



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2014 118 383.5**

(22) Anmeldetag: **11.12.2014**

(43) Offenlegungstag: **16.06.2016**

(51) Int Cl.: **G02B 13/18 (2006.01)**

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

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

(72) Erfinder:
**Pretorius, Marco, Dr., 73447 Oberkochen, DE;
Blahnik, Vladan, 73447 Oberkochen, DE**

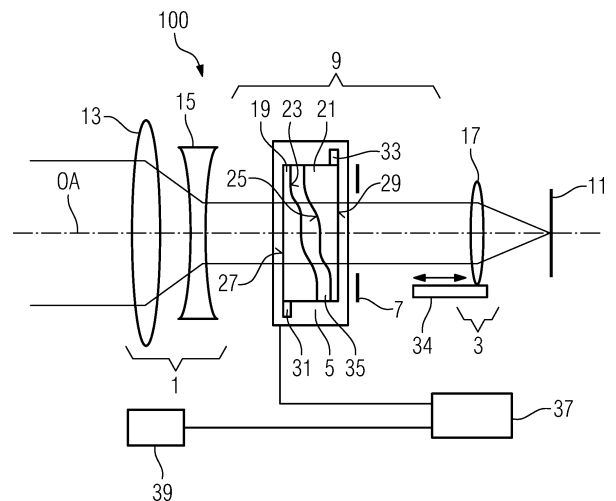
(56) Ermittelte Stand der Technik:
DE 10 2013 101 711 A1

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Objektiv für eine Foto- oder Filmkamera und Verfahren zum gezielten Dämpfen bestimmter Raumfrequenzbereiche der Modulations-Transfer-Funktion eines derartigen Objektivs**

(57) Zusammenfassung: Es wird ein Objektiv für eine Foto- oder Filmkamera zur Verfügung gestellt. Das Objektiv umfasst eine erste Linsenanordnung (1), wenigstens eine zweite Linsenanordnung (3) und wenigstens einen Wellenfrontmanipulator (5). Die erste Linsenanordnung (1) und die zweite Linsenanordnung (3) sind entlang einer optischen Achse (OA) des Objektivs voneinander beabstandet angeordnet, so dass zwischen der ersten Linsenanordnung (1) und der zweiten Linsenanordnung (3) ein Zwischenraum (9) vorhanden ist. Der Wellenfrontmanipulator (5) befindet sich im Zwischenraum (9) zwischen der ersten Linsenanordnung (1) und der zweiten Linsenanordnung (3). Er umfasst wenigstens zwei optische Komponenten (19, 21), die gegenläufig zueinander senkrecht zur optischen Achse (OA) des Objektivs verschiebbar angeordnet sind und jeweils wenigstens eine Freiformfläche (23, 25) aufweisen. Der Wellenfrontmanipulator (5) weist eine Nullstellung auf, in der seine optischen Komponenten (19, 21) keine Bildfehler in den Abbildungseigenschaften des Objektivs hervorrufen, und Wirkstellungen, in denen die optischen Komponenten (19, 21) gegenläufig zueinander senkrecht zur optischen Achse (OA) des Objektivs aus der Nullstellung heraus verschoben sind und in denen die optischen Komponenten (19, 21) wenigstens eine sphärische Aberration in den Abbildungseigenschaften des Objektivs hervorrufen.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Objektiv für eine Foto- oder Filmkamera sowie eine Foto- oder Filmkamera. Daneben betrifft die Erfindung ein Verfahren zum gezielten Dämpfen bestimmter Raumfrequenzen der Modulations-Transfer-Funktion eines Objektivs für eine Foto- oder Filmkamera.

[0002] Moderne Foto- und Filmkameras besitzen inzwischen derart hoch auflösende Bildsensoren (z. B. sogenannte „4K“ (ca. 3840×2160 Pixel) oder sogar „8K“ (ca. 7680×4320 Pixel) bei Filmkameras und bis zu 40 Megapixel bei Spiegelreflexkameras), dass die damit erreichte Bildschärfe in Verbindung mit Objektiven höchster Bildgüte in verschiedenen Anwendungsszenarien sogar störend sein kann. Zwar wird die volle Bildauflösung für bestimmte Film-Genres oder spezielle Szenen gewünscht, etwa für Natur- oder Landschaftsaufnahmen, aber in anderen Szenen, beispielsweise Porträts, kann sie störend wirken.

[0003] Um eine störende Schärfe zu reduzieren, können Kameras mit Einrichtungen zum Erzielen eines einstellbaren Weichzeichner-Effekts versehen sein, etwa mit einer Software, die ein aufgenommenes Bild elektronisch weichzeichnet. Eine elektronische Weichzeichnung ist jedoch nicht vergleichbar mit einer rein optischen Weichzeichnung, da bei der rein optischen Weichzeichnung auch der Abstand des Objektes vom Objektiv in das Ergebnis mit eingeht und somit eine Art dreidimensionaler Effekt entsteht.

[0004] Eine rein optische Weichzeichnung kann mit sogenannten Weichzeichner-Objektiven erreicht werden, die typischerweise einstellbare Lufträume im Objektiv besitzen. Derartige Weichzeichner-Objektive besitzen jedoch auch unerwünschte Nebenwirkungen, da feldabhängige Bildfehler wie Koma oder Astigmatismus generiert werden. Außerdem ist es bei dieser Umsetzung schwierig zu vermeiden, dass durch variable Lufträume außer der erwünschten sphärischen Aberration auch eine Defokussierung entsteht, die nur mit hohem Aufwand über Datentabellen und einer komplizierteren Konstruktion des Systems kompensiert werden kann. Objektive mit einstellbaren Lufträumen erreichen daher aufgrund der bestehenden Kopplungen zwischen dem Weichzeichner-Effekt und den feldabhängigen Bildfehlern die ursprüngliche maximale Bildschärfe des Objektivs nicht oder nur mit erheblichem Zusatzaufwand, d. h. mit zusätzlichen Linsen.

[0005] Es ist daher Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Objektiv für Foto- oder Filmkameras zur Verfügung zu stellen, mit dem sich in vorteilhafter Weise ein Weichzeichner-Effekt realisieren lässt.

[0006] Eine weitere Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, eine vorteilhafte Foto- oder Filmkamera zur Verfügung zu stellen.

[0007] Schließlich ist es noch eine weitere Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein vorteilhaftes Verfahren zum gezielten Dämpfen bestimmter Raumfrequenzbereiche von Modulations-Transfer-Funktionen eines Objektivs für Foto- oder Filmkameras zur Verfügung zu stellen.

[0008] Die erste Aufgabe wird durch ein Objektiv nach Anspruch 1 gelöst, die zweite Aufgabe durch eine Foto- oder Filmkamera nach Anspruch 17 und die dritte Aufgabe durch ein Verfahren nach Anspruch 18. Die abhängigen Ansprüche enthalten vorteilhafte Ausgestaltungen der vorliegenden Erfindung.

[0009] Ein erfindungsgemäßes Objektiv für eine Foto- oder Filmkamera umfasst eine erste Linsenordnung, wenigstens eine zweite Linsenordnung und wenigstens einen Wellenfrontmanipulator. Die erste und die zweite Linsenordnung können dabei jeweils entweder aus einer einzigen Linse oder vorzugsweise mehreren Linsen bestehen. Die erste Linsenordnung und die zweite Linsenordnung sind entlang einer optischen Achse des Objektivs voneinander beabstandet angeordnet, so dass zwischen der ersten Linseneinheit und der zweiten Linseneinheit ein Zwischenraum vorhanden ist. In diesem Zwischenraum befindet sich der Wellenfrontmanipulator. Dieser umfasst wenigstens zwei optische Komponenten, die gegenläufig zueinander senkrecht zur optischen Achse des Objektivs verschiebbar angeordnet sind und jeweils eine Freiformfläche aufweisen. Der Wellenfrontmanipulator weist eine Nullstellung auf, in der seine optischen Komponenten keine Bildfehler in den Abbildungseigenschaften des Objektivs herbeiführen. Außerdem weist der Wellenfrontmanipulator Wirkstellungen auf, in denen die optischen Komponenten gegenläufig zueinander senkrecht zur optischen Achse des Objektivs aus der Nullstellung heraus verschoben sind und in denen die optischen Komponenten wenigstens eine sphärische Aberration in den Abbildungseigenschaften des Objektivs hervorrufen.

