024] Die beschriebene besondere Ausgestaltung des erfindungsgemäßen optischen Elements ermöglicht eine Lösung, die eine Korrektur auch des sekundären Spektrums ermöglicht und trotzdem nur Normalgläser benötigt, also Gläser, die auf der Normalgeraden im Abbe-Diagramm liegen. Die primären Farbfehler des optischen Elements werden hierbei durch Kombination von optischen Komponenten aus unterschiedlichen Materialien, bspw. Glasarten, korrigiert – ungeachtet der damit verbundenen Nachteile für Baugröße und Gewicht. Die diffraktive Struktur, die gemäß Sweatt-Modell quasi eine weitere Linse mit negativer Abbezahl darstellt, findet dagegen zur Korrektur des sekundären Spektrums Verwendung.

[0025] In einer besonderen Ausgestaltung des erfindungsgemäßen optischen Elements sind die optischen Komponenten aus einem Material hergestellt, das im tiefen UV oder im mittleren Infrarot oder im fernen Infrarot eine hohe Transmission aufweist. Dadurch wird eine Achromatisierung auch für erfindungsgemäße optische Elemente möglich, die in entfernten Wellenlängenbereichen wie dem tiefen UV oder dem mittleren oder fernem Infrarotbereich eingesetzt werden sollen, wo nur wenige Materialien ausreichend guter Transmission zur Verfügung stehen. Beispielsweise kommen im tiefen UV hauptsächlich Quarz oder bestimmte kristalline Materialien wie Calcium- oder Bariumfluorid in Betracht, im Infrarotbereich Halbleitermaterialien wie Silizium oder Germanium. In allen Fällen ist es dann mittels der diffraktiven Strukturen möglich, bei Verwendung von nur einer einzigen Materialart eine nahezu vollständige Korrektur der Wellenlängenabhängigkeit der Brechkraftwirkung zu erzielen. Die Erfindung ermöglicht dann einen praktischen Einsatz in diesen Wellenlängenbereichen.

[0026] Gemäß einem zweiten Aspekt der Erfindung wird ein optisches Gerät zur Verfügung gestellt. Das erfindungsgemäße optische Gerät kann bspw. eine Kamera, ein Mikroskop, insbesondere Operationsmikroskop, ein Teleskop, eine optische Messeinrichtung, etc sein. Es ist mit wenigstens einem erfindungsgemäßen optischen Element ausgestattet. In dem erfindungsgemäßen optischen Gerät können daher die mit Bezug auf das erfindungsgemäße optische Element beschriebenen Wirkungen und Vorteile erzielt werden.

[0027] Gemäß einem dritten Aspekt der Erfindung wird ein Verfahren zur Konstruktion eines erfindungsgemäßen optischen Elementes zur Verfügung gestellt. Die Form einer refraktiven Freiformfläche wird dabei jeweils durch eine Polynomentwicklung beschrieben, die in endlich vielen bestimmten Polynomordnungen von Null verschiedene Entwicklungskoeffizienten aufweist.

[0028] In dem erfindungsgemäßen Verfahren wird jeder refraktiven Freiformfläche wenigstens eine diffraktive Struktur zugeordnet, die durch eine Polynomentwicklung beschrieben wird und die in denselben Polynomordnungen wie die Polynomentwicklung der refraktiven Freiformfläche von Null verschiedene Entwicklungskoeffizienten aufweist. Die Entwicklungskoeffizienten der Polynomentwicklung der diffraktiven Struktur werden aus den Entwicklungskoeffizienten der Polynomentwicklung der refraktiven Freiformfläche ermittelt. Dies geschieht, indem für jede Polynomordnung, in der die Polynomentwicklung der refraktiven Freiformfläche von Null verschiedene Entwicklungskoeffizienten aufweist, der jeweilige Entwicklungskoeffizient der Polynomentwicklung für die diffraktive Struktur anhand eines vorgegeben funktionalen Zusammenhangs aus dem entsprechenden Entwicklungskoeffizienten der Polynomentwicklung für die refraktive Freiformfläche ermittelt wird. Als vor-

gegebener funktionaler Zusammenhang kann ein linearer funktionaler Zusammenhang zur Anwendung kommen. Insbesondere können die Entwicklungskoeffizienten der Polynomentwicklung für die diffraktive Struktur mit den Entwicklungskoeffizienten der Polynomentwicklung der refraktiven Freiformfläche über einen festen Proportionalitätsfaktor miteinander gekoppelt sein.

[0029] Der funktionale Zusammenhang, also bspw. der Proportionalitätsfaktor, wenn die Entwicklungskoeffizienten der Polynomentwicklung für die diffraktive Struktur mit den Entwicklungskoeffizienten der Polynomentwicklung der refraktiven Freiformfläche über einen festen Proportionalitätsfaktor miteinander gekoppelt sind, kann insbesondere von dem in der jeweiligen optischen Komponente verwendeten Material abhängen, also im Hinblick auf das verwendete Material gewählt sein. Das Material kann bspw. eine Glas- oder Kunststoffart sein. Unterschiedliche Materialien, insbesondere unterschiedliche Gläser bzw. Kunststoffe, weisen unterschiedliche Dispersionen auf, so dass die durch eine refraktive Freiformfläche induzierten Farbfehler von der verwendeten Glas- bzw. Kunststoffart abhängen. Durch Berücksichtigen der verwendeten Glas- oder Kunststoffart im Proportionalitätsfaktor kann das optische Element daher für die jeweilige Glasart optimiert werden.

[0030] Mit Hilfe des erfindungsgemäßen Verfahrens lassen sich gezielt erfindungsgemäße optische Elemente mit bestimmten Eigenschaften konstruieren.

[0031] Weitere Merkmale, Eigenschaften und Vorteile der vorliegenden Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die beiliegenden Figuren.

[0032] [Fig. 1](#) zeigt ein erstes Ausführungsbeispiel für ein erfindungsgemäßes optisches Element in einer schematischen Darstellung.

[0033] [Fig. 2](#) zeigt eine alternative Ausführungsvariante für das erfindungsgemäße optische Element in einer schematischen Darstellung.

[0034] [Fig. 3](#) zeigt die Anordnung von refraktiven und diffraktiven Sektoren auf einem erfindungsgemäßen optischen Element gemäß einer dritten Ausführungsvariante.

[0035] [Fig. 5](#) zeigt eine vierte Ausführungsvariante für das erfindungsgemäße optische Element in einer schematischen Darstellung.

[0036] [Fig. 6](#) zeigt ein Detail aus [Fig. 5](#).

[0037] [Fig. 7](#) zeigt die Beugungseffizienz der in den [Fig. 5](#) und [Fig. 6](#) dargestellten Ausführungsvariante.

[0038] [Fig. 8](#) und [Fig. 9](#) zeigen eine festbrennweitige Optik und die auftretenden Farbfehler.

[0039] [Fig. 10](#) bis [Fig. 14](#) zeigen eine Optik mit einem optischen Element, das zwei lateral zueinander verschiebbare Komponenten mit Freiformflächen aufweist, in verschiedenen Stellungen.

[0040] [Fig. 15](#) bis [Fig. 19](#) zeigen die zu den in den [Fig. 10](#) bis [Fig. 14](#) dargestellten Positionen der verschiebbaren Komponenten zugehörigen Farbfehler bei Verwendung von Komponenten ohne diffraktive Strukturen.

[0041] [Fig. 20](#) zeigt die Phasenfunktion einer diffraktiven Fläche, anhand derer die Farbfehler des in den [Fig. 9](#) bis [Fig. 18](#) beschriebenen optischen Elements ausgeglichen werden können.

[0042] [Fig. 21](#) zeigt den Furchenverlauf der diffraktiven Fläche bei einer Draufsicht auf die diffraktive Fläche eines erfindungsgemäßen optischen Elements.

[0043] [Fig. 22](#) zeigt einen Schnitt durch das erfindungsgemäße optische Element in der yz-Ebene, in dem man die diffraktive Struktur erkennt.

[0044] [Fig. 23](#) zeigt die Beugungseffizienz der in den [Fig. 20](#) bis [Fig. 22](#) dargestellten diffraktiven Struktur.

[0045] [Fig. 24](#) bis [Fig. 28](#) zeigen die zu den in den [Fig. 10](#) bis [Fig. 14](#) dargestellten Positionen der verschiebbaren Komponenten zugehörigen Farbfehler bei Verwendung von Komponenten mit diffraktiven Strukturen.

[0046] Ein erstes Ausführungsbeispiel für ein erfindungsgemäßes optisches Element ist in [Fig. 1](#) dargestellt. Das optische Element umfasst zwei optische Komponenten **1**, **3**, die entlang einer optischen Achse OA hintereinander angeordnet sind und lateral, d. h. senkrecht zur optischen Achse OA, gegeneinander verschiebbar angeordnet sind, wie in der Figur durch die Pfeile in $-y$ und $+y$ -Richtung angedeutet ist. Jedes der beiden optischen Elemente **1**, **3** weist eine refraktive Freiformfläche **5**, **7** sowie eine zugeordnete diffraktive Fläche **9**, **11** auf. Die refraktive Freiformfläche und die diffraktive Fläche eines optischen Elements **1**, **3** befinden sich im dargestellten Ausführungsbeispiel jeweils an entgegengesetzten Flächen der entsprechenden Komponente **1**, **3**.

[0047] Durch laterales Verschieben der optischen Komponenten **1**, **3** gegeneinander lässt sich die Brechkraftwirkung des optischen Elements variieren. Die Ausgestaltung der Freiformflächen **5**, **7**, mit der sich die variable Brechkraftwirkung erzielen lässt, ist in US 3,305,294 beschrieben. Auf dieses Dokument wird hinsichtlich der Konstruktion der Freiformflächen verwiesen.

[0048] Die diffraktiven Flächen der optischen Komponenten **1**, **3** dienen dazu, Farbfehler zu korrigieren, die ohne die diffraktiven Flächen **9**, **11** beim Einstellen der Brechkraft durch laterales Verschieben der optischen Komponenten **1**, **3** gegeneinander entstehen würden. Die Konstruktion der diffraktiven Flächen **9**, **11** wird später noch beschrieben.

[0049] [Fig. 2](#) zeigt ein zweites Ausführungsbeispiel für ein erfindungsgemäßes optisches Element. Die Figur zeigt lediglich eine der beiden Komponenten des optischen Elements. Im Unterschied zu den in [Fig. 1](#) dargestellten optischen Komponenten sind in der zweiten Ausführungsvariante die refraktive Freiformfläche **5** und die diffraktive Fläche **9** auf derselben Seite des optischen Elements **1** ausgebildet. Die zweite optische Komponente des optischen Elements der zweiten Ausführungsvariante kann bspw. wie die zweite Komponente **3** aus der ersten Ausführungsvariante ausgebildet sein, d. h. mit der diffraktiven Fläche und der refraktiven Fläche auf entgegengesetzten Seiten, oder wie die in [Fig. 2](#) dargestellte optische Komponente **1** der zweiten Ausführungsvariante, d. h. mit der refraktiven Freiformfläche und der diffraktiven Fläche auf derselben Seite der Komponente.

[0050] Ein drittes Ausführungsbeispiel wird nachfolgend mit Bezug auf die [Fig. 3](#) und [Fig. 4](#) beschrieben. Die [Fig. 3](#) und [Fig. 4](#) zeigen stark schematisiert eine Draufsicht auf die entgegengesetzten Flächen einer optischen Komponente **1** eines erfindungsgemäßen Elements. Jede der beiden Flächen weist Sektoren A und B auf, wobei jeder Sektor A einen Ausschnitt der refraktiven Freiformfläche repräsentiert und jeder Sektor B einen Ausschnitt aus der diffraktiven Fläche. Wenn in einem Sektor auf der einen Seite der optischen Komponente ein Ausschnitt einer diffraktiven Freiformfläche vorhanden ist, bspw. in Sektor A, weist die Fläche auf der anderen Seite der Komponente in demselben Sektor eine refraktive Fläche auf und umgekehrt. Erst durch ein Zusammenwirken der beiden Seiten der optischen Komponente entsteht eine vollständige refraktive Freiformfläche sowie eine vollständige diffraktive Fläche.

[0051] Ein viertes Ausführungsbeispiel für das erfindungsgemäße optische Element ist in [Fig. 5](#) dargestellt. In [Fig. 5](#) ist die erste optische Komponente **1** aus einem ersten Material **13** und einem zweiten Material **15** zusammengesetzt. Die diffraktive Struktur **9** befindet sich an der Grenzfläche zwischen dem ersten Material **13** und dem zweiten Material **15**. Entsprechend ist die zweite optische Komponente **3** ebenfalls aus einem ersten Material **17** und einem zweiten Material **19** zusammengesetzt, wobei sich die diffraktive Struktur **11** an der Grenzfläche zwischen dem ersten Material **17** und dem zweiten Material **19** befindet. Ein vergrößerter Ausschnitt (Ausschnitt IV in [Fig. 5](#)) aus der Grenzfläche zwischen dem ersten Material **13** und dem zweiten Material **15** der ersten optischen Komponente ist in [Fig. 6](#) stark schematisiert dargestellt. Das zweite Material **15**, **19** ist hierbei typischerweise jeweils ein optischer Kitt in Form eines ausgehärteten optischen Zweikomponentenklebstoffes. Mittels des Kittes ist zudem eine planparallele Platte **14**, **18** auf die jeweilige diffraktive optische Struktur **9**, **11** der optischen Komponenten **1**, **3** aufgebracht.