[0010] Im erfindungsgemäßen Objektiv ermöglicht es der Wellenfrontmanipulator, die sphärische Aberration bei einer vorgegebenen Bezugswellenlänge gezielt zu beeinflussen und dabei andere monochromatische Bildfehler wie Koma und Astigmatismus unbeeinflusst zu lassen. Insbesondere kann mit Hilfe des Wellenfrontma-

nipulators eine beliebige, fest vorgegebene Linearkombination von die verschiedene Ordnungen von sphärischer Aberration beschreibenden Zernike-Koeffizienten (Z9, Z16, Z25 und noch ggf. höhere Terme) einstellbar beeinflusst werden. Auf diese Weise ist es möglich, in dem erfindungsgemäßen Objektiv bestimmte Raumfrequenzbereiche der Modulations-Transfer-Funktion (z. B. oberhalb von zehn Linienpaaren pro Millimeter) gezielt zu beeinflussen und insbesondere auch geeignet zu dämpfen, so dass ein in der Stärke einstellbarer Weichzeichner-Effekt entsteht. Außerdem kann ohne Probleme das Vorzeichen der erzeugten sphärischen Aberration umgekehrt werden, wodurch sich unterschiedliche Wirkungen im Vorder- und Hintergrund ergeben, die ebenfalls für gestalterische Zwecke genutzt werden können. Das Umkehren des Vorzeichens erfolgt dabei durch Umkehren der Bewegungsrichtung der optischen Komponenten des Wellenfrontmanipulators. Mit Weichzeichner-Objektiven nach Stand der Technik ist es dagegen häufig nicht möglich, das Vorzeichen der sphärischen Aberration einfach umzukehren. Mit Hilfe des erfindungsgemäßen Objektivs lässt sich ein großer Einstellbereich mit sehr homogener Abbildungscharakteristik erzielen, und dies für nahezu jeden Objektivtyp und damit für eine komplette Brennweitenreihe.

[0011] Die erfindungsgemäße Ausgestaltung des Objektivs ermöglicht es zudem, jedes Objektiv, welches einen geeigneten Zwischenraum zwischen der ersten Linsenordnung und der zweiten Linsenordnung aufweist, mit Hilfe eines Wellenfrontmanipulators zu einem erfindungsgemäßen Objektiv umzubauen. Bei den Weichzeichner-Objektiven nach dem Stand der Technik müssen dagegen abstimmbare Lufträume a priori in der optischen und mechanischen Konstruktion vorgesehen werden, so dass ein Nachrüsten eines Objektivs ohne Weichzeichner-Effekt zu einem Weichzeichner-Objektiv nach Stand der Technik nicht möglich ist. Aufgrund der a-priori-Berücksichtigung der Lufträume in der optischen und mechanischen Konstruktion ist zudem der Konstruktionsaufwand bei der Konstruktion von Weichzeichner-Objektiven nach dem Stand der Technik höher als bei einem erfindungsgemäßen Objektiv.

[0012] Bildfehler werden ausgehend von der paraxialen Optik klassifiziert. In der paraxialen Optik werden nur solche Lichtstrahlen betrachtet, die einen kleinen Abstand von der optischen Achse und höchstens einen kleinen Winkel zur optischen Achse aufweisen (so dass die Näherung $\sin\theta \approx \tan\theta \approx \theta$ Verwendung finden kann). Dabei wird der Sinus des Winkels zur optischen Achse durch das erste Glied einer Taylorentwicklung angenähert. In dieser Näherung treten keine Bildfehler auf. Wenn man über die paraxiale Optik hinausgeht, werden höhere Terme der Taylorentwicklung des Sinus des Winkels berücksichtigt. Der nächsthöhere Term ist dabei die dritte Potenz des Winkels, der darauf folgende nächst höhere Term die fünfte Potenz des Winkels. Bei einer weiteren Entwicklung treten immer mehr ungerade Terme des Winkels auf. Eine sphärische Aberration, die aus dem zweiten Term der Taylorentwicklung, also den Term mit der dritten Potenz des Winkels, hervorgeht, wird sphärische Aberration dritter Ordnung genannt, eine sphärische Aberration, die aus dem dritten Term der Taylorentwicklung, also dem Term mit der fünften Potenz des Winkels, hervorgeht, sphärische Aberration fünfter Ordnung und so weiter.

[0013] Im erfindungsgemäßen Objektiv ruft der Wellenfrontmanipulator in den Wirkstellungen seiner optischen Komponenten wenigstens eine sphärische Aberration dritter Ordnung in den Abbildungseigenschaften des Objektivs hervor. Zusätzlich oder alternativ ruft der Wellenfrontmanipulator in den Wirkstellungen seiner optischen Komponenten wenigstens eine sphärische Aberration fünfter Ordnung in den Abbildungseigenschaften des Objektivs hervor.

[0014] In einer vorteilhaften Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Objektivs sind die Freiformflächen in einem kartesischen Koordinatensystem mit einer x-Achse, einer y-Achse und einer z-Achse definiert, wobei die z-Achse die optische Achse des Objektivs darstellt und die z-Koordinaten einer Freiformfläche in Abhängigkeit von den x- und y-Koordinaten durch eine Polynomentwicklung der Form

$$z = \sum_{m,n=0}^{\infty} C_{m,n} x^m y^n$$

beschrieben werden. Dabei bezeichnen $C_{m,n}$ den Entwicklungskoeffizienten der Polynomentwicklung der jeweiligen Freiformfläche in der Ordnung m bzgl. der x-Koordinate und der Ordnung n bzgl. der y-Koordinate. Die Bewegungsrichtung der optischen Komponenten mit den Freiformflächen verläuft dabei parallel zur y-Achse. In dieser Darstellung der Freiformflächen weisen nur Polynome mit ungerader Ordnung n und gerader Ordnung m von Null verschiedene Entwicklungskoeffizienten $C_{m,n}$ auf. Obwohl diese Darstellung der Freiformflächen nicht die einzig mögliche Darstellung ist, ermöglicht sie eine relativ einfache Berechnung der für das Herbeiführen der sphärischen Aberration benötigten Flächen.

[0015] Wenn wenigstens die Entwicklungskoeffizienten der Polynome x^4y , x^2y^3 und y^5 von Null verschieden sind, lässt sich eine sphärische Aberration dritter Ordnung hervorrufen. Eine sphärische Aberration fünfter Ordnung lässt sich hervorrufen, wenn wenigstens die Entwicklungskoeffizienten der Polynome x^6y , x^4y^3 , x^2y^5 und y^7 von Null verschieden sind. Insbesondere lässt sich sowohl eine sphärische Aberration dritter Ordnung als auch eine sphärische Aberration fünfter Ordnung hervorrufen, wenn die beiden vorgenannten Polynomgruppen von Null verschiedene Koeffizienten aufweisen. Wenn außerdem die Entwicklungskoeffizienten der Polynome x^2y und y^3 von Null verschieden sind, lässt sich durch gegenläufiges Verschieben der optischen Komponenten mit den Freiformflächen neben der sphärischen Aberration dritter und/oder fünfter Ordnung auch ein Defokus hervorrufen. Mittels dieses Defokus kann ein Nachfokussieren bei Veränderung der Blendenöffnung vermieden werden. Zusätzlich oder alternativ zum Defokus kann auch ein sogenannter Kippterm realisiert werden, wenn auch der Entwicklungskoeffizient des Polynoms y von Null verschieden ist. Ein solcher Kippterm, dessen optische Wirkung nahe Null ist, kann dazu verwendet werden, um die mittlere Profiltiefe gering zu halten und somit eine flache Form der Freiformprofile zu ermöglichen.