[0052] Die Beugung an diffraktiven Strukturen, die aus einer Oberflächenstruktur zwischen Luft und einem anderen optischen Medium wie Glas oder Kunststoff bestehen, kann neben Licht in der erwünschten Beugungsordnung auch Falschlicht in anderen Beugungsordnungen erzeugen. Die Ursache hierfür liegt darin, dass eine solche diffraktive Struktur nur für eine Wellenlänge λ_0 eine Beugungseffizienz $\eta(\lambda_0)$ nahe 100% besitzt; für Wellenlängen $\lambda \neq \lambda_0$ sinkt die Beugungseffizienz $\eta(\lambda)$ auf deutlich unter 100% ab, wie bspw. in: B. H. Kleeemann, et al.: „Design concepts for broadband high-efficiency DOEs“, J. Europ. Opt. Soc. Rap. Public. 08015 Vol. 3 (2008) beschrieben ist. Gemäß dieser Veröffentlichung ist es möglich, an Stelle konventioneller diffraktiver Strukturen effizienz-achromatisierte diffraktive Strukturen (EA-DOEs) herzustellen, die über eine hohe Beugungseffizienz in der gewünschten Beugungsordnung über einen breiten spektralen Bereich verfügen und Beugungseffizienzen von praktisch Null für alle anderen (unerwünschten) Beugungsordnungen aufweisen. In

Abschnitt 2.2 der gleichen Veröffentlichung wird beschrieben, welche Brechzahlverläufe $n_1(\lambda)$ und $n_2(\lambda)$ zwei Materialien 1 und 2 besitzen müssen, damit sie zum Bau einer effizienz-achromatisierten diffraktiven Struktur Verwendung finden können.

[0053] Die in [Fig. 6](#) dargestellte Anordnung der diffraktiven Struktur **9** an der Grenzfläche zwischen dem ersten Material **13** und dem zweiten Material **15** stellt eine solche effizienz-achromatisierte diffraktive Struktur dar, die eine Unterdrückung des Falschlichts in den unerwünschten Beugungsordnungen ermöglicht. Geeignete Materialkombinationen, die die erforderliche Relation erfüllen, finden sich beispielsweise in DE 10 2007 051 887. Die genannte Veröffentlichung zeigt auch noch weitere Möglichkeiten zur Herstellung von effizienz-achromatisierten diffraktiven Strukturen auf.

[0054] Durch geeignetes Anpassen des ersten Materials und des zweiten Materials lässt sich also eine von der Wellenlänge weitestgehend unabhängige Beugungseffizienz über einen weiten Spektralbereich erzielen, wie sie in [Fig. 7](#) dargestellt ist. Diese Figur zeigt beispielhaft die Beugungseffizienz als Funktion der Wellenlänge im Bereich von 400 nm bis 700 nm für eine diffraktive Struktur an der Grenzfläche zwischen einem Glas der Sorte N-LAF21 und einem ausgehärteten optischen Zweikomponentenklebstoff, der als erste Komponente Bis-[4-(2,3-epoxypropylthio)-phenyl]-sulfid mit Diamino-m-Xylol als Härter umfasst, und als zweite Komponente 3-Glycidylxypropyltrimethoxysilan umfasst. Wie [Fig. 7](#) zu entnehmen ist, variiert die Beugungseffizienz als Funktion der Wellenlänge über einen Wellenlängenbereich von 300 nm (von ca. 410 nm bis > 700 nm nicht mehr als 5% und im Bereich von ca. 425 nm bis 650 nm nicht mehr als 1%. Ähnliche Ergebnisse lassen sich auch mit anderen Materialkombinationen erzielen. Im Hinblick auf die anderen Materialkombinationen sowie die zugehörigen Figuren zu Beugungseffizienzen wird auf die DE 10 2007 051 887 A1 verwiesen.

[0055] Das mit Bezug auf die [Fig. 5](#) bis [Fig. 7](#) beschriebene optische Element eignet sich insbesondere für den Einsatz in breitbandigen Optiksyste men, da in derartigen Systemen optische Elemente, wie sie mit Bezug auf die [Fig. 1](#) bis [Fig. 4](#) beschrieben wurden, Streulicht in unerwünschten Beugungsordnungen mit sich bringen können.

[0056] Die in den einzelnen Ausführungsvarianten beschriebenen optischen Komponenten können zum Bilden eines erfindungsgemäßen optischen Elements auch miteinander kombiniert werden, wie dies bereits mit Bezug auf die zweite Ausführungsvariante beispielhaft beschrieben wurde.

[0057] Nachfolgend werden die Grundlagen des Verfahrens zur Konstruktion eines erfindungsgemäßen optischen Elementes beschrieben, bevor sie an einem konkreten Beispiel näher erläutert werden.

[0058] Bevorzugt kann die Freiformfläche bei expliziter Flächendarstellung in der Form $z(x, y)$ durch ein Polynom beschrieben werden, das in einer zur Bewegungsrichtung der Elemente orthogonalen Richtung x nur gerade Potenzen von x aufweist und in einer zur Bewegungsrichtung parallelen Richtung nur ungerade Potenzen von y aufweist. Gleiches gilt für die Phasenfläche des diffraktiven Elements.

[0059] Die Freiformfläche $z(x, y)$ kann zunächst allgemein beispielsweise durch eine Polynomentwicklung der Form

$$z = \sum_{m,n=1}^{\infty} C_{m,n} x^m y^n \quad (1)$$

beschrieben werden, wobei $C_{m,n}$ den Entwicklungskoeffizienten der Polynomentwicklung der Freiformfläche in der Ordnung m bzgl. der x -Richtung und der Ordnung n bzgl. der y -Richtung darstellt. Hierbei bezeichnen x , y und z die drei kartesischen Koordinaten eines auf der Fläche liegenden Punktes im lokalen flächenbezogenen Koordinatensystem.

[0060] Die diffraktive Struktur kann dann durch eine entsprechende Polynomentwicklung der Form

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sum_{m,n=1}^{\infty} C'_{m,n} x^m y^n \quad (2)$$

beschrieben werden, wobei $C'_{m,n}$ den Entwicklungskoeffizienten der Polynomentwicklung der diffraktiven Struktur in der Ordnung m bzgl. der x -Richtung und der Ordnung n bzgl. der y -Richtung darstellt. Die Koordinaten

x und y sowie die Bezugswellenlänge λ_0 sind in die Formeln (1) und (2) als dimensionslose Maßzahlen (sog. Lens Units) in Millimetern einzusetzen. Die hierdurch beschriebene diffraktive Struktur kann man sich körperlich so vorstellen, dass, ausgehend von der Trägerfläche, das zugehörige Segment der diffraktiven Fläche jeweils beim Erreichen eines festen Phasenwertes von 2π einen Sprung um einen Betrag $\lambda_0/(n(\lambda_0) - 1)$ in z -Richtung gegenüber der Trägerfläche aufweist.

[0061] Bei der erfindungsgemäßen achromatischen Auslegung der Variolinse, d. h. bei einem erfindungsgemäßen optischen Element, sind dabei im Allgemeinen jeweils die Entwicklungskoeffizienten der Freiformfläche $C_{m,n}$ und die Entwicklungskoeffizienten der diffraktiven Struktur $C'_{m,n}$ mit gleichen Werten von n und m von Null verschieden und miteinander durch einen festen Proportionalitätsfaktor gekoppelt. Der Proportionalitätsfaktor hängt vorzugsweise von der Dispersion der verwendeten Glasart bzw. der verwendeten Kunststoffart ab und ist im jeweils vorliegenden Einzelfall aus einer numerischen Optimierungsrechnung zu bestimmen.

[0062] In der einfachsten Ausgestaltung des optischen Elements weist dieses genau zwei optische Komponenten auf, die lateral verschoben werden können, d. h. transversal zur optischen Systemachse OA (vgl. Fig. 1, in der die eine optische Komponente **3** in $+y$ verschoben wird, die andere optische Komponente **1** in $-y$ Richtung, beide gegenläufig um gleiche Beträge). Die beiden optischen Komponenten **1**, **3** bestehen aus je einer planen Seite und einer Freiformfläche und verhalten sich in einer Nullposition exakt spiegelsymmetrisch zueinander, so dass die beiden optischen Komponenten **1**, **3** in einer Nullposition einer planparallelen Platte äquivalent sind. Eine reine Defokussierungswirkung lässt sich gemäß der Lehre von Alvarez bewirken, wenn die Freiformfläche der optischen Komponenten **1**, **3** durch folgendes Polynom 3. Ordnung beschrieben werden kann:

$$z(x, y) = K \cdot \left(x^2 \cdot y + \frac{y^3}{3} \right) \quad (3)$$

[0063] Hierbei ist angenommen, dass die laterale Verschiebung der optischen Komponenten **1**, **3** entlang der y -Achse erfolgt, die dadurch definiert wird. Falls die Verschiebung entlang der x -Achse erfolgen soll, ist in obiger Gleichung entsprechend die Rolle von x und y zu tauschen. Der Parameter K skaliert quasi die Profiltiefe und legt auf diese Weise die erzielbare Brechkraftänderung pro Einheit des lateralen Verschiebewegs s fest.

[0064] Für parallel zur Achse einfallende Strahlbündel bewirkt die laterale Verschiebung der optischen Komponenten um eine Strecke $s = |\pm y|$ damit eine Änderung der Wellenfront gemäß der Gleichung:

$$\Delta W(x, y) = K \cdot \left(2 \cdot s \cdot (x^2 + y^2) + 2 \cdot \frac{s^3}{3} \right) \quad (4)$$

also eine Änderung der Fokusslage durch Änderung des parabolischen Wellenfrontanteils plus einen sog. Piston-Term (Zernicke Polynom mit $j = 1$, $n = 0$ und $m = 0$), wobei letzterer einer konstanten Phase entspricht und sich genau dann nicht auf die Abbildungseigenschaften auswirkt, wenn sich das erfindungsgemäße optische Element im Unendlichstrahlengang befindet.

[0065] Die Flächenbrechkraft einer derartigen Variolinse ist durch folgende Formel gegeben:

$$\Phi_v = 4 \cdot K \cdot s \cdot (n - 1) \quad (5)$$

[0066] Hierbei ist s der laterale Verschiebeweg eines Elementes entlang der y -Richtung, K der Skalierungsfaktor der Profiltiefe und n der Brechungsindex des Materials, aus dem die Linse gebildet ist, bei der jeweiligen Wellenlänge.

[0067] Die zugehörige zur Achromatisierung verwendete diffraktive Struktur weist dann folgende definierende Gleichung auf:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot C' \cdot \left(x^2 \cdot y + \frac{y^3}{3} \right) \quad (6)$$

wobei der Koeffizient C' eine zu K proportionale Konstante ist, die mit K in einer von den Dispersionseigenschaften des verwendeten Glases abhängenden und im konkreten Falle numerisch zu bestimmenden Weise in Beziehung steht.

[0068] Zur Minimierung der Mittendicke des Elementes kann ferner ein zu y proportionaler Term (Keil- oder Kippterm) addiert werden, dessen optische Wirkung auf den beiden Freiformflächen sich dann nahezu aufhebt, aber eine Minimierung der Mittendicke des Elementes ermöglicht. Der entsprechende Term kann dann auch bei der diffraktiven Struktur vorgesehen werden. Sofern ein Kippterm bei einer refraktiven Freiformfläche vorgesehen ist, braucht er – in Abweichung zu der oben ausgeführten Lehre, wonach die Phasenfunktion der diffraktiven Fläche und das Höhenprofil der refraktiven Fläche immer die gleichen Polynomterme enthalten – nicht zwingend auch bei der diffraktiven Struktur vorgesehen sein. Das liegt daran, dass ein reiner Kippungsterm auf den Freiformflächen in erster Näherung optisch wirkungslos ist und daher insbesondere auch keine Farbfehler hervorruft. Es ist möglich, dass die beiden relativ zueinander bewegten optischen Komponenten **1, 3** wie in **Fig. 1** gezeigt so orientiert sind, dass die beiden Freiformflächen **5, 7** einander zugewandt sind. In diesem Falle ist es besonders einfach, eine Justierung der Nulllage vorzunehmen, nämlich indem der Abstand zwischen den beiden optischen Komponenten **1, 3** solange verringert wird, bis sich die beiden Komponenten berühren. In dieser Position findet automatisch eine Zentrierung der optischen Komponenten statt. Anschließend kann der Abstand in axialer Richtung gerade soweit wieder vergrößert werden, dass sich die beiden optischen Komponenten **1, 3** bei der lateralen Bewegung während des funktionsgemäßen Betriebs gerade nicht berühren.

[0069] Es ist aber auch möglich, die beiden optischen Komponenten **1, 3** derart zu orientieren, dass die Freiformflächen **5, 7** voneinander abgewandt sind. Auf diese Weise kann der Abstand zwischen den optischen Komponenten, die sich dann an den mit den diffraktiven Strukturen **9, 11** versehenen Planflächen gegenüberstehen, minimal gehalten werden, was sich, insbesondere bei größeren Feld- und Aperturwinkeln an der Übergangsfläche zwischen den beiden optischen Komponenten häufig als vorteilhaft für die Abbildungsgüte herausgestellt hat.

[0070] Es ist auch möglich, dass die Freiformflächen zusätzliche Terme höherer Ordnung zur Beeinflussung einzelner Bildfehler aufweisen können. Beispielsweise würde ein Term der Form

$$z(x, y) = K \cdot (y \cdot x^4 + \frac{2}{3} \cdot (x^2 \cdot y^3) + \frac{y^5}{5}) \quad (7)$$

vorwiegend die sphärische Aberration beeinflussen und könnte somit etwa für Anwendungen im Bereich der Mikroskopie die bei Fokussierung in eine andere Probentiefe auftretende sphärische Aberration korrigieren helfen. Auch eine teilweise oder vollständige Ausgleichung der durch die Dickenänderung des Elements (Piston-Term) im konvergenten Strahlengang hervorgerufenen sphärischen Aberration kann auf diese Weise erfolgen.

[0071] Die zugehörige Phasenfunktion der zur Achromatisierung benötigten diffraktiven Struktur weist dann entsprechend bevorzugt folgende Form auf:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot C' \cdot (y \cdot x^4 + \frac{2}{3} \cdot (x^2 \cdot y^3) + \frac{y^5}{3}) \quad (8)$$

[0072] Die Strukturprofile können frei überlagert sein, d. h. eine Struktur zur Änderung der Brechkraft und eine Struktur zur Änderung der sphärischen Aberration können überlagert sein, so dass eine entsprechende Variolinse bei Verschiebung der Elemente gegeneinander eine Brechkraftwirkung variiert und gleichzeitig eine sphärische Aberration ändert, wobei beide Änderungen mit einem beliebig aber fest vorzuwählenden Proportionalitätsfaktor proportional zueinander sind. Die diffraktive Struktur folgt auch hier, wie oben mehrfach beschrieben, prinzipiell immer der Symmetrie der Struktur der Freiformfläche und lässt sich aus den Polynomkoeffizienten der Freiformfläche prinzipiell analytisch berechnen. In der Praxis wird man den Skalierungsfaktor K der Freiformfläche in Abhängigkeit vom benötigten Wellenfronthub und dem verfügbaren Stellweg s geeignet wählen und den zugehörigen Parameter C' der diffraktiven Struktur aus einer numerischen Rechnung bestimmen und festlegen.

[0073] Nach Lohmann (vgl. Appl. Opt. Vol. 9, No 7, (1970), p. 1669–1671) ist es möglich, eine zur Lehre von Alvarez weitgehend äquivalente Variolinse darzustellen, bei der zwei Freiformflächen beispielsweise in niedrigster Ordnung durch eine Gleichung der Form

$$z(x, y) = A \cdot (x^3 + Y^3) \quad (9)$$

beschrieben werden und die Relativbewegung der optischen Komponenten **1, 3** zueinander entlang einer unter 45° gegenüber der x- und y-Achse verlaufenden Geraden senkrecht zur optischen Systemachse erfolgt. Die Konstante A ist dabei wiederum eine freie Skalierungskonstante, die die maximale Profiltiefe der Freiformfläche und dadurch die Brechkraftänderung pro Weglänge beschreibt. Es handelt sich bei der Beschreibung nach Lohmann nicht um eine unabhängige Lösung, sondern im Wesentlichen nur um eine alternative Darstellung. Falls die Darstellung nach Lohmann gewählt wird, ist die zugehörige Phasenfunktion der diffraktiven Struktur entsprechend durch die Gleichung

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot B \cdot (x^3 + y^3) \quad (10)$$

zu beschreiben, wobei B wiederum proportional zu A auszulegen ist und von der Dispersion der verwendeten Glasart oder Kunststoffart abhängt.

[0074] Weiterhin ist es auch möglich, dass beide Seiten der bewegten optischen Komponenten **1, 3** eine Wirkform gemäß der oben beschriebenen Formen aufweisen. Beispielsweise könnte eine symmetrische Aufteilung des Flächenprofils gemäß der obigen Formel auf Vorder- und Rückfläche einer Komponente bewirken, dass die Profiltiefen auf jeder Fläche ausreichend gering bleiben, so dass beispielsweise eine photolithographische Herstellung der Elemente, die typischerweise nur maximale Profiltiefen im Bereich $< 10\text{--}30 \mu\text{m}$ ermöglicht, erleichtert ist.

[0075] Nachfolgend wird ein konkretes Ausführungsbeispiel für das Konstruieren eines erfindungsgemäßen optischen Elements unter Bezugnahme auf Konstruktionsdaten beschrieben.

[0076] Das konkrete Beispiel umfasst zwei optische Komponenten die jeweils eine Freiformfläche aufweisen, deren Form durch die Polynomentwicklung gemäß Gleichung (1) beschrieben wird: Die Entwicklungskoeffizienten $C_{m,n}$ der Polynomentwicklung sind in den in Tabelle 2 und Tabelle 3 aufgeführten Konstruktionsdaten jeweils an den entsprechenden Flächen angegeben, wobei die Entwicklungskoeffizienten mit den Potenzen der zugehörigen Polynomterme gekennzeichnet sind.

[0077] Neben den refraktiven Freiformflächen enthält jede optische Komponente eine diffraktive optische Struktur (auch DOE, diffraktives optisches Element), deren Phasenfunktion durch die Polynomentwicklung gemäß Gleichung (2) bestimmt ist, wobei die Bezugswellenlänge λ_0 im vorliegenden konkreten Ausführungsbeispiel bei 546.0 nm liegt. Die Entwicklungskoeffizienten $C'_{m,n}$ sind in den in Tabelle 3 angegebenen Konstruktionsdaten an denjenigen Flächen, die mit der diffraktiven Struktur versehen sind, gemäß der zuvor mit Bezug auf die Entwicklungskoeffizienten der Freiformflächen genannten Bezeichnungsweise angegeben.

[0078] In dem konkreten Ausführungsbeispiel besteht die Konvention, dass die Koordinaten x und y und die Bezugswellenlänge λ_0 als dimensionslose Maßzahlen in sogenannten Lens Units (im konkreten Beispiel sind dies Millimeter) angegeben sind. Außerdem kommen ferner rotationssymmetrische asphärische Flächen vor, die durch folgende Gleichung definiert sind:

$$z = \frac{(x^2 + y^2)/R}{1 + \sqrt{1 - (1+k) \cdot \frac{(x^2 + y^2)}{R^2}}} + A \cdot (x^2 + y^2)^2 + B \cdot (x^2 + y^2)^3 + C \cdot (x^2 + y^2)^4 + D \cdot (x^2 + y^2)^5$$

[0079] Die zugehörigen Koeffizienten k, A, B, C und D sind an den entsprechenden Flächen jeweils im Anschluss an den Scheitelradius angegeben.

[0080] Schließlich kommen im Beispiel noch rotationssymmetrische diffraktive Strukturen vor, die durch folgende definierende Gleichung beschrieben sind:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot C_1 \cdot (x^2 + y^2) + \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot C_2 \cdot (x^2 + y^2)^2$$

[0081] Die zugehörigen Koeffizienten λ_0 , C_1 und C_2 sind wiederum an den entsprechenden Flächen jeweils im Anschluss an den Scheitelradius angegeben.

[0082] Es sei darauf hingewiesen, dass es mathematisch unendlich viele äquivalente Darstellungen derselben Freiformflächen gibt. Wie oben ausgeführt, führt eine andere Definition der Verschiebeachsen zu einer anders aussehenden Darstellung, die sich aber als weitgehend äquivalent erweist. Ebenso lassen sich die Phasenprofile der zur Achromatisierung verwendeten diffraktiven Strukturen auf unendlich viele äquivalente Arten beschreiben, insbesondere beispielsweise durch Entwicklung der Phasenfunktion nach anderen orthogonalen Funktionensystemen wie Zernike- oder Lagrangepolynome. Die Erfindung ist daher nicht auf die explizite Form der im konkreten Ausführungsbeispiel gewählten Darstellung beschränkt.

[0083] Das erfindungsgemäße optische Element des konkreten Ausführungsbeispiels betrifft eine erfindungsgemäß ausgelegte Lösung für eine achromatische Fokussieroptik, die einer festbrennweitigen Gruppe vorgeschaltet ist, und die eine stufenlose Anpassung einer Fokussierung auf unterschiedliche Objektentfernungen zwischen $S_0 = -500$ mm und $S_0 = -167$ mm ermöglicht. Der Durchmesser der Aperturblende beträgt in dem konkreten Ausführungsbeispiel konstant 20 mm.

[0084] Um die Konstruktion des erfindungsgemäßen optischen Elements anhand des konkreten Ausführungsbeispiels aufzeigen zu können, wird in drei Schritten vorgegangen. Zunächst wird eine für eine feste mittlere Objektentfernung von $S_0 = -250$ mm ausgelegte und für diese feste Objektentfernung quasi fehlerfreie Optikgruppe angegeben. Im nächsten Schritt wird eine Variolinse zur Variation der Systembrechkraft und damit zur Anpassung auf die geänderte Objektschnittweite ergänzt. Die optischen Komponenten der Variolinse weisen noch keine diffraktive Struktur auf. Schließlich wird eine erfindungsgemäße Variolinse angegeben, deren optische Komponenten diffraktive Strukturen aufweisen, mit denen es gelingt, die chromatischen Bildfehler nahezu vollständig und über den gesamten mit der Variolinse einstellbaren Entfernungsbereich hinweg zu kompensieren.

[0085] Die für eine feste mittlere Objektentfernung von $S_0 = -250$ mm nahezu fehlerfrei abbildende Optik **20** wird in dem konkreten Ausführungsbeispiel durch eine rotationssymmetrische Hybridoptik repräsentiert, wie sie schematisch in [Fig. 8](#) dargestellt ist. Aus Gründen der klareren Darstellung des wesentlichen Kerns der Erfindung ist die Darstellung in der Figur auf idealisierte Randbedingungen (nur ein Feldpunkt) beschränkt.

[0086] Die in [Fig. 8](#) dargestellte Optik **20** besteht aus einer auf der Vorderseite asphärisch ausgebildeten Sammellinse aus dem Glas FK5 und einer damit verkitteten sphärischen Zerstreuungslinse aus dem Glas SF1. Die Zerstreuungslinse ist auf der Rückseite (F7) mit einer angepassten DOE-Struktur versehen. Um die Glaswege der später benötigten Elemente der Variolinse zu berücksichtigen, sind der Optik **20** zwei planparallele Glasplatten **21**, **23** aus dem gleichen Glas, aus dem später die Variolinse gebildet wird, vorgeschaltet. Dieser Teil des Systems dient hier dazu, eine quasi ideal korrigierte festbrennweitige Optik zu simulieren, die natürlich in praktischen Anwendungen auch durch ganz anders aufgebaute mehrlinsige Objektive gebildet sein kann. Die festbrennweitige Gruppe ist im konkreten Ausführungsbeispiel so ausgelegt, dass sie ein Objekt, das sich 250 mm vor dem Scheitel der am weitesten links liegenden Glasfläche F1 befindet, auf eine Bildebene in 50 mm Entfernung vom Scheitel der letzten, am weitesten rechts liegenden Linsefläche F7 abbildet. Als Anwendung für das hier beschriebene Beispiel kann bspw. ein Objektiv für ein digitales Operationsmikroskop angesehen werden, also ein Operationsmikroskop mit digitalen Okularen.

[0087] Die Konstruktionsparameter der in [Fig. 8](#) dargestellten Optik **20** und der vorgeschalteten Glasplatten **21**, **23** sind in der nachfolgenden Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1

Fläche	Scheitelradius	Dicke	Material
Objektebene	∞	250,000	
F1	∞	1,000	NLASF44
F2	∞	0,00	
F3	∞	1,000	NLASF44
F4	∞	0,500	
Blende	∞	0,000	
F5	18,51472	6,000	FK5
Asphärenkoeffizienten:			
k: 0,0000			
A: -0,106452E-04 B: -0,216063E-07 C: -0,285433E-10 D: -0,207670E-12			
F6	-76,75116	1,000	SF1
F7	306,32659	50,000	
DOE-Parameter			
λ_0 : 546,00	C ₁ : -2,2271E-04	C ₂ : 5,3348E-07	
Bildebene	∞	0,000	

[0088] **Fig. 9** zeigt die zur Optik aus **Fig. 8** gehörenden Bildfehlerkurven. Die vertikale Achse bezeichnet die geometrisch-optischen Queraberrationen in Millimetern und reicht von $-0,05$ mm bis $0,05$ mm. Dabei zeigt die linke Seite, die in der Figur als Y-Fan (dt. Y-Fächer) bezeichnet ist, die Queraberration **10** für ein Strahlenbündel in Abhängigkeit von der Y-Koordinate des Öffnungsstrahls in der Austrittspupille. Die rechte Seite, die in der Figur als X-Fan (dt. X-Fächer) bezeichnet ist, zeigt eine entsprechende Darstellung der Queraberration für das Strahlenbündel in Abhängigkeit von der X-Koordinate des Öffnungsstrahls in der Austrittspupille. Das Strahlenbündel weist dabei einen Achsstrahl als Hauptstrahl auf, d. h. der Hauptstrahl ist ein Strahl, der auf der optischen Achse der festbrennweitigen Gruppe **20** verläuft, also die X- und Y-Koordinaten $0,0$ aufweist und in der Y-Z-Ebene sowie in der X-Z-Ebene jeweils den Einfallswinkel Null Grad bezogen auf die optische Achse besitzt. Der von der Optik erzeugte Bildpunkt eines durch einen Achsstrahl als Hauptstrahl gekennzeichneten Strahlenbündels liegt dabei auf der optischen Achse. In der Figur ist der Hauptstrahl des Strahlenbündels im relativen Feld (Relative Field) entsprechend mit der Y-Koordinate $0,00$ und dem Winkel 0° für den Y-Fan bzw. der X-Koordinate $0,00$ und dem Winkel 0° für den X-Fan gekennzeichnet.

[0089] Aus der Figur erkennt man, dass die auftretenden Restfehler praktisch vollkommen vernachlässigbar sind; das Grundoptiksystem ist für die eine fest vorgegebene Objektschnittweite beugungsbegrenzt. Die Figur durch die beschriebene festbrennweitige Optik ist daher praktisch perfekt gegen Öffnungsfehler und gegen primäre und sekundäre chromatische Bildfehler korrigiert und stellt für die feste vorgegebene mittlere Objektdistanz von 250 mm eine nahezu ideale Linse dar.