[0016] Im erfindungsgemäßen Objektiv kann sich im Zwischenraum zwischen der ersten Linsenordnung und der zweiten Linsenordnung eine gegenständliche Aperturblende befinden. Der Wellenfrontmanipulator befindet sich dann vor oder hinter der gegenständlichen Aperturblende. Wenn eine im Wesentlichen beugungsbegrenzte Bildgüte bei Nullstellung des Wellenfrontmanipulators erzielt werden soll, befindet sich der Wellenfrontmanipulator möglichst nahe an der Blende und möglichst in einem kollimierten Strahlengang. Bei Objektiven, deren Korrektur weit von der Beugungsbegrenzung entfernt ist, sind dagegen auch größere Entfernungen des Wellenfrontmanipulators von der Aperturblende möglich. Die maximal zulässigen Abweichungen von der Kollimationsbedingung hängt dabei von zahlreichen Parametern wie insbesondere der Öffnungszahl des Objektivs, dem Einstellbereich des Wellenfrontmanipulators und der Bildgüteanforderung ab. Die Anordnung des Wellenfrontmanipulators im kollimierten Strahlengang hat den Vorteil, dass dann die Einfallswinkel auf die Freiformflächen relativ klein werden und dadurch induzierte asymmetrische Fehler minimiert werden. Induzierte asymmetrische Bildfehler können auftreten, wenn die Strahleinfallshöhen an der ersten und an der zweiten Freiformfläche bei einem endlichen Abstand zwischen den Elementen einen Versatz aufweisen. Der Versatz ist dabei umso größer, je größer der Abstand zwischen den Elementen und je größer der Einfallswinkel der Strahlen auf die Freiformflächen ist. Bei einer Anordnung im kollimierten Strahlengang sind die Einfallswinkel der Strahlen für das Mittenbündel gleich Null und für die feldabhängigen Bündel sind sie zumindest minimiert, so dass induzierte asymmetrische Fehler unterdrückt werden. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass einem Fachmann klar ist, dass mit einem optischen System ein exakt kollimierter Strahlengang nicht zu erzeugen ist, sondern nur näherungsweise erzeugt werden kann.

[0017] Statt einer gegenständlichen Aperturblende kann sich im Zwischenraum zwischen der ersten Linsenordnung und der zweiten Linsenordnung auch eine virtuelle Aperturblende befinden. In diesem Fall kann der Wellenfrontmanipulator unmittelbar am Ort der virtuellen Aperturblende angeordnet sein, so dass sich in dieser Ausgestaltung die größtmögliche Blendennähe des Wellenfrontmanipulators realisieren lässt.

[0018] In einer vorteilhaften Weiterbildung des erfindungsgemäßen Objektivs weist dieses eine Erfassungseinheit zum Erfassen mindestens einer für das Ermitteln einer geeigneten Wirkstellung der optischen Komponenten des Wellenfrontmanipulators relevanten Einflussgröße des Objektivs auf. Außerdem weist das Objektiv eine Berechnungseinheit zum Berechnen der Verschiebewege der optischen Komponenten des Wellenfrontmanipulators zum Erreichen der Wirkstellung ausgehend von der Nullstellung auf der Basis der erfassten Einflussgröße und des gewünschten Grades an sphärischer Aberration auf, oder dem Objektiv ist eine derartige Berechnungseinheit zugeordnet. Typische Einflussgrößen sind hierbei die Blendenstellung sowie die Entfernungseinstellung des Objektivs. Die Berechnungseinheit kann ein fest mit dem Objektiv verbundenes Messmodul, z. B. in Form eines EPROM, sein, welches ein Kennfeld der erforderlichen Stellgrößen in Abhängigkeit von der gewünschten Wirkung des Wellenfrontmanipulators und der jeweils vorliegenden Blenden- und Entfernungseinstellung enthält. Alternativ kann die Berechnungseinheit auch eine Software sein, die von der Steuer Elektronik der Kamera ausgeführt wird.

[0019] Um bei Änderung der Blendenöffnung ggf. nachfokussieren zu können, kann das Objektiv eine Aktorik zum Verschieben wenigstens eines Teils einer der Linsenordnungen entlang der optischen Achse aufweisen. Auch zum gegenläufigen Verschieben der optischen Komponenten mit den Freiformflächen senkrecht zur optischen Achse kann eine geeignete Aktorik vorhanden sein. Hierbei kann es sich insbesondere um eine Aktorik mit elektrisch ansteuerbaren Aktoren handeln wobei die Aktoren die von der Berechnungseinheit berechneten Stellwege realisieren. Als Aktoren können beispielsweise Mikromotoren, Ultraschall-Motoren oder piezoelektrische Aktoren Verwendung finden.

[0020] Im erfindungsgemäßen Objektiv können die optischen Komponenten mit den Freiformflächen aus einem Material mit einer Abweichung der Brechzahldispersion von der Normalgeraden hergestellt sein. Eine derartige Abweichung der Brechzahldispersion von der Normalgeraden führt zu einer anormalen Teildispersion, wie sie beispielsweise durch die Verwendung von Langkron- oder Kurzflintgläsern realisierbar ist. In dieser Ausgestaltung lassen sich sekundäre chromatische Aberrationen gezielt einstellbar machen.

[0021] Zwischen den optischen Komponenten mit den Freiformflächen kann sich ein Immersionsmedium befinden. Dadurch wird es möglich, eine vorgegebene Wellenlängenabhängigkeit der durch den Wellenfrontmanipulator hervorgerufenen sphärischen Aberration einzustellen. Insbesondere kann beispielsweise eine achromatische Wirkung des Wellenfrontmanipulators, also eine zumindest nahezu gleiche Wirkung für alle Wellenlängen eines Wellenlängenbereiches, erzielt werden. Das Immersionsmedium kann dabei einen von der Normalgeraden abweichenden Dispersionsverlauf aufweisen, wodurch sich gezielt sekundäre achromatische Aberrationen einstellen lassen. Durch Kombination geeigneter Materialien der optischen Komponenten mit anormaler Teildispersion mit Immersionsmedien, die eine anormale Teildispersion aufweisen, lassen sich tertiäre chromatische Aberrationen mit dem Wellenfrontmanipulator einstellbar machen.

[0022] In dem erfindungsgemäßen Objektiv ist es grundsätzlich möglich, auch mehrere Wellenfrontmanipulatoren miteinander zu kombinieren, so dass beispielsweise ein Wellenfrontmanipulator zum Einstellen der sphärischen Aberration dritter Ordnung und ein weiterer Wellenfrontmanipulator zum Einstellen der sphärischen Aberration fünfter Ordnung vorhanden sind. Dadurch wird es möglich, bei jeder Blendenposition ein exakt gleiches Verhältnis von sphärischer Aberration dritter Ordnung zu sphärischer Aberration fünfter Ordnung zur Verfügung zu stellen, obwohl die sphärische Aberration fünfter Ordnung beim Abblenden des Objektivs schneller reduziert wird, als die sphärische Aberration dritter Ordnung. Ein zusätzlicher Wellenfrontmanipulator kann aber auch zum Einstellbar machen einer chromatischen Aberration wie beispielsweise eines Farblängsfehlers oder eines Gaußfehlers in den Zwischenraum zwischen den Linsenanordnungen eingebracht sein. Dieser zusätzliche Wellenfrontmanipulator kann dann auch optische Komponenten aus einem Material mit anormaler Teildispersion und/oder ein Immersionsmedium mit anormaler Teildispersion oder ohne anormale Teildispersion umfassen.

[0023] Im erfindungsgemäßen Objektiv ist es vorteilhaft, wenn der wenigstens eine Wellenfrontmanipulator aus dem Objektiv entnehmbar ist. Das Objektiv kann so auch ohne den Wellenfrontmanipulator genutzt werden, wobei es eine optimale Abbildungsschärfe besitzt. Der Wellenfrontmanipulator kann dann bei Bedarf als Zusatzmodul zum Ermöglichen des gezielten Herbeiführens einer sphärischen Aberration in das Objektiv eingefügt werden.

[0024] Wie bereits beschrieben, kann das erfindungsgemäße Objektiv durch Herbeiführen einer gezielten sphärischen Aberration zum Weichzeichnen herangezogen werden. Es besteht aber auch die Möglichkeit, ein Bokeh herbeizuführen. Insbesondere ist hierbei hervorzuheben, dass das erfindungsgemäße Objektiv die Möglichkeit eröffnet, mit Hilfe einer negativen oder einer positiven sphärischen Aberration entweder den Vordergrund oder den Hintergrund des Objektes weich zu zeichnen, indem die Bewegungsrichtung der optischen Komponenten mit den Freiformflächen umgekehrt wird.

[0025] Schließlich kann das Herbeiführen einer gezielten sphärischen Aberration auch zum Herbeiführen eines Anti-Aliasing Verwendung finden. Auf einen Tiefpassfilter, wie er im Stand der Technik in der Regel zum Anti-Aliasing zum Einsatz kommt, kann dann verzichtet werden. Alternativ können verbleibende Reststrukturen bei Verwendung von Tiefpassfiltern unterdrückt werden. Darüber hinaus können, insbesondere bei Verzicht auf den Tiefpassfilter aus einem Stapel doppelbrechender Platten, bereits direkt vor der Aufnahme auf einem geeigneten Display oder Monitor störende Moiré-Effekte oder unerwünschte feine Bildstrukturen unterdrückt werden und damit eine gewünschte Bildwirkung gezielt eingestellt werden.