[0090] Im nächsten Schritt zur Konstruktion des erfindungsgemäßen optischen Elements tritt an die Stelle der planparallelen Glasplatten **21, 23** vor der Optik **20** eine Variolinse mit zwei optischen Komponenten **1, 3**, die Freiformflächen **5, 7**, aber noch keine diffraktiven Strukturen aufweisen. Die Variolinse dient zur Fokussierung auf unterschiedliche Objektentfernungen, die im Beispiel von -500 mm bis $-166,67$ mm reichen und in den **Fig. 10** bis **Fig. 14** anhand folgender fünf Zwischenstellungen gezeigt sind: $S_0 = -500$ mm, $S_0 = -333,33$ mm, $S_0 = -250$ mm, $S_0 = -200$ mm und $S_0 = -166,67$ mm. Die beiden optischen Komponenten **1, 3**, die jeweils auf der Innenseite eine Freiformfläche **5, 7** tragen, werden zum Einstellen der Fokussierung auf die unterschiedlichen Objektentfernungen lateral gegenläufig zueinander bewegt, so dass sich im Innenbereich eine variable Luftlinse ergibt. Die Verschiebewege der ersten lateral bewegten optischen Komponente **1** betragen in den 5 Stellungen $+1.50$ mm, $+0.75$ mm, 0.00 mm; -0.75 mm; -1.50 mm. Die zweite optische Komponente **3** verschiebt sich jeweils um gleiche Beträge in die entgegengesetzte Richtung. Die Lage der Bildebene **5** relativ zur Optik **20** bleibt dabei konstant (50 mm freie Schnittweite).

[0091] In der Variolinse des konkreten Ausführungsbeipiels werden höhere Ordnungen der Alvarez-Freiformfläche genutzt, um die Sphärische Aberration bei geänderter Objektschnittweite entsprechend mit anpassen zu können.

[0092] Die Konstruktionsdaten des Systems gemäß Schritt 2 sind in der nachfolgenden Tabelle 1 angegeben:

Tabelle 2

Fläche	Scheitelradius	Dicke	Material
Objektebene	∞	Variabel	
F1	∞	1,000	NLASF44
Dezentrierungsparameter:			
XDE: 0,000 YDE: variabel von +1,50 bis -1,50 mm ZDE: 0,000			
F2	∞	0,120	
Freiformflächenparameter:			
Y: 3,2947E-02	X2Y: -4,0866E-04	Y3: -1,3622E-04	
X4Y: 5,1255E-09	X2Y3: 3,8124E-09	Y5: 1,0076E-09	
Dezentrierungsparameter:			
XDE: 0,000 YDE: variabel von -1,50 bis +1,50 mm ZDE: 0,000			
F3	∞	1,000	NLASF44
Dezentrierungsparameter:			
XDE: 0,000 YDE: variabel von -1,50 bis +1,50 mm ZDE: 0,000			
F4	∞	0,500	

Freiformflächenparameter:

Y: 3,2947E-02 X2Y: -4,0866E-04 Y3: -1,3622E-04

X4Y: 5,1255E-09 X2Y3: 3,8124E-09 Y5: 1,0076E-09

Dezentrierungsparameter:

XDE: 0,000 YDE: variabel von +1,50 bis -1,50 mm ZDE: 0,000

Blende	∞	0,000	
F5	18,51472	6,000	FK5

Asphärenkoeffizienten:

k: 0,0000

A: -0,106452E-04 B: -0,216063E-07 C: -0,285433E-10 D: -0,207670E-12

F6	-76,75116	1,000	SF1
F7	306,32659	50,000	

DOE-Parameter λ_0 : 546,00 C₁: -2,2271E-04 C₂: 5,3348E-07

Bildebene	∞	0,000
-----------	----------	-------

[0093] Das mit der Variolinse ohne diffraktive Strukturen in ihren optischen Komponenten **1, 3** zusammen mit der festbrennweitigen Optik **20** erzielbare Resultat ist in den [Fig. 15](#) bis [Fig. 19](#) wiedergegeben, welche die zu den in den [Fig. 10](#) bis [Fig. 14](#) dargestellten Positionen der optischen Komponenten gehörenden Bildfehler zeigen. Die vertikalen Achsen bezeichnen wie in [Fig. 9](#) jeweils die geometrisch-optischen Queraberrationen in Millimetern und reichen von -0,05 mm bis 0,05 mm. Dabei zeigt die linke Seite der Figuren jeweils wieder die Queraberration für ein Strahlenbündel mit Achsstrahl als Hauptstrahl in Abhängigkeit von der Y-Koordinate des Öffnungsstrahls in der Austrittspupille, die rechte Seite eine entsprechende Darstellung der Queraberration für das Strahlenbündel in Abhängigkeit von der X-Koordinate des Öffnungsstrahls in der Austrittspupille. Aus den [Fig. 15](#) bis [Fig. 19](#) ist zu erkennen, dass mit zunehmender lateraler Verschiebung der optischen Komponenten **1, 3** der Variolinse starke chromatische Fehler auftreten, die sich mit dem aus dem Stand der Technik bekannten Ansatz auch nicht beheben lassen. Man erkennt deutlich, dass sich nur in der zur ursprünglichen Objektentfernung von -250 mm gehörenden Position **3** eine auch chromatisch korrigierte Abbildung ergibt, während in allen anderen Stellungen eine sehr erhebliche chromatische Längsaberration als begrenzender Bildfehler auftritt. Dies erkennt der Fachmann daran, dass die zu verschiedenen Wellenlängen gehörenden Queraberrationen jeweils näherungsweise durch eine um die Horizontale gekippte Gerade repräsentiert sind.

[0094] Schließlich wird die erfindungsgemäße Lösung angegeben, mit der es gelingt, die chromatischen Bildfehler nahezu vollständig und über den gesamten einstellbaren Entfernungsbereich hinweg zu vermeiden. Die erfindungsgemäße Lösung beinhaltet ein erfindungsgemäßes optisches Element, d. h. eine erfindungsgemäß ausgestaltete Variolinse. In der 15 erfindungsgemäßen Lösung weist die Variolinse daher nun auf den Planflächen der lateral zueinander bewegten Freiformelemente diffraktive Strukturen (DOEs) auf. Damit wird eine Korrektur der chromatischen Fehler erreicht. Die DOEs werden jeweils in der +1. Beugungsordnung betrieben. Die Konstruktionsdaten des Systems sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3

Fläche	Scheitelradius	Dicke	Material
Objektebene	∞	Variabel	
F1	∞	1,000	NLASF44

Dezentrierungsparameter:

XDE: 0,000 YDE: variabel von +1,50 bis -1,50 mm ZDE: 0,000

DOE-Parameter:

λ_0 : 546,00

Y: -7,3733E-04 X2Y: -2,5217E-05 Y3: -8,4025E-06

X4Y: 1,8268E-08 X2Y3: 8,1876E-09 Y5: 9,8208E-10

[0095] [Fig. 20](#) zeigt die Phasenfunktion φ der diffraktiven Struktur auf der Fläche F1 als Funktion von x und y , welche mit den Koeffizienten aus der Tabelle 3 und Gleichung (2) für die Wellenlänge $\lambda_0 = 546$ nm berechnet ist. Mittels der Phase φ lassen sich die Furchenverläufe berechnen. Die Steiflanken der DOE-Furchen liegen jeweils um die Phasendifferenz 2π voneinander entfernt. [Fig. 21](#) zeigt den Furchenverlauf beim Blick auf Fläche F1 mit der Phasenfunktion aus [Fig. 20](#). In [Fig. 21](#) ist der Übersichtlichkeit halber jede zehnte Furche etwas dicker eingezeichnet. Beim Vergleich der [Fig. 20](#) und [Fig. 21](#) ist zu erkennen, dass in Gebieten mit kleinem Gradienten der Phase φ der Abstand der Furchen am größten ist. In Gebieten mit größerem Gradienten der Phase φ ist der Furchenabstand verringert. Die Furchen verlaufen stets parallel zu Isolinien der Phase φ .

[0096] [Fig. 22](#) zeigt einen Schnitt durch das DOE entlang der Linie XXII-XXII in [Fig. 21](#). Man erkennt die typische sägezahnartige DOE-Struktur. Die Tiefe h_0 des DOEs ist so gewählt, dass die Beugungseffizienz für die Wellenlänge $\lambda_0 = 546$ nm möglichst groß ist. Dies ist der Fall, wenn die Tiefe h_0 die Bedingung $h_0 = \lambda_0 / (n(\lambda_0) - 1)$ erfüllt. Mit $\lambda_0 = 546$ nm und der Brechzahl $n(546 \text{ nm}) = 1.8083$ von NLASF44 ergibt sich somit eine Tiefe von $0,6755 \mu\text{m}$. [Fig. 23](#) zeigt die Beugungseffizienz, also denjenigen Anteil der in die diffraktive Struktur eintretenden Lichtintensität, der in die gewünschte Beugungsordnung abgelenkt wird, für ein typisches konventionelles DOE als Funktion der Wellenlänge λ . Im vorliegenden konkreten Ausführungsbeispiel, in dem die diffraktive Struktur in der ersten Beugungsordnung betrieben wird, gibt die Beugungseffizienz also denjenigen Anteil der in die diffraktive Struktur eintretenden Lichtenergie an, der in die erste Beugungsordnung abgelenkt wird.

[0097] Die [Fig. 24](#) bis [Fig. 28](#) zeigen die Bildfehler, die bei der festbrennweitigen Optik **20** mit vorgeschalteter Variolinse, in der die optischen Komponenten **1**, **3** die beschriebenen diffraktiven Strukturen aufweisen, auftreten. Die vertikalen Achsen bezeichnen wiederum jeweils die geometrisch-optischen Queraberrationen in Millimetern und reichen von $-0,05$ mm bis $0,05$ mm, wobei die linke Seite der Figuren die Queraberration für ein Strahlenbündel mit Achsstrahl als Hauptstrahl in Abhängigkeit von der Y-Koordinate des Öffnungsstrahls in der Austrittspupille zeigt und die rechte Seite eine entsprechende Darstellung der Queraberration für das Strahlenbündel in Abhängigkeit von der X-Koordinate des Öffnungsstrahls in der Austrittspupille. Im Vergleich mit den Bildfehlerkurven des Systems mit Variolinse ohne diffraktive Strukturen ([Fig. 15](#) bis [Fig. 19](#)) erkennt man, dass für alle Objektentfernungen und zugehörigen Stellwege der Freiformelemente eine ausgezeichnete Korrektur des Farblängsfehlers erzielt wird.

[0098] Bei einer diffraktiven Struktur, die aus einer Grenzfläche besteht, die an Luft grenzt, fällt die Beugungseffizienz um so mehr ab, je weiter die Wellenlänge λ von der Wellenlänge λ_0 entfernt ist, für die die diffraktive Struktur optimiert ist (siehe [Fig. 23](#)). In breitbandigen Optiksyste-men, bei denen das Licht aus einem breiten Wellenlängenbereich stammt, tritt bei solchen diffraktiven Strukturen daher Falschlicht aus unerwünschten Beugungsordnungen auf. Um das Streulicht aus unerwünschten Beugungsordnungen breitbandig zu unterdrücken, können die mit Bezug auf die [Fig. 5](#) bis [Fig. 7](#) beschriebenen effizienz-achromatisierten diffraktiven Strukturen zum Einsatz kommen.

Bezugszeichenliste

1	optische Komponente
3	optische Komponente
5	refraktive Freiformfläche
7	refraktive Freiformfläche
9	diffraktive Struktur
11	diffraktive Struktur
13	erstes Material
14	planparallele Platte
15	zweites Material
17	erstes Material
18	planparallele Platte
19	zweites Material
20	festbrennweitige Gruppe
21	planparallele Platte
23	planparallele Platte

ZITATE ENHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- US 3305294 [[0002](#), [0004](#), [0009](#), [0047](#)]
- DE 102011054087 [[0004](#)]
- DE 102007051887 A1 [[0020](#), [0054](#)]
- DE 102007051887 [[0053](#)]

Zitierte Nicht-Patentliteratur

- I. M. Barton et al. I. „Diffractive Alvarez Lens” Optics Letters 2000 (25), Seiten 1–3 [[0003](#)]
- B. H. Kleemann, et al.: „Design concepts for broadband high-efficiency DOEs”, J. Europ. Opt. Soc. Rap. Public. 08015 Vol. 3 (2008) [[0052](#)]
- Lohmann (vgl. Appl. Opt. Vol. 9, No 7, (1970), p. 1669–1671) [[0073](#)]

Patentansprüche

1. Optisches Element mit wenigstens einer ersten optischen Komponente (1) und einer zweiten optischen Komponente (3), die entlang einer optischen Achse (OA) hintereinander angeordnet sind, wobei die erste optische Komponente (1) und die zweite optische Komponente (3) jeweils in einer Bewegungsrichtung senkrecht zur optischen Achse (OA) relativ zueinander bewegbar angeordnet sind und wobei die erste optische Komponente (1) und die zweite optische Komponente (3) jeweils mindestens eine refraktive Freiformfläche (5, 7) aufweisen, **dadurch gekennzeichnet**, dass der refraktiven Freiformfläche (5) der ersten Komponente (1) eine erste diffraktive Struktur (9) zugeordnet ist und der refraktiven Freiformfläche (7) der zweiten Komponente (3) eine zweite diffraktive Struktur (11) zugeordnet ist, wobei die zugeordneten diffraktiven Strukturen (9, 11) eine wellenlängenabhängige Wirkung der jeweiligen refraktiven Freiformfläche (5, 7) beeinflussen.

2. Optisches Element nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die den refraktiven Freiformflächen (5, 7) zugeordneten diffraktiven Strukturen (9, 11) derart auf die jeweilige refraktive Freiformfläche (5, 7) abgestimmt sind, dass die Beeinflussung der wellenlängenabhängigen Wirkung eine Kompensation der wellenlängenabhängigen Wirkung der jeweiligen refraktiven Freiformfläche (5, 7) ist.

3. Optisches Element nach Anspruch 1 oder Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass

- die Form einer refraktiven Freiformfläche (5, 7) jeweils durch eine Polynomentwicklung beschrieben wird, die in endlich vielen bestimmten Polynomordnungen von Null verschiedene Entwicklungskoeffizienten aufweist,
- die einer refraktiven Freiformfläche (5, 7) zugehörige diffraktive (9, 11) Struktur durch eine Polynomentwicklung beschrieben wird, die in denselben Polynomordnungen wie die Polynomentwicklung der refraktiven Freiformfläche (5, 7) von Null verschiedene Entwicklungskoeffizienten aufweist, und
- diejenigen Entwicklungskoeffizienten einer eine refraktive Freiformfläche (5, 7) beschreibenden Polynomentwicklung und der die zugehörige diffraktive Struktur (9, 11) beschreibenden Polynomentwicklung, welche jeweils derselben Polynomordnung zugeordnet sind, in einem festen funktionalen Zusammenhang zueinander stehen.

4. Optisches Element nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die jeweils derselben Polynomordnung zugeordneten Entwicklungskoeffizienten einer eine refraktive Freiformfläche (5, 7) beschreibenden Polynomentwicklung und der die zugehörige diffraktive Struktur (9, 11) beschreibenden Polynomentwicklung in einem linearen funktionalen Zusammenhang stehen.

5. Optisches Element nach Anspruch 3 oder Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass der funktionale Zusammenhang von dem in der jeweiligen optischen Komponente (1, 3) verwendeten Material abhängt.

6. Optisches Element nach einem der Ansprüche 3 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Polynome der ersten und der zweiten Polynomentwicklung jeweils von zwei Variablen abhängen, die verschiedene Richtungen senkrecht zur optischen Achse des optischen Elements repräsentieren.

7. Optisches Element nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass

- die beiden Richtungen senkrecht aufeinander stehen, wobei die eine Richtung der Bewegungsrichtung der optischen Komponenten (1, 3) entspricht,
- eine eine refraktive Freiformfläche (5, 7) beschreibende Polynomentwicklung und die die zugehörige diffraktive Struktur (9, 11) beschreibende Polynomentwicklung jeweils nur ungerade Polynomordnungen in derjenigen Variablen aufweisen, welche die Bewegungsrichtung der optischen Komponenten (1, 3) repräsentiert, und
- die eine refraktive Freiformfläche (5, 7) beschreibende Polynomentwicklung und die die zugehörige diffraktive Struktur (9, 11) beschreibende Polynomentwicklung jeweils nur gerade Polynomordnungen in derjenigen Variablen aufweisen, welche die zur Bewegungsrichtung der optischen Komponenten (1, 3) senkrechte Richtung repräsentiert.

8. Optisches Element nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass die refraktive Freiformfläche (5, 7) und die diffraktive Struktur (9, 11) einer optischen Komponente (1, 3) zumindest teilweise auf entgegengesetzten Seiten der optischen Komponente (1, 3) angeordnet sind.

9. Optisches Element nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass eine refraktive Freiformfläche (5, 7) und eine diffraktive Struktur (9, 11) einer optischen Komponente (1, 3) jeweils zumindest teilweise auf derselben Seite der optischen Komponente (1, 3) angeordnet sind.

10. Optisches Element nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass die refraktiven Freiformflächen (5, 7) der optischen Komponenten (1, 3) einander zugewandt sind.

11. Optisches Element nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass die refraktiven Freiformflächen (5, 7) der optischen Komponenten (1, 3) einander abgewandt sind.

12. Optisches Element nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass die erste optische Komponente (1) aus einem ersten Material (13) mit einer ersten Brechkraft und wenigstens einem zweiten Material (15) mit einer zweiten Brechkraft zusammengesetzt ist und/oder die zweite optische Komponente (3) aus einem ersten Material (17) mit einer ersten Brechkraft und wenigstens einem zweiten Material (19) mit einer zweiten Brechkraft zusammengesetzt ist und die einer refraktiven Freiformfläche (5, 7) zugeordnete diffraktive Struktur (9, 11) an einer Grenzfläche zwischen dem ersten Material (13, 17) und dem zweiten Material (15, 19) angeordnet ist.

13. Optisches Element nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass die erste optische Komponente (1) und die zweite optische Komponente (3) jeweils zwei refraktive Freiformflächen aufweisen, die an entgegengesetzten Seiten der jeweiligen optischen Komponente (1, 3) angeordnet sind.

14. Optisches Element nach einem der Ansprüche 1 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass
 – es wenigstens zwei optische Komponenten (1, 3) aus Materialien mit unterschiedlichen Brechzahlen vorhanden sind, wobei die unterschiedlichen Brechzahlen so gewählt sind, dass primäre Farbfehler kompensiert werden, und
 – die optischen Komponenten (1, 3) diffraktive Strukturen (9, 11) aufweisen, die derart ausgebildet sind, dass sie sekundäre Farbfehler ausgleichen.

15. Optisches Element nach einem der Ansprüche 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass die optischen Komponenten (1, 3) aus einem Material hergestellt sind, das im tiefen UV oder im mittleren Infrarot oder im fernen Infrarot eine hohe Transmission aufweist.

16. Optisches Gerät mit wenigstens einem optischen Element nach einem der Ansprüche 1 bis 15.

17. Verfahren zur Konstruktion eines optischen Elementes nach einem der Ansprüche 1 bis 15, wobei die Form einer refraktiven Freiformfläche (5, 7) jeweils durch eine Polynomentwicklung beschrieben wird, die in endlich vielen bestimmten Polynomordnungen von Null verschiedene Entwicklungskoeffizienten aufweist, dadurch gekennzeichnet, dass

– jeder refraktiven Freiformfläche (5, 7) wenigstens eine diffraktive Struktur (9, 11) zugeordnet wird, die durch eine Polynomentwicklung beschrieben wird, die in denselben Polynomordnungen wie die Polynomentwicklung der refraktiven Freiformfläche (5, 7) von Null verschiedene Entwicklungskoeffizienten aufweist, und
 – die Entwicklungskoeffizienten der Polynomentwicklung der diffraktiven Struktur (9, 11) aus den Entwicklungskoeffizienten der Polynomentwicklung der refraktiven Freiformfläche (5, 7) ermittelt werden, indem für jede Polynomordnung, in der die Polynomentwicklung der refraktiven Freiformfläche (5, 7) von Null verschiedene Entwicklungskoeffizienten aufweist, der jeweilige Entwicklungskoeffizient der Polynomentwicklung für die diffraktive Struktur (9, 11) anhand eines vorgegeben funktionalen Zusammenhangs aus dem entsprechenden Entwicklungskoeffizienten der Polynomentwicklung für die refraktive Freiformfläche (5, 7) ermittelt wird.

18. Verfahren nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, dass der vorgegeben funktionale Zusammenhang ein linearer funktionaler Zusammenhang ist.

19. Verfahren nach Anspruch 17 oder Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, dass der funktionale Zusammenhang von dem in der jeweiligen optischen Komponente (1, 3) verwendeten Material abhängt.