[0026] Da verschiedene Kamerahersteller unterschiedlich dicke Filterplatten (bzw. auch aus Materialien verschiedener Brechungsindizes) zum Anti-Aliasing verwenden, verbleibt bei Verwendung des gleichen Objektivs in verschiedenen Kameras in der Bildmitte eine unterschiedliche sphärische Aberration. Beim erfindungsgemäßen Objektiv mit variabler Einstellung der sphärischen Aberration kann dieser Fehler für die jeweilige Kamera kompensiert werden. Erfindungsgemäß wird außerdem ein Verfahren zum gezielten Dämpfen bestimmter Raumfrequenzbereiche der Modulations-Transfer-Funktion eines erfindungsgemäßen Objektivs zur Verfügung gestellt. In diesem Verfahren wird durch gegenläufiges Verschieben der Freiformflächen senkrecht zur optischen Achse des Objektivs eine sphärische Aberration, insbesondere einer sphärischen Aberration dritter Ordnung und/oder einer sphärischen Aberration fünfter Ordnung gezielt herbeigeführt. Die mit dem Verfahren erzielbaren Vorteile sind bereits mit Bezug auf das erfindungsgemäße Objektiv beschrieben worden.

[0027] Weitere Merkmale, Eigenschaften und Vorteile der vorliegenden Erfindung ergeben sich aus den nachfolgenden Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die beiliegenden Figuren.

[0028] **Fig. 1** zeigt stark schematisiert eine Fotokamera mit einem erfindungsgemäßen Objektiv mit einem Wellenfrontmanipulator.

[0029] **Fig. 2** zeigt die optischen und elektronischen Komponenten des erfindungsgemäßen Objektivs in einer schematischen Darstellung.

[0030] **Fig. 3 bis Fig. 5** zeigen den Wellenfrontmanipulator aus dem in **Fig. 1** dargestellten Objektiv in verschiedenen Stellungen seiner optischen Komponenten.

[0031] **Fig. 6** zeigt das Profil der Freiformfläche einer optischen Komponente des Wellenfrontmanipulators gemäß einer ersten konkreten Ausführungsform für das erfindungsgemäße Objektiv.

[0032] **Fig. 7** zeigt das Objektiv der ersten konkreten Ausführungsform mit dem Wellenfrontmanipulator in Nullstellung.

[0033] **Fig. 8** zeigt das Objektiv der ersten konkreten Ausführungsform mit dem Wellenfrontmanipulator in einer Wirkstellung.

[0034] **Fig. 9** zeigt die Freiformfläche eines abgewandelten Wellenfrontmanipulators, wie er in der ersten konkreten Ausführungsform für das erfindungsgemäße Objektiv Verwendung finden kann.

[0035] **Fig. 10** zeigt das Profil der Freiformfläche einer optischen Komponente des Wellenfrontmanipulators gemäß einer zweiten konkreten Ausführungsform für das erfindungsgemäße Objektiv.

[0036] **Fig. 11** zeigt das Objektiv gemäß der zweiten konkreten Ausführungsform mit dem Wellenfrontmanipulator in Nullstellung.

[0037] **Fig. 12** zeigt das Objektiv gemäß der zweiten konkreten Ausführungsform mit dem Wellenfrontmanipulator in einer Wirkstellung.

[0038] Nachfolgend wird das erfindungsgemäße Objektiv zuerst anhand der **Fig. 1 bis Fig. 5** in seinen Grundzügen beschrieben, bevor konkrete Ausführungsbeispiele für das erfindungsgemäße Objektiv beschrieben werden.

[0039] Ein erfindungsgemäßes Objektiv **100** ist zusammen mit einer Kamera **101** schematisch in **Fig. 1** dargestellt. Die optischen Komponenten sowie die elektronischen Komponenten des Objektivs **100** sind zusammen mit der Bildebene der Kamera in **Fig. 2** dargestellt. Das Objektiv **100** umfasst eine erste Linsenordnung **1**, wenigstens eine zweite Linsenordnung **3** und wenigstens einen Wellenfrontmanipulator **5**, der im vorliegenden Ausführungsbeispiel in großer Nähe zu einer Aperturblende **7** angeordnet ist. Sowohl der Wellenfrontmanipulator **5** als auch die Aperturblende **7** befinden sich in einem Zwischenraum **9** zwischen der ersten Linsenordnung **1** und der zweiten Linsenordnung **3**. Außerdem ist eine Bildebene **11** dargestellt, die jedoch nicht mehr Teil des Objektivs ist, sondern bereits Teil der Fotokamera **101** oder der Filmkamera, an der das Objektiv **100** montiert ist.

[0040] In dem in **Fig. 2** dargestellten Ausführungsbeispiel umfasst die erste Linsenordnung **1** zwei Linsen **13, 15**, von denen die objektseitige Linse **13** eine sammelnde Linse und die bildseitige Linse **15** eine zerstreuende Linse ist. Sofern eine hinreichend große Objektweite vorliegt, erzeugt die erste Linsenordnung **1** bildseitig einen kollimierten, also parallelen Strahlengang, der schließlich von der zweiten Linsenordnung **3**, die im vorliegenden Ausführungsbeispiel lediglich eine Sammellinse **17** umfasst, auf den Bildsensor **11** fokussiert. Der zweiten Linsenordnung **3** ein Aktor **34** zugeordnet, mit dem sich diese Linsenordnung entlang der optischen Achse verschieben lässt, bspw. um bei Änderung der Blendenöffnung ggf. nachfokussieren zu können. Die mögliche Verschiebung der Linsenordnung **3** ist in **Fig. 2** durch einen Doppelpfeil angedeutet.

[0041] Im Zwischenraum **9**, in dem der kollimierte Strahlengang vorliegt, sind sowohl die Aperturblende **7** als auch der Wellenfrontmanipulator **5** angeordnet. Die Anordnung im kollimierten Strahlengang und in der Nähe der Aperturblende **7** erlaubt es mit dem Objektiv eine im Wesentlichen beugungsbegrenzte Bildgüte zu erzielen, wenn sich der Wellenfrontmanipulator **5** in Nullstellung befindet, wie dies in **Fig. 2** dargestellt ist. Bei Objekti-

ven, deren Korrektur weit von der Beugungsbegrenzung entfernt ist, können größere Abweichungen sowohl von der Kollimationsbedingung als auch im Abstand des Wellenfrontmanipulators **5** von der Aperturblende **7** realisiert werden. Die explizite Berechnung maximal zulässiger Abweichungen von der Kollimationsbedingung und des maximal zulässigen Abstands von der Aperturblende ist nur anhand zahlreicher Parameter wie beispielsweise der Öffnungszahl des Objektivs, der Einstellbereich des Manipulators, die Bildgüteeanforderung an das Objektiv, etc. möglich.

[0042] Der Wellenfrontmanipulator **5** wird nachfolgend mit Bezug auf die **Fig. 2** bis **Fig. 5** näher erläutert. Er umfasst eine erste optische Komponente **19** und eine zweite optische Komponente **21**, die in einer Ebene senkrecht zur optischen Achse OA des Objektivs gegenläufig zueinander verschoben werden können. Die erste optische Komponente **19** und die zweite optische Komponente **21** weisen jeweils eine Freiformfläche **23**, **25** auf. Zudem ist die von der Freiformfläche **23**, **25** abgewandte Fläche der jeweiligen optischen Komponente **19**, **21** als Planfläche **27** bzw. **29** ausgebildet. Im vorliegenden Ausführungsbeispiel sind die optischen Komponenten **19**, **21** derart orientiert, dass ihre Freiformflächen **23**, **25** einander zugewandt sind. Dabei sind die Profile der Freiformflächen vom Objekt aus in Richtung auf das Bild gesehen identisch. Mit anderen Worten, wenn die Profile als Abweichung von einer mittleren ebenen Fläche gesehen werden, wobei eine positive Abweichung in Richtung auf das Bild definiert ist und eine negative Abweichung in Richtung auf das Objekt, so weisen beide Freiformflächen **23**, **25** dieselben Abweichungen von dieser mittleren ebenen Fläche auf. Der Unterschied zwischen den beiden Freiformflächen besteht nun lediglich darin, dass die erste Freiformfläche **23** den Übergang vom Material der ersten optischen Komponente zu Luft und die zweite Freiformfläche **25** den Übergang von Luft zum Material der zweiten optischen Komponente **21** markiert. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass in den **Fig. 2** bis **Fig. 5** die Abweichungen der Freiformflächen von der mittleren ebenen Fläche sowie die Abstände zwischen den optischen Komponenten des Wellenfrontmanipulators zum Zwecke der besseren Darstellbarkeit stark übertrieben dargestellt sind.

[0043] In den **Fig. 2** und **Fig. 4** ist der Wellenfrontmanipulator **5** in der Nullstellung dargestellt. In dieser Stellung liegen sich die Freiformflächen **23** und **25** exakt gegenüber, so dass zwischen den beiden Flächen ein schmaler Spalt gebildet ist, wobei zwischen den Freiformflächen **23** und **25** an jeder Stelle des Spaltes der gleiche Abstand vorliegt. Auf diese Weise fungiert der Wellenfrontmanipulator **5** als optisches Nullelement, da eine an der ersten Freiformfläche **23** auftretende Brechung durch die zweite Freiformfläche **25** durch eine gegenläufige Brechung wieder ausgeglichen wird. Als optisches Nullelement hat der Wellenfrontmanipulator **5** in der Nullstellung daher keine wesentliche Auswirkung auf die mit dem Objektiv generierte Abbildung.

[0044] Jeder optische Komponente **19**, **21** des Wellenfrontmanipulators **5** ist ein Aktor **31** bzw. **33** zugeordnet, mit dessen Hilfe die optischen Komponenten **19**, **21** in einer Richtung senkrecht zur optischen Achse OA gegenläufig zueinander verschoben werden können. In den **Fig. 3** bis **Fig. 5** sind die Richtungen dieser Verschiebung durch Pfeile gekennzeichnet.

[0045] Wenn der Wellenfrontmanipulator aus der in **Fig. 4** gezeigten Nullstellung heraus in eine erste Wirkstellung verschoben wird, die in **Fig. 3** dargestellt ist, weist der Wellenfrontmanipulator **5** im achsfernen Bereich eines durch den Wellenfrontmanipulator **5** hindurchtretenden Strahlenbüschels einen vergrößerten Abstand auf. Außerdem weisen die Freiformflächen in der ersten Wirkstellung an den aneinander gegenüberliegenden Punkten unterschiedliche Krümmungen auf. In der in **Fig. 3** dargestellten ersten Wirkstellung sind die Krümmungen so, dass achsferne Strahlen schwächer fokussiert werden, als achsnahe Strahlen, sodass die Schnittweite achsferner Strahlen gegenüber achsnahen Strahlen vergrößert wird (in der Figur übertrieben dargestellt). Auf diese Weise wird durch den Wellenfrontmanipulator in der Abbildung eine negative sphärische Aberration hervorgerufen wird.

[0046] In der in **Fig. 5** gezeigten Wirkstellung, in der die optischen Komponenten **19**, **21** des Wellenfrontmanipulator **5** ebenfalls gegenläufig zueinander, jedoch in im Vergleich zu **Fig. 3** entgegengesetzten Richtungen verschoben sind, liegen die Freiformflächen **23**, **25** derart einander gegenüber, dass achsferne Strahlen eines Strahlenbüschels stärker fokussiert werden, als achsnahe Strahlen (in der Figur übertrieben dargestellt). Dadurch wird die Schnittweite achsferner Strahlen gegenüber der Schnittweite achsnaher Strahlen verringert, so dass eine positive sphärische Aberration hervorgerufen wird. Mit dem erfindungsgemäßen Wellenfrontmanipulator kann daher durch gegenläufiges Verschieben der optischen Komponenten mit den Freiformflächen eine positive oder eine negative sphärische Aberration hervorgerufen werden, je nachdem ob die erste optische Komponente in negativer Richtung und die zweite optische Komponente in positiver Richtung verschoben wird oder umgekehrt. Je nach gewähltem Freiformprofil kann dabei eine sphärische Aberration dritter Ordnung, eine sphärische Aberration fünfter Ordnung oder eine sphärische Aberration höherer Ordnung hervorgerufen werden. Zudem ist es möglich, die Freiformflächen so auszugestalten, dass gleichzeitig mit einer sphärischen

Aberration dritter Ordnung auch wenigstens eine sphärische Aberration fünfter Ordnung hervorgerufen wird. Ebenso besteht die Möglichkeit die Freiformflächen so zu konstruieren, dass zusätzlich zu einer sphärischen Aberration auch noch andere Abbildungsfehler hervorgerufen werden.

[0047] In dem in **Fig. 2** gezeigten Ausführungsbeispiel ist zwischen den Freiformflächen **23, 25** der optischen Komponenten **19, 21** des Wellenfrontmanipulators **5** ein optionales Immersionsmedium **35** angeordnet. Dieses Immersionsmedium kann insbesondere eine Flüssigkeit oder ein elastisches Polymer sein. Als Immersionsmedium kommen beispielsweise Flüssigkeiten, etwa hochreines Wasser, Salzlösungen, Immersionsöle etc. und elastische Optokite in Betracht. Da lediglich eine laterale Bewegung der ersten optischen Komponente und der zweiten optischen Komponente erfolgt, kann der Wellenfrontmanipulator mit Immersionsmedium eine flache Bauweise besitzen, d. h. eine geringe Ausdehnung in Richtung der optischen Achse OA. Durch geeignetes Anpassen des Brechungsindex und der Abbe-Zahl des Immersionsmediums an den Brechungsindex und die Abbe-Zahl des Materials, aus dem die optischen Komponenten hergestellt sind, lässt sich eine variabel einstellbare Wellenfrontmanipulation erreichen, deren Wirkung über einen ausgedehnten Wellenlängenbereich hinweg unabhängig von der Wellenlänge ist, so dass der Wellenfrontmanipulator **5** als achromatischer Wellenfrontmanipulator angesehen werden kann. Mit Hilfe des achromatischen Wellenfrontmanipulators lassen sich Farbfehler, insbesondere Farblängsfehler, beim Hervorrufen der sphärischen Aberration weitgehend vermeiden.

[0048] Wenn das Immersionsmedium **35** oder das Material der ersten optischen Komponente **19** und der zweiten optischen Komponente **21** des Wellenfrontmanipulators **5** einen von der Normalgeraden abweichenden Dispersionsverlauf aufweist, können höhere Ordnungen der Farbfehler, als also sekundäre und tertiäre Spektren der Farbfehler, ebenfalls korrigiert werden. Für das Korrigieren des tertiären Farbfehlers weisen dabei sowohl das Immersionsmedium **35** als auch das Material der optischen Komponenten **19, 21** des Wellenfrontmanipulators **5** einen von der Normalgeraden abweichenden Dispersionsverlauf auf. Immersionsmedien sind typischerweise Kohlenwasserstoffe, die als solche in der Regel einen von der Normalgeraden abweichenden Dispersionsverlauf aufweisen.

[0049] Mit dem Wellenfrontmanipulator **5** wird die sphärische Aberration durch Manipulieren der Wellenfront des durch den Wellenfrontmanipulator hindurchtretenden Strahlenbündels hervorgerufen. Die Wellenfront eines Strahlenbündels ist durch die Punkte der elektromagnetischen Welle, welche dieselbe Phase haben, gegeben. Mathematisch kann die Wellenfront durch eine Überlagerung von Funktionen eines vollständigen Funktionensystems dargestellt werden. Typischerweise werden Zernike-Polynome als Funktionensystem verwendet, wobei die einzelnen Zernike-Polynome verschiedene Bildfehler repräsentieren. In der Darstellung der Wellenfront ist dabei jedem Zernike-Polynom ein Zernike-Koeffizient zugeordnet, wobei die Wellenfront durch die Zernike-Koeffizienten beschrieben ist. Die Freiformflächen **23, 25** der optischen Komponenten **19, 21** des Wellenfrontmanipulators **5** können so gewählt werden, dass sie eine Manipulation der Wellenfront generieren, welche sich durch ein Zernike-Polynom beschreiben lässt. Der zugehörige Zernike-Koeffizient ist durch den Betrag der Relativverschiebung der beiden optischen Komponenten **19, 21** bestimmt. Eine mathematische äquivalente Beschreibung lässt sich auch mit der Entwicklung nach anderen vollständigen Funktionensystemen erreichen, etwa durch eine Taylorentwicklung. Nachfolgend werden die Grundprinzipien zum Konstruieren der Freiformprofile anhand einer Taylorentwicklung dargelegt.