Es folgen 15 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

FIG 1

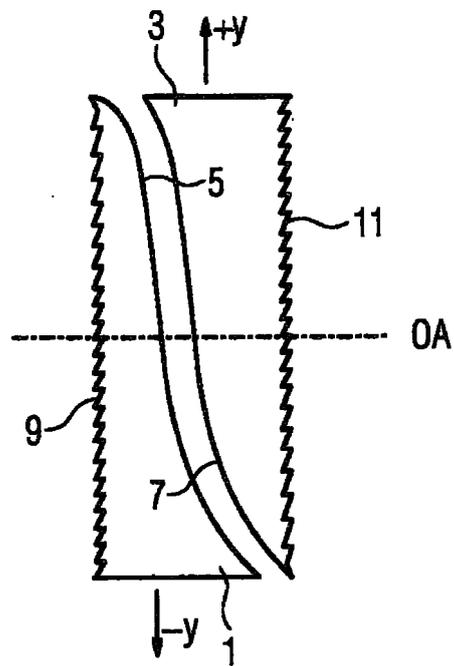


FIG 2

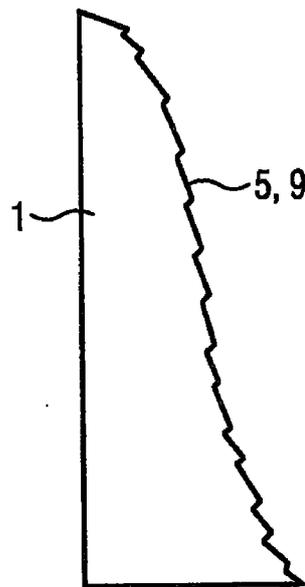


FIG 3

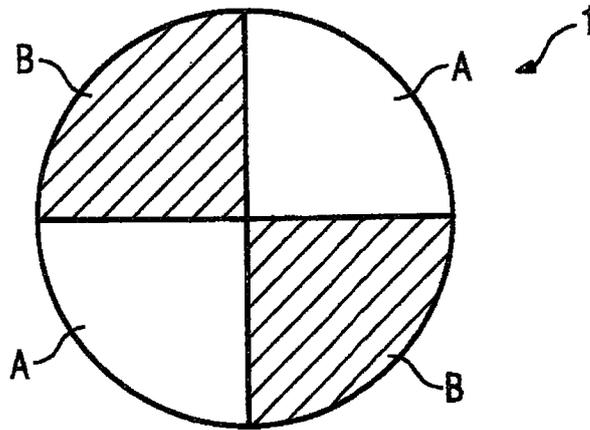


FIG 4

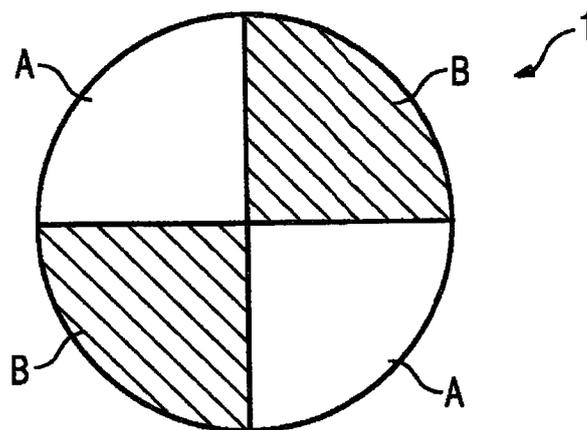


FIG 5

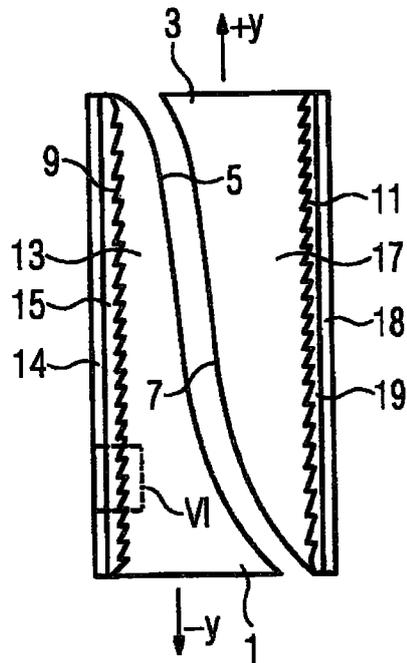


FIG 6

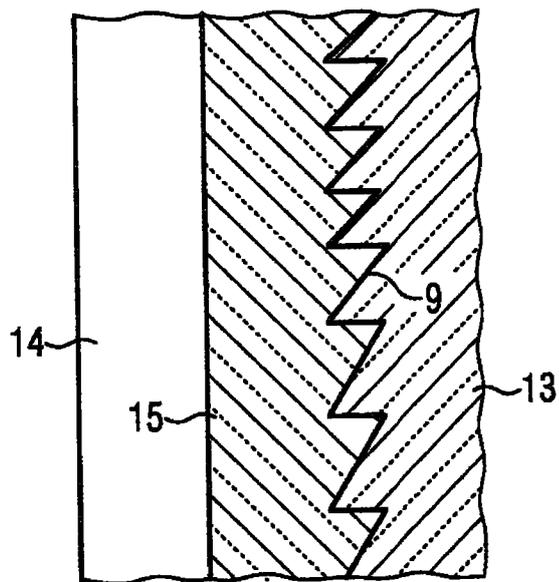


FIG 7

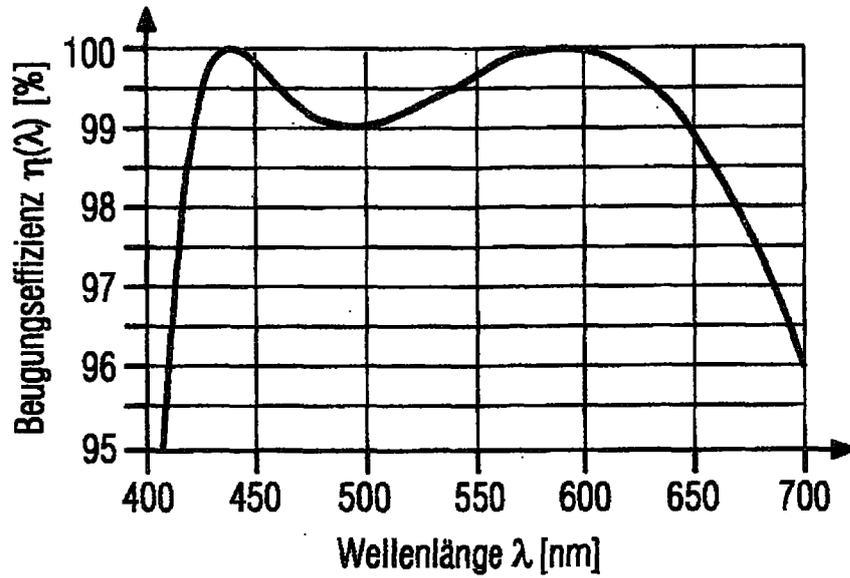


FIG 8

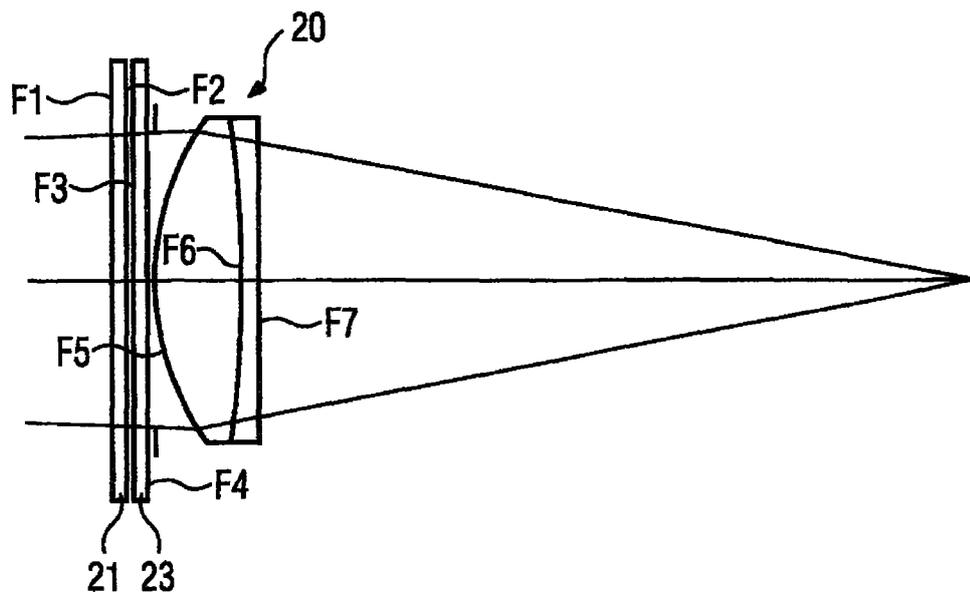


FIG 9

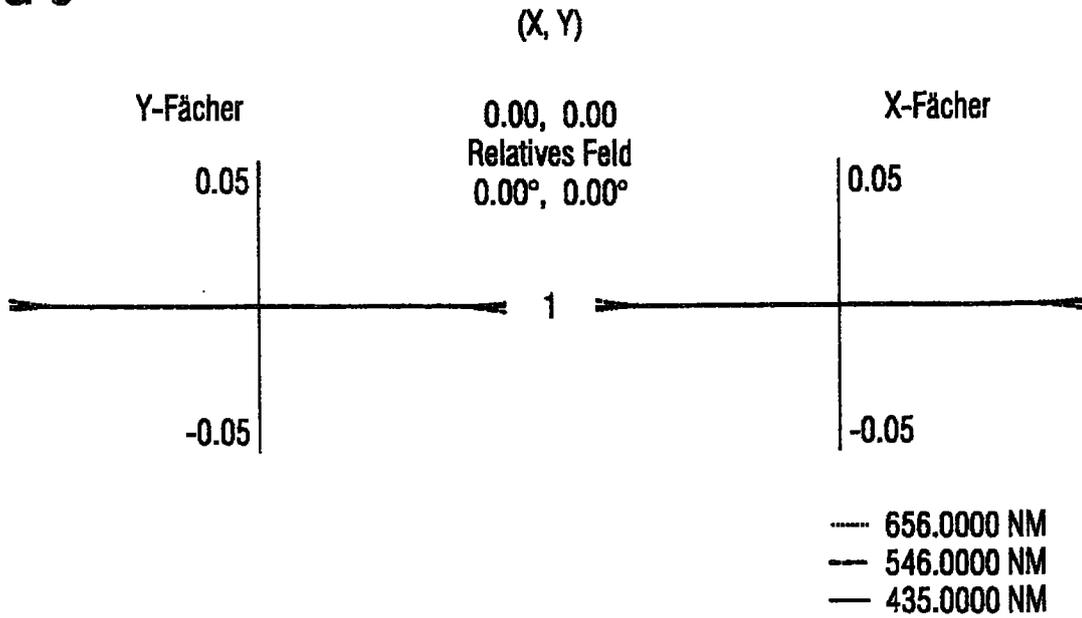


FIG 10

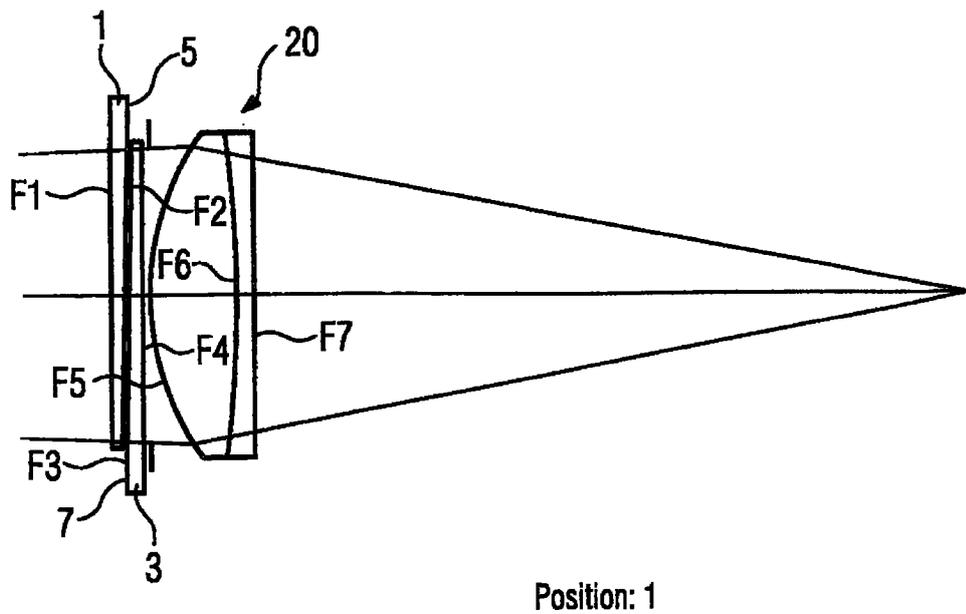
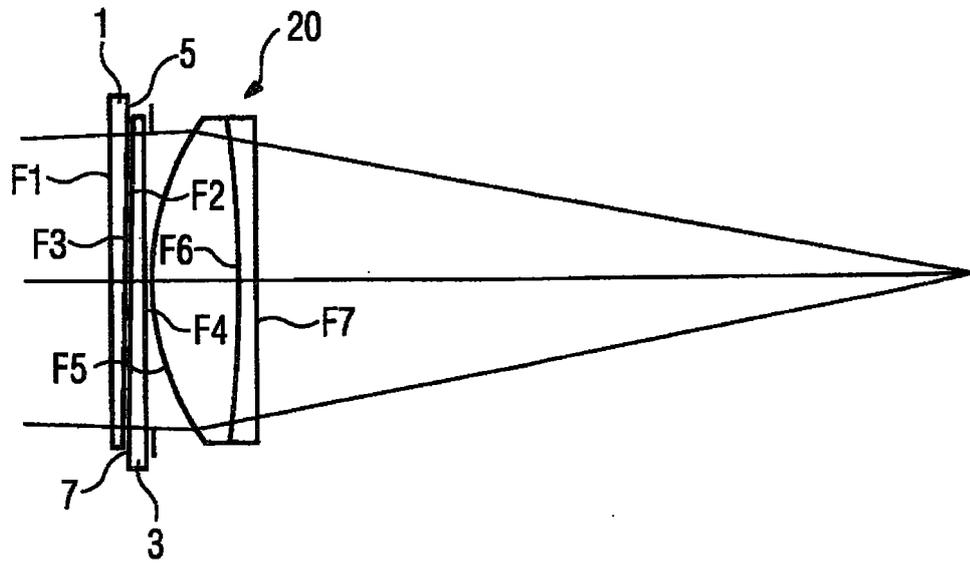
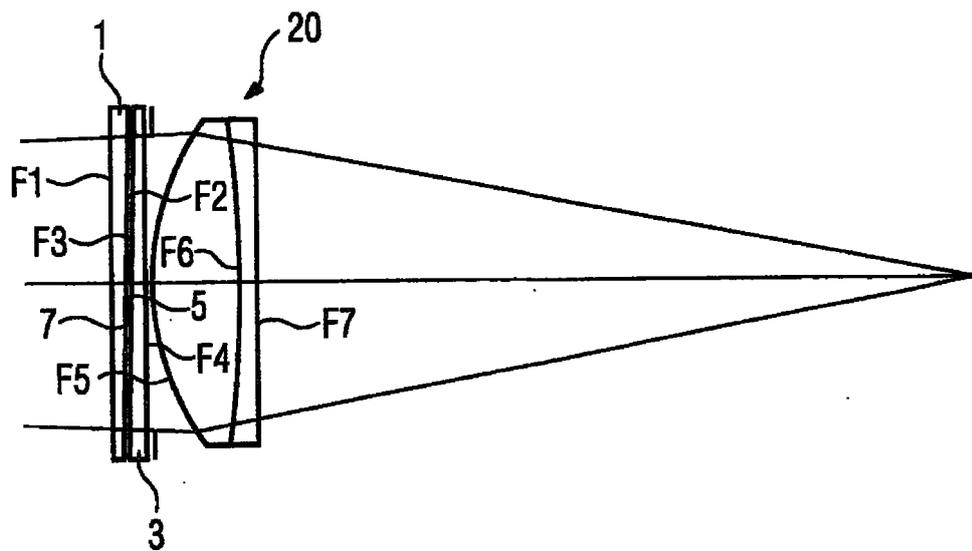