[0050] Die Freiformfläche kann bei expliziter Flächendarstellung in der Form $z(x, y)$ durch ein Polynom beschrieben werden, das in einer zur Bewegungsrichtung der optischen Komponenten **19, 21** senkrechten Koordinate x nur gerade Potenzen von x aufweist und in einer zur Bewegungsrichtung parallelen Koordinate y nur ungerade Potenzen von y aufweist. Die $z(x, y)$ -Koordinate der Freiformfläche kann zunächst allgemein beispielsweise durch eine Polynomentwicklung der Form

$$Z = \sum_{m,n=0}^{\infty} C_{m,n} x^m y^n \quad (1)$$

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. Die Koordinaten x und y sind hierbei als dimensionslose Maßzahlen in sogenannten Lens Units in die Formel einzusetzen. Lens Units bedeutet hierbei, dass alle Längen zunächst als dimensionslose Zahlen angegeben und später so interpretiert werden, dass sie durchgehend mit derselben Maßeinheit (nm, μm , mm, m) multipliziert werden. Hintergrund ist, dass die geometrische Optik skaleninvariant ist, und im Gegensatz zur Wellenoptik nicht über eine natürliche Längeneinheit verfügt.

[0051] Eine reine Defokussierungswirkung lässt sich gemäß der Lehre von Alvarez bewirken, wenn die Freiformfläche der optischen Komponenten **19, 21** durch folgendes Polynom 3. Ordnung beschrieben werden kann:

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

[0052] Hierbei ist angenommen, dass die laterale Verschiebung der optischen Komponenten **19, 21** 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.

[0053] Für parallel zur optischen Achse OA einfallende Strahlbündel und Luft (Brechzahl $n = 1$) zwischen den beiden optischen Komponenten **19, 21** bewirkt die laterale Verschiebung der optischen Komponenten um eine Strecke $s = |\pm y|$ damit eine Änderung der Wellenfront gemäß der Gleichung:

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

also eine Änderung der Fokusslage durch Änderung des parabolischen Wellenfrontanteils plus einen sog. Piston-Term (Zernike 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, d. h. im Bereich eines kollimierten Strahlenbündels, befindet. Auch sonst kann der Piston-Term für die Abbildungseigenschaften meist vernachlässigt werden. Weitere Details zur Konstruktion der Freiformflächen 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.

[0054] Die Flächenbrechkraft eines derartigen als Variolinse fungierenden Wellenfrontmanipulators ist durch folgende Formel gegeben:

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

[0055] 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.

[0056] Es ist möglich, dass die beiden relativ zueinander bewegten optischen Komponenten **19, 21** wie in den Fig. 2 bis Fig. 5 gezeigt so orientiert sind, dass die beiden Freiformflächen **23, 25** einander zugewandt sind. In diesem Falle ist es besonders einfach, eine Justierung der Nulllage vorzunehmen, nämlich indem der Abstand zwischen den beiden optischen Komponenten **19, 21** 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 **19, 21** bei der lateralen Bewegung während des funktionsgemäßen Betriebs gerade nicht berühren. Alternativ ist es grundsätzlich aber auch möglich, die beiden optischen Komponenten **19, 21** derart zu orientieren, dass die Freiformflächen **23, 25** voneinander abgewandt sind.

[0057] In der vorliegenden Erfindung weisen die Freiformflächen Terme höherer Ordnung zur Beeinflussung einzelner Bildfehler auf. Diese können ausschließlich vorhanden sein oder zusätzlich zu anderen Termen, etwa dem beschriebenen Defokus-Term oder dem beschriebenen Piston-Term, Beispielsweise würde ein Polynom 5. Ordnung der Form

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

vorwiegend die primäre sphärische Aberration beeinflussen. Eine sphärische Aberration 5. Ordnung wird durch ein entsprechendes Polynom 7. Ordnung beschrieben usw.

[0058] Die Strukturprofile können frei überlagert sein, d. h. eine Struktur zur Änderung der Brechkraft und eine Struktur zur Änderung der sphärischen Aberration können in einer Freiformfläche **23, 25** überlagert sein, so dass ein entsprechender Wellenlängenmanipulator bei Verschiebung der optischen Komponenten **19, 21** gegeneinander eine Brechkraftwirkung variiert und gleichzeitig eine sphärische Aberration ändert, wobei beide Änderungen mit einem beliebigen aber fest vorzuwählenden Proportionalitätsfaktor proportional zueinander sind.

[0059] Weiterhin ist es auch möglich, dass beide Seiten der bewegten optischen Komponenten **19, 21** eine Wirkform gemäß der oben beschriebenen Freiformen 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. Neben der erleichterten Herstellung bieten kleinere Profiltiefen grundsätzlich auch den Vorteil, dass sie im Vergleich zu größeren Profiltiefen weniger unerwünschte Bildfehler verursachen. Unerwünschte Bildfehler entstehen an den Profilen der optischen Komponenten eines Freiformelementes aufgrund des endlichen Abstands zwischen den optischen Komponenten, was dazu führt, dass ein Strahl, der an der Freiformfläche der ersten optischen Komponente bei einem bestimmten Abstand von der optischen Achse gebrochen wird, die zweite Freiformfläche nicht exakt am dazu korrespondierenden Punkt trifft, sondern etwas versetzt. Die dabei entstehenden Fehler steigen mit der Profiltiefe drastisch (überlinear) an, weil größere Profiltiefen nicht nur eine größere brechende Wirkung besitzen, sondern außerdem einen größeren Abstand zwischen den Elementen erfordern. Eine Aufspaltung der Freiformprofile auf Vorder- und Rückseite der Freiformelemente ist daher vom optischen Standpunkt immer vorteilhaft, wenn auch aufwendiger in der Herstellung.

[0060] 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

$$z(x, y) = A \cdot (x^3 + y^3) \quad (6)$$

beschrieben werden und die Relativbewegung der optischen Komponenten 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.

[0061] Nachfolgend wird das Anpassen eines zwischen den optischen Komponenten **19, 21** befindlichen Immersionsmediums **35** an das Material der optischen Komponenten **19, 21** beschrieben.

[0062] Für das Bereitstellen einer achromatischen Variolinse lässt sich die Bedingung für die Anpassung des Immersionsmediums **35** an das Material der optischen Komponenten **19, 21** im Wellenfrontmanipulator **5** folgendermaßen ableiten:

Die beiden zueinander bewegten optischen Komponenten **19, 21** bilden eine Brechkraft $\Phi_1 = 4 \cdot k \cdot s \cdot (n_1 - 1)$. Die variable „Immersionsmediumlinse“, also der variable, mit dem Immersionsmedium **35** gefüllte Zwischenraum, zwischen den Platten, bildet eine Brechkraft $-\Phi_2 = 4 \cdot k \cdot s \cdot (n_2 - 1)$, wobei k den Skalierungsfaktor der Freiformprofilfunktion, s den Verschiebeweg der Elemente und n_1 und n_2 die Brechungsindizes des Materials der optischen Komponenten **19, 21** bzw. des Immersionsmediums **35** bei einer mittleren Wellenlänge des betrachteten Spektralbereiches bezeichnen.

[0063] Die Bedingung für Achromasie für zwei eng zusammenstehende Linsen lautet generell:

$$\frac{\Phi_1}{v_1} + \frac{\Phi_2}{v_2} = 0 \quad (7)$$

[0064] Dabei bezeichnen v_1 und v_2 die Abbe-Zahl des Materials der optischen Komponenten **19, 21** bzw. die Abbe-Zahl des Immersionsmediums **35**. Durch Einsetzen der Gleichungen für die Brechkräfte Φ_1 und Φ_2 in Gleichung (7) lässt sich für die achromatische Variolinse folgende Bedingung aufstellen:

$$\frac{n_1 - 1}{v_1} - \frac{n_2 - 1}{v_2} = 0 \quad (8)$$

[0065] Natürlich kann aufgrund der nur beschränkten Auswahl an zur Verfügung stehenden optischen Materialien, insbesondere bei Berücksichtigung spezieller Anforderungen wie Alterungsbeständigkeit, thermische Ausdehnung etc., in der Praxis auch geringfügig von der obigen Bedingung abgewichen werden, ohne den Bereich der Erfindung zu verlassen. Ein Parameterbereich für eine Variolinse lässt sich in etwa durch folgende Bedingungen charakterisieren:

$$\left| \frac{n_1 - 1}{\nu_1} - \frac{n_2 - 1}{\nu_2} \right| < 0,05 \quad (8a)$$

[0066] Bevorzugt sollte sogar gelten:

$$\left| \frac{n_1 - 1}{\nu_1} - \frac{n_2 - 1}{\nu_2} \right| < 0,01 \quad (8b)$$

[0067] Und noch bevorzugter kann gelten:

$$\left| \frac{n_1 - 1}{\nu_1} - \frac{n_2 - 1}{\nu_2} \right| < 0,001 \quad (8c)$$

[0068] Ein achromatischer Wellenfrontmanipulator, der an Stelle einer Defokussierung einen bestimmten Zernike-Term beeinflussen soll, hat ebenfalls dieselbe Achromatisierungsbedingung (7) bzw. (8a) bis (8c) zu erfüllen. Ein Element, das beispielsweise wellenlängenunabhängig einen bestimmten Betrag an sphärischer Aberration bereitstellt, wäre durch zwei optische Komponenten **19**, **21** bereitzustellen, deren Freiformflächen **23**, **25**, bspw. gemäß Gleichung 5 ausgebildet sind und die aus einem Glas gebildet sind, das zusammen mit dem Immersionsmedium **35** die Bedingung (7) bzw. (8a) bis (8c) erfüllt.