FIG 11



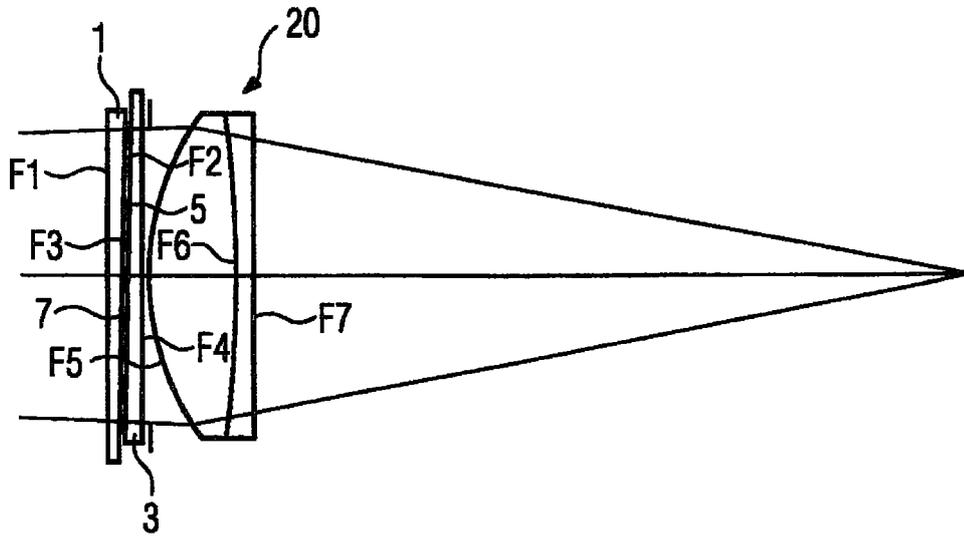
Position: 2

FIG 12



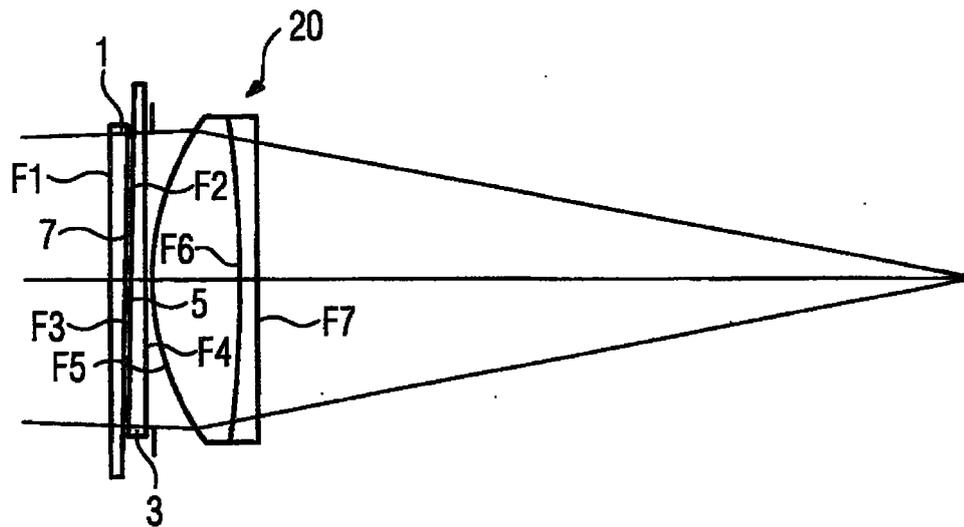
Position: 3

FIG 13



Position: 4

FIG 14



Position: 5

FIG 15

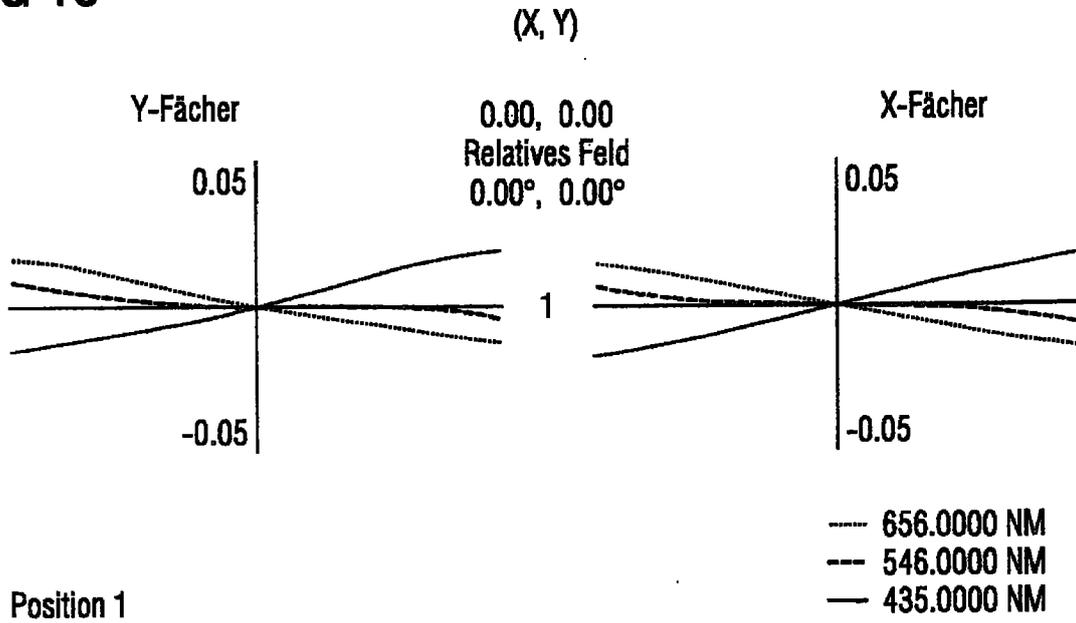


FIG 16

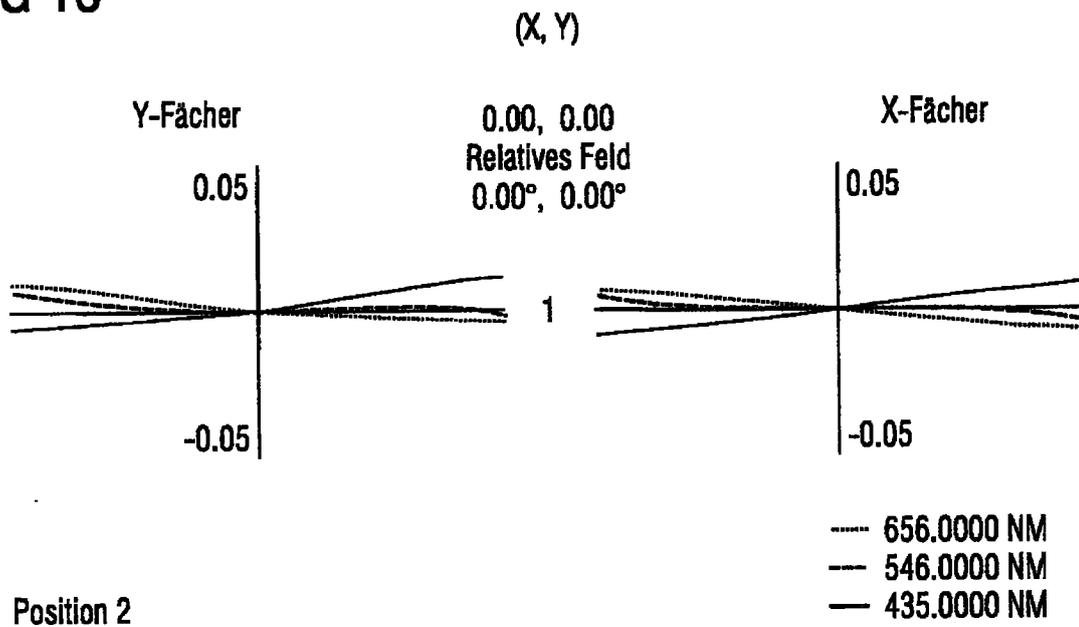


FIG 17

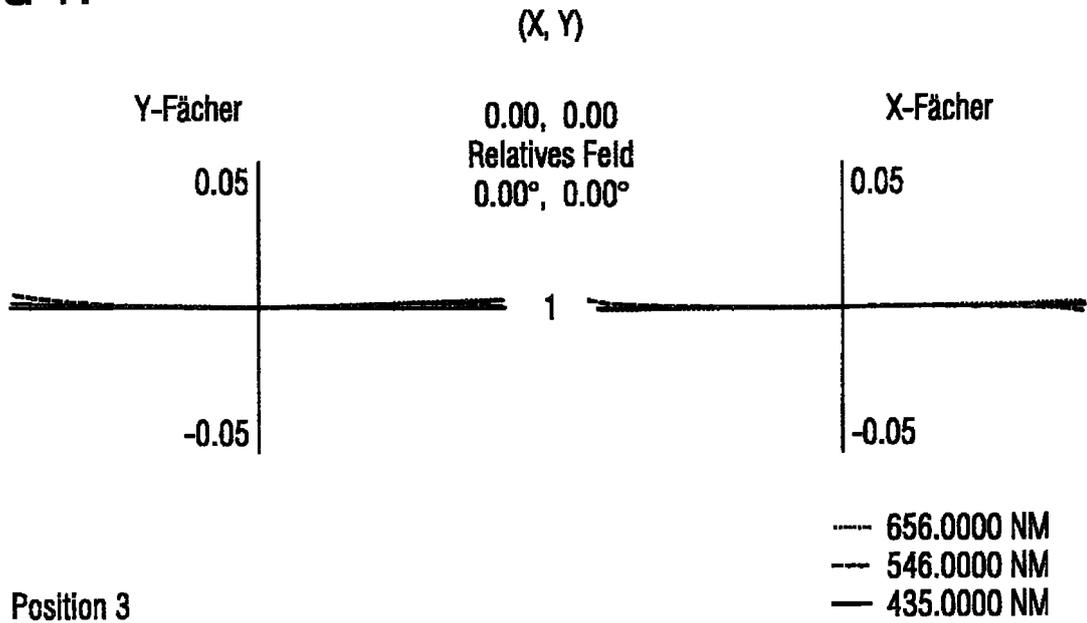


FIG 18

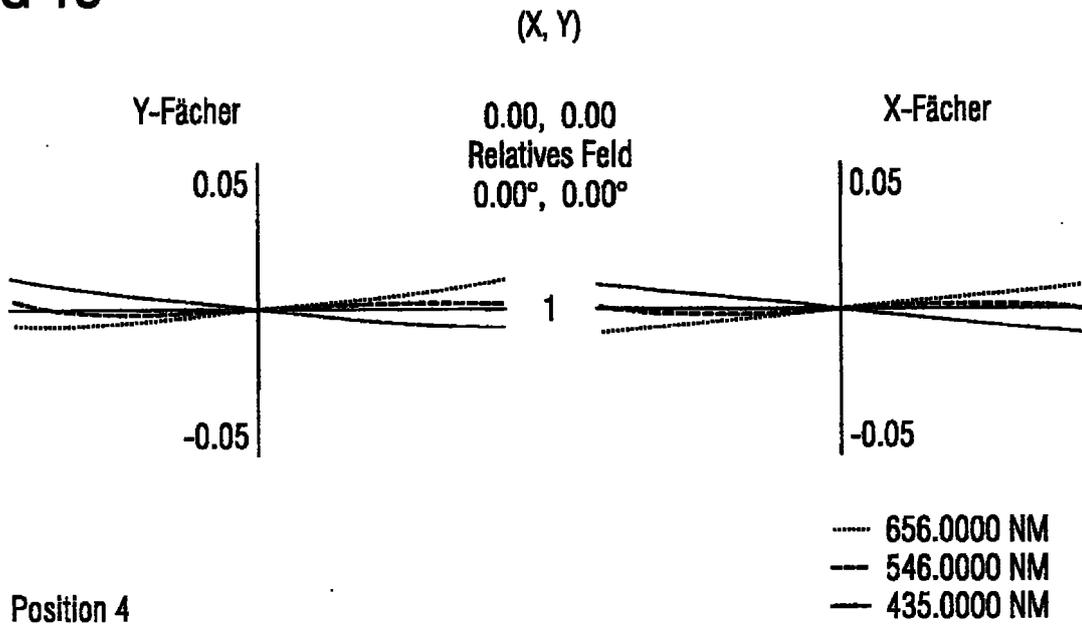


FIG 19

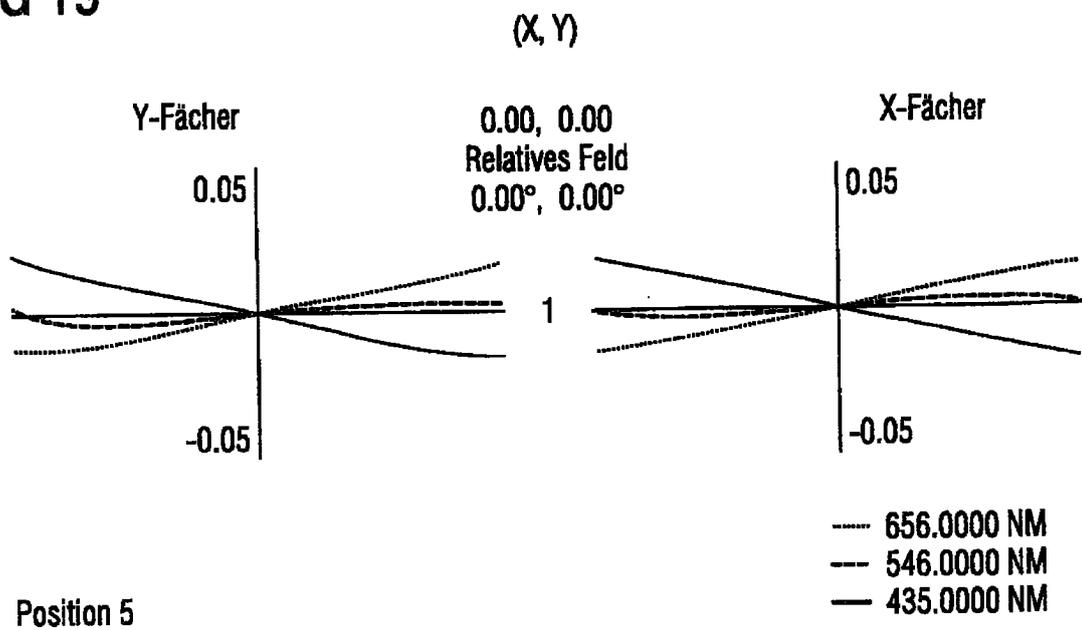