[0069] Zum Einstellen des geeigneten Verschiebeweges der beiden optischen Komponenten **19**, **21** sind wie bereits erwähnt, Aktoren **31**, **33** vorhanden, die beispielsweise als mikromechanische Aktoren, piezoelektrische Aktoren, Ultraschall-Aktoren, etc. ausgebildet sein können. Stellsignale für die Aktoren **31**, **33** werden von einer Berechnungseinheit **37** berechnet, die im vorliegenden Ausführungsbeispiel in das Objektiv integriert ist. Alternativ besteht aber auch die Möglichkeit, die Berechnungseinheit **37** als von der Steuerelektronik der Kamera ausgeführte Software auszugestalten. Während im ersteren Fall die Berechnungseinheit Teil des Objektivs ist, wäre sie im letztgenannten Fall Teil der Kamera.

[0070] Die Berechnungseinheit **37** empfängt von einer mit ihr verbundenen Erfassungseinheit **39** die für das Berechnen der Verschiebewege relevanten Einflussgrößen. Relevante Einflussgrößen sind beispielsweise die Stellung der Blende **7** und die Fokussierstellung des Objektivs. Die Erfassungseinheit **39** ist daher mit Sensoren, die zum Erfassen dieser Größen geeignet sind, verbunden. Derartige Sensoren sind in modernen Objektiven typischerweise standardmäßig vorhanden und werden daher an dieser Stelle nicht näher erläutert. Die auf der Basis der von der Erfassungseinheit **39** empfangenen Einflussgrößen berechneten Stellsignale werden dann von der Berechnungseinheit **37** an die Aktoren **31**, **33** des Wellenfrontmanipulators **5** ausgegeben, die die Stellsignale in die durch die Stellsignale repräsentierten Verschiebewege umgesetzt werden.

[0071] Das Objektiv aus Fig. 2 ist so ausgestaltet, dass der Wellenfrontmanipulator **5** aus dem Zwischenraum zwischen der ersten Linsenordnung **1** und der zweiten Linsenordnung **3** herausgenommen werden kann. Dies bietet die Möglichkeit, das Objektiv auch ohne Wellenfrontmanipulator zu verwenden, wenn keine sphärische Aberration induziert werden soll (Wellenfrontmanipulator in Nullstellung), da der Wellenfrontmanipulator in der Nullstellung als optisches Nullelement keine optische Funktion ausübt. Zudem besteht die Möglichkeit, den Wellenfrontmanipulator gegen einen anderen Wellenfrontmanipulator auszutauschen. So kann beispielsweise ein Satz Wellenfrontmanipulatoren mit wenigstens zwei Wellenfrontmanipulatoren vorhanden sein, von denen einer eine sphärische Aberration dritter Ordnung mit wenigstens einer weiteren Aberration hervorruft und ein anderer eine sphärische Aberration dritter Ordnung ohne weitere Aberration. Beispielsweise besteht die Möglichkeit, einen Wellenfrontmanipulator vorzusehen, der lediglich eine sphärische Aberration dritter Ordnung hervorruft und einen Wellenfrontmanipulator, der zusätzlich zur sphärischen Aberration dritter Ordnung auch noch eine sphärische Aberration fünfter Ordnung und/oder einen Defokus hervorruft, die bzw. der in einem bestimmten Verhältnis zur sphärischen Aberration dritter Ordnung steht. Ebenso besteht die Möglichkeit, einen Wellenfrontmanipulator vorzusehen, der neben der sphärischen Aberration eine andere monochromati-

sche Aberration hervorruft. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, einen Wellenfrontmanipulator vorzusehen, der beispielsweise mit Hilfe von Gläsern mit anormaler Teildispersion und/oder einem Immersionsmedien mit anormaler Teildispersion eine achromatische sphärische Aberration hervorruft. Sofern der Zwischenraum **9** zwischen der ersten Linsenordnung **1** und der zweiten Linsenordnung **3** groß genug ist, besteht auch die Möglichkeit zwei derartige Wellenfrontmanipulatoren im Objektiv anzuordnen. Dies trifft selbstverständlich auch dann zu, wenn das Objektiv das Entnehmen eines Wellenfrontmanipulators nicht zulässt. Bei einem Objektiv mit entnehmbarem Wellenfrontmanipulator kann aber das Objektiv mit einem ganzen Satz an wahlweise einführbaren Wellenfrontmanipulatoren versehen sein.

[0072] Obwohl im Wellenfrontmanipulator nach Anspruch 1 die optischen Komponenten **19, 21** so angeordnet sind, dass ihre Freiformflächen **23, 25** einander zugewandt sind, besteht auch die Möglichkeit, die optischen Komponenten so anzuordnen, dass ihre Freiformflächen voneinander einander abgewandt sind. In den **Fig. 2** bis **Fig. 5** wurden die Freiformflächen dann an den Außenseiten des Wellenfrontmanipulators angeordnet sein und die Planflächen an den aneinander zugewandten Seiten der optischen Komponenten. Zudem besteht die Möglichkeit, die optische Wirkung der Freiformflächen auf zwei Flächen aufzuteilen, so dass beide Seiten der optischen Komponenten mit Freiformflächen versehen sind, wobei die beiden Freiformflächen einer optischen Komponente gemeinsam eine Wirkung hervorrufen, wie sie mit Bezug auf die **Fig. 2** bis **Fig. 5** beschrieben worden ist.

[0073] Ein erstes konkretes Ausführungsbeispiel für einen erfindungsgemäßen Wellenfrontmanipulator wird nachfolgend mit Bezug auf die **Fig. 6** bis **Fig. 8** beschrieben. Dieses Ausführungsbeispiel gibt ein erfindungsgemäß ausgelegtes Objektiv für Cine-Anwendungen an. Während **Fig. 6** das Profil der Freiformflächen zeigt, zeigen die **Fig. 7** und **Fig. 8** das Objektiv mit dem Wellenfrontmanipulator **5** in der Nullstellung (**Fig. 5**) und einer Wirkstellung mit maximaler Verschiebung der optischen Komponenten (**Fig. 8**).

[0074] Wie das Objektiv aus dem in **Fig. 2** gezeigten Ausführungsbeispiel umfasst das Objektiv des ersten konkreten Ausführungsbeispiels eine erste Linsenordnung **1** und eine zweite Linsenordnung **3**, die im Unterschied zu dem in **Fig. 2** gezeigten Ausführungsbeispiel jedoch aus einer Mehrzahl von Linsen aufgebaut sind. Im Zwischenraum **9** zwischen der ersten Linsenordnung **1** und der zweiten Linsenordnung **3** sind der Wellenfrontmanipulator **5** und die Aperturblende **7** angeordnet.

[0075] Das Objektiv des ersten konkreten Ausführungsbeispiels weist eine Brennweite von 135 mm und ein Öffnungsverhältnis von f/1.8 auf. Das Grundobjektiv weist ausschließlich sphärische Linsen auf, deren Oberfläche durch die übliche Scheitelpunktform der Kugelgleichung (hier: mit $k = 0$) beschrieben wird:

$$z = \frac{(x^2 + y^2) / R}{1 + \sqrt{1 - (1+k) \cdot \frac{(x^2 + y^2)}{R^2}}}$$

[0076] In der nachfolgenden Tabelle sind die optischen Konstruktionsdaten für das erste Ausführungsbeispiel angegeben, wobei die Flächen in den **Fig. 7** und **Fig. 8** von links nach rechts durchnummeriert sind, wobei Dummy-Flächen weggelassen sind. Die Radien und Abstände sind in der Tabelle als dimensionslose Maßzahlen in sogenannten Lens Units angegeben, d. h. alle Radien und Abstände können so interpretiert werden, dass sie durchgehend mit derselben Maßeinheit (nm, μm , mm, m) multipliziert werden. Hintergrund ist, dass die geometrische Optik skaleninvariant ist, und im Gegensatz zur Wellenoptik nicht über eine natürliche Längeneinheit verfügt. Im vorliegenden konkreten Ausführungsbeispiel ist die Maßeinheit mm.