FIG 20

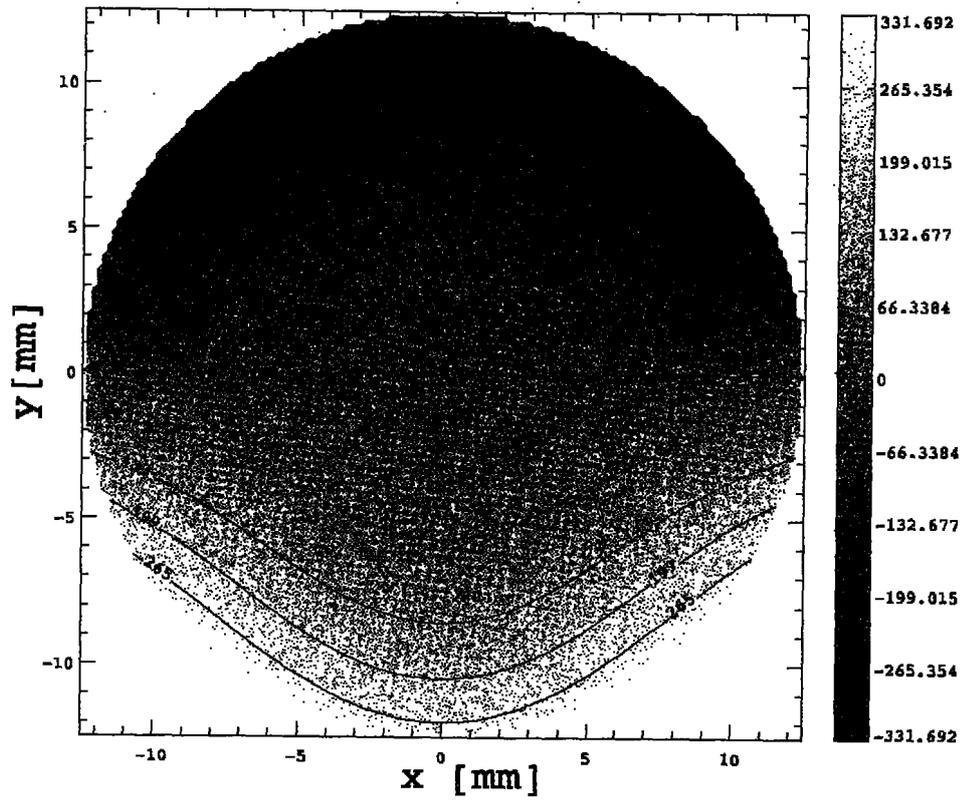


FIG 21

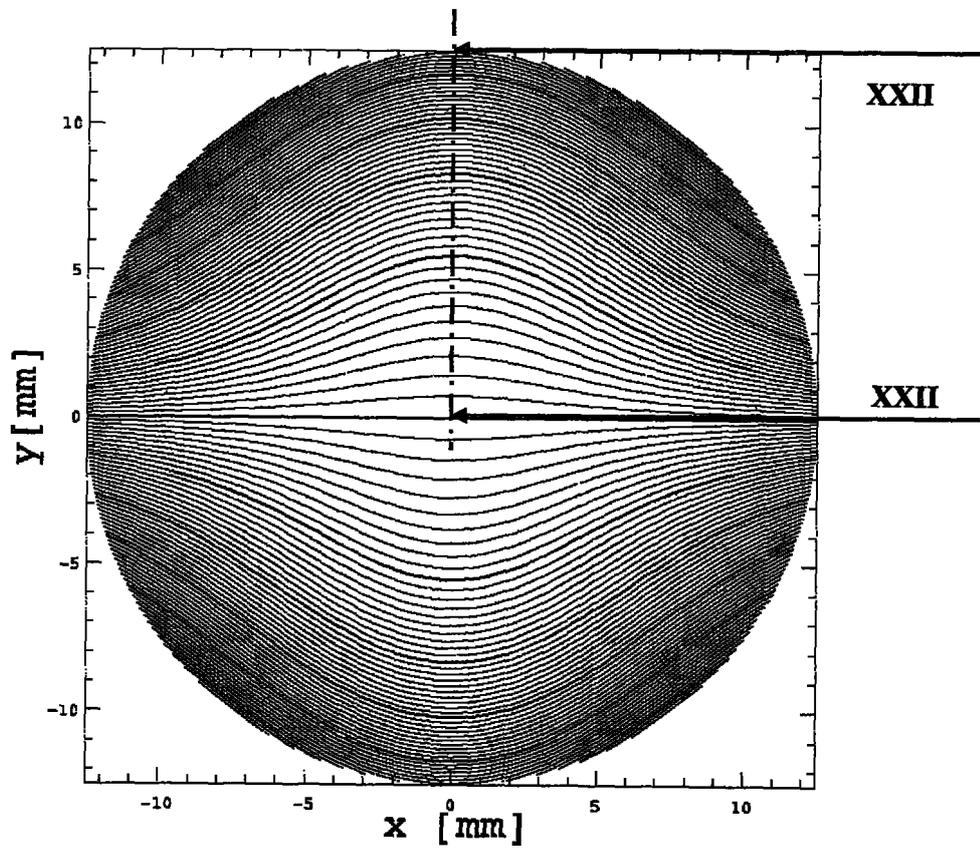


FIG 22

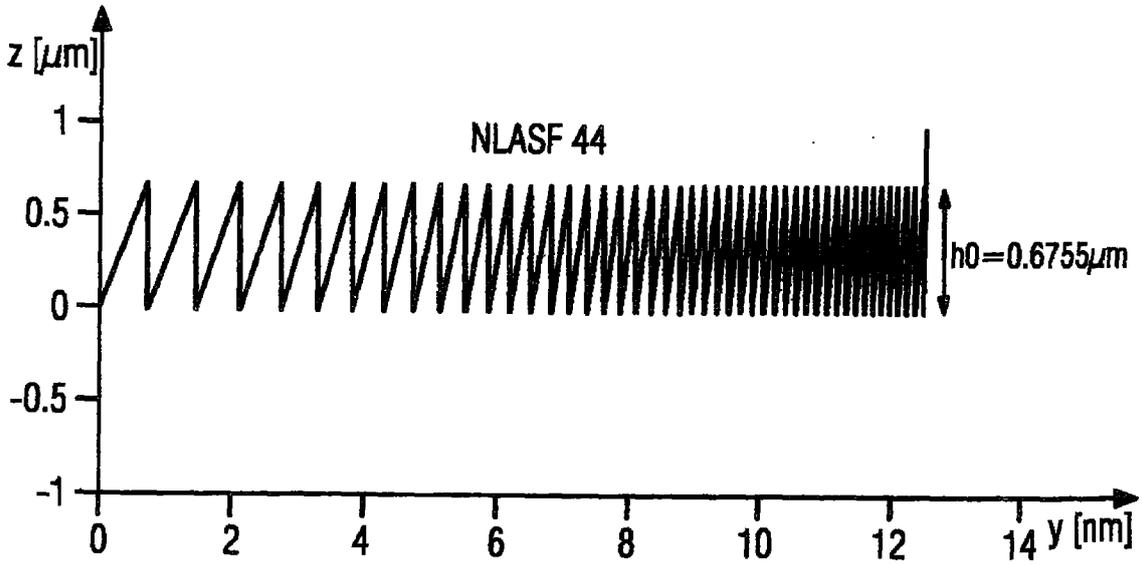


FIG 23

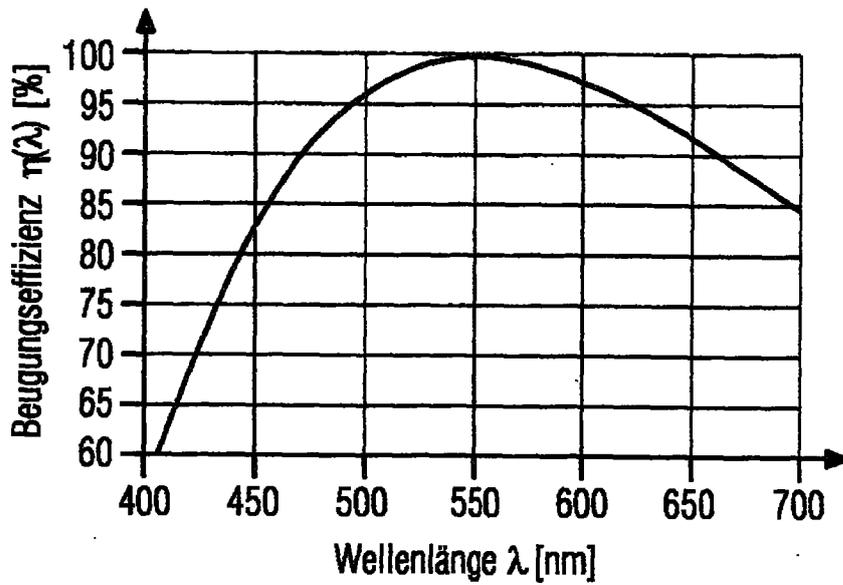


FIG 24

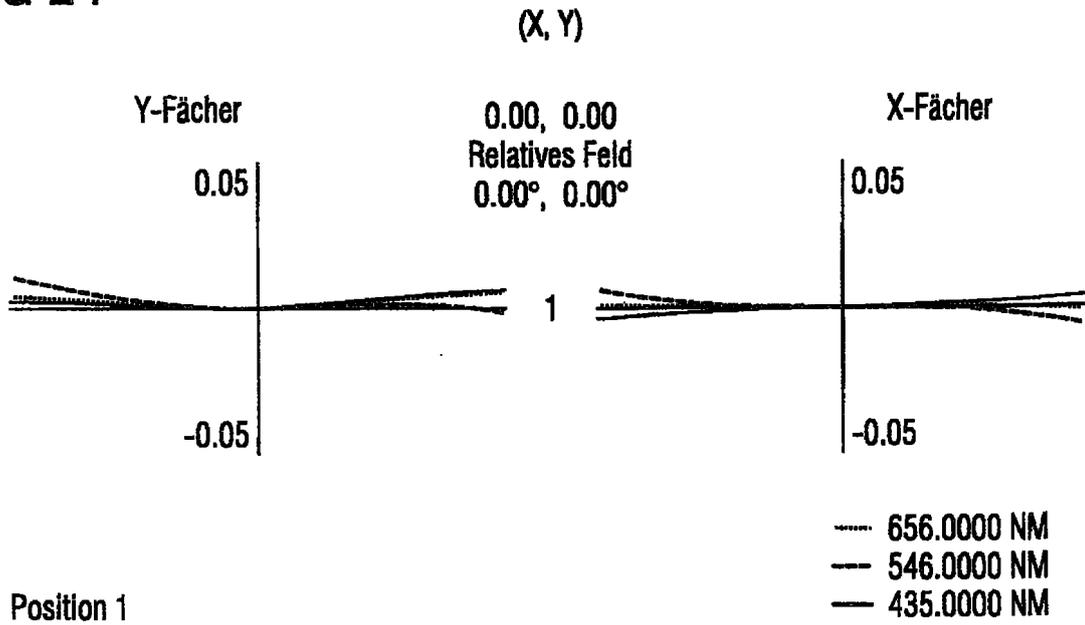


FIG 25

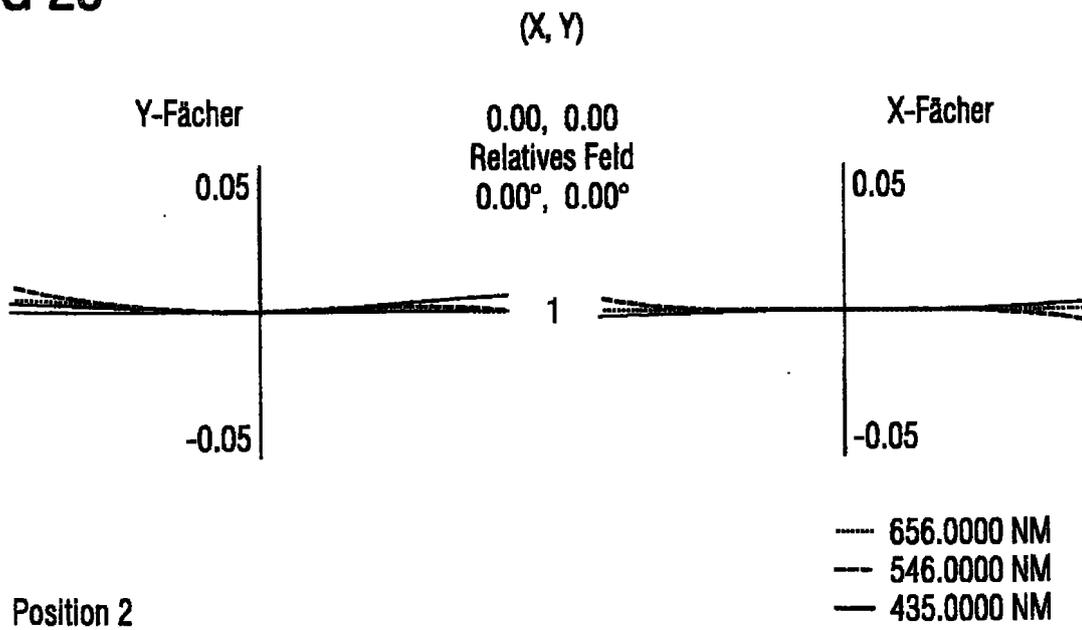


FIG 26

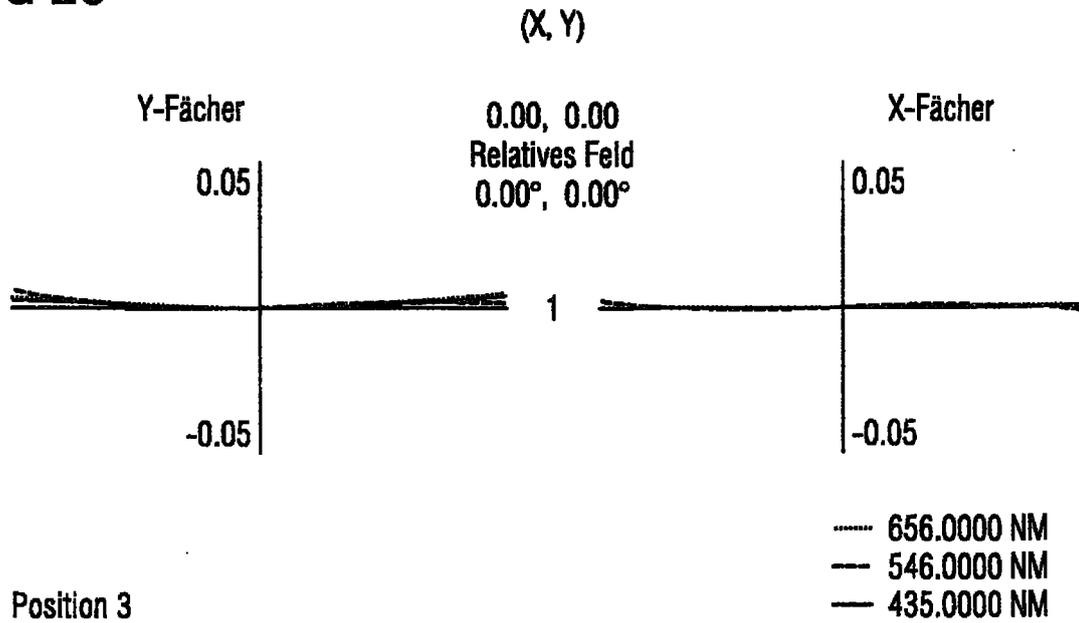


FIG 27

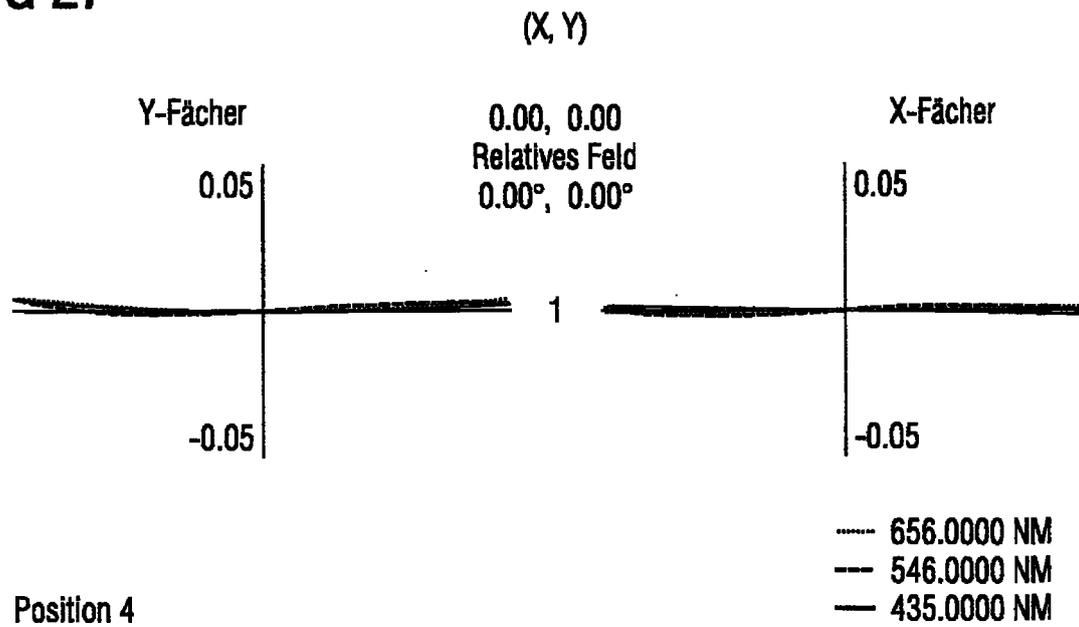


FIG 28