Fläche Nr	Flächentyp	Flächenradius	Abstand zur nächsten Fläche	Glas
Objekt				
1	Sphäre	103,66	12,80	NFK5 (Schott)
2	Sphäre	-2511,900	0,30	
3	Sphäre	51,212	16,40	SFPL51 (Ohara)
4	Sphäre	127,720	8,00	
5	Sphäre	∞	17,90	NSF6 (Schott)

6	Sphäre	-94,406	3,95	SF2 (Schott)
7	Sphäre	38,861	18,1758	
8	Sphäre	∞	3,00	NLASF44 (Schott)
9	Freiform	-	0,10	
10	Freiform	-	3,00	NLASF44 (Schott)
11	Sphäre	∞	10,80	
12 (Blende)	Sphäre	∞	1,00	
13	Sphäre	65,407	7,80	NPSK53 (Schott)
14	Sphäre	-118,850	2,00	
15	Sphäre	-82,343	3,60	SF1 (Schott)
16	Sphäre	473,150	0,20	
17	Sphäre	34,475	17,30	NFK5 (Schott)
18	Sphäre	26,416	5,17	
19	Sphäre	109,020	3,90	NSF6 (Schott)
20	Sphäre	2511,900	33,9542	
Bild				

[0077] Der Wellenfrontmanipulator **5** besteht hier aus genau zwei Freiformelementen mit je einer planen Fläche und einer Freiformfläche, die allgemein durch eine Polynomentwicklung gemäß Gleichung (1) beschrieben wird. Die Polynomkoeffizienten der beiden identischen Freiformflächen des konkreten Ausführungsbeispiels (Flächennummern 9 und 10) lauten:

$$\begin{array}{llll}
 y: & -6.6000E-03 & x^2y: & -2.8406E-05 & y^3: & -9.4687E-06 \\
 x^4y: & 1.6446E-07 & x^2y^3: & 1.0964E-07 & y^5: & 3.2892E-08
 \end{array}$$

[0078] Hierbei entspricht beispielsweise der dem Term x^2y^3 zugeordneter Wert dem Koeffizienten $C_{2,3}$ aus Gleichung (1). Dieses Freiformprofil stellt eine Überlagerung eines Terms für die sphärische Aberration dritter Ordnung gemäß Gleichung (5) mit einem Defokus-Term gemäß Gleichung (2) und einem Kippterm dar.

[0079] Es sei an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen, dass es mathematisch unendlich viele äquivalente Darstellungen derselben Flächen gibt, so dass es nicht sinnvoll wäre, die Erfindung explizit an der Flächendarstellung festzumachen.

[0080] Das Profil der Freiformflächen des Wellenfrontmanipulators des ersten konkreten Ausführungsbeispiels ist in **Fig. 6** dargestellt. Während in einem oberen Bereich der Freiformfläche das Profil einen negativen Abstand von einer mittleren Profilebene aufweist, weist es im in **Fig. 6** unteren Bereich einen positiven Abstand von der mittleren Profilebene auf. Im Zentrum des Profils ist der Abstand von der mittleren Profilebene im Wesentlichen Null. Dieses Bereich mit einem Abstand Null von der mittleren Profilebene verbreitert sich am linken und rechten Rand des Profils, wobei am oberen linken und rechten Rand wiederum ein positiver Abstand von der mittleren Profilebene vorliegt und am unteren äußeren linken und rechten Rand ein negativer Abstand von der mittleren Profilebene.

[0081] Das Profil ist im ersten konkreten Ausführungsbeispiel (willkürlich) so gewählt, dass sich bei Blende 2.8 und bei Einstellung von sphärischer Unterkorrektur in der sphärischen Aberration 3. Ordnung die zugehörige Nachfokussierung durch den Defokus-Anteil aus dem Freiformprofil von selbst ergibt. Um dies zu erreichen, stellt die Freiformfläche eine Überlagerung einer Fläche gemäß Gleichung (5) mit zumindest einer Fläche gemäß Gleichung (2) dar. Für andere Blendenstellungen oder für die Einstellung des WF-Manipulator so, dass dieser überkorrigierte sphärische Aberration in der sphärischen Aberration 3. Ordnung liefert, muss das Objektiv durch Verschiebung der hinteren Objektivgruppe ab Fläche **12**, die also die Blende **7** und die zweite Linsenkomination **3** umfasst, nachfokussiert werden.

[0082] Der seitliche Bewegungsbereich der beiden Freiformelemente (Flächen **8** und **9** sowie Flächen **10** und **11**) beträgt jeweils ± 2.5 mm, wobei sich die beiden optischen Komponenten stets exakt gegenläufig zueinander und entlang der y-Koordinatenrichtung des Systems bewegen. (Würde man die Bewegung in x-Richtung wählen, so wären in der Beschreibung der Freiformfläche die Potenzen von x und y entsprechend miteinander zu vertauschen. Bei beliebiger Lage der Schiebearchse relativ zum Systemkoordinatensystem, ergäben sich für die völlig kongruente Freiformfläche andere Koeffizienten, so dass die Koeffizienten nur in Verbindung mit dem Koordinatensystem aussagekräftig sind.)

[0083] Bei Ausnutzung des vollen Schiebebereichs der Freiformelemente ergibt sich ein einstellbarer Wellenfrontfehler für die sphärische Aberration 3. Ordnung von $\pm 32 \lambda$ bei Öffnung 1.8, bzw. von $\pm 5.4 \lambda$ bei Öffnung 2.8 bzw. 1.3λ bei Öffnung 4.0. Die in jeder Stellung des Wellenfrontmanipulators in Kombination mit der jeweiligen Blendenstellung erforderliche Nachfokussierung des Objektivs wird durch Verschiebung des hinteren Objektivteils bewirkt, der die Blende **7** und die sich bildseitig an die Blende **7** anschließende Linsenordnung **3** umfasst.

[0084] Die **Fig. 7** und **Fig. 8** zeigen Schnittbilder des Objektivs bei Objektentfernung Unendlich für die Nullstellung und für die in einer Richtung maximal ausgelenkte Wirkstellung des Wellenfrontmanipulators **5**. Ein-gezeichnet sind das Mittenbündel und das zur maximalen Bildhöhe von $y' = 15$ mm gehörige schiefe Strahlbündel. In **Fig. 7** ist zu erkennen, dass die Strahlen des Mittenbündels und die Strahlen des schiefen Strahlbündels genau auf den Bildsensor **11** fokussiert werden. Bei dem Wellenfrontmanipulator **5** in Wirkstellung (**Fig. 8**) ist dagegen die Schnittweite der Strahlen des Mittenbündels gegenüber den Strahlen des schiefen Strahlbündels verringert, so dass sich die Strahlen des Mittenbündels bereits vor der Sensorebene des Bildsensors **11** schneiden. Es liegt somit eine sphärische Aberration vor.

[0085] Während der Wellenfrontmanipulator **5** im ersten konkreten Ausführungsbeispiel Freiformprofile mit Profilflächen zum Hervorrufen einer sphärischen Aberration dritter Ordnung besitzt, kann im ersten konkreten Ausführungsbeispiel auch ein Wellenfrontmanipulator zum Einsatz kommen, dessen Profilflächen zum Hervorrufen einer Kombination aus einer sphärischen Aberration dritter Ordnung und einer sphärischen Aberration fünfter Ordnung ausgebildet sind. Das Profil der Freiformflächen eines derartigen Wellenfrontmanipulators (der auch noch einen Defokus-Term enthält) ist in **Fig. 9** dargestellt. Im Vergleich zu der in **Fig. 6** dargestellten Profilfläche, in der sich die negativen Abstände von der mittleren Profilebene im oberen Bereich der Profilfläche über einen wesentlichen Teil der Breite der Profilfläche erstrecken und ebenso die positiven Abstände von der mittleren Profilfläche im unteren Bereich der Profilfläche sich über einen wesentlichen Teil der Breite der Profilfläche erstrecken, sind die Profilflächen mit negativem Abstand von der mittleren Profilebene bei der in **Fig. 9** gezeigten Profilfläche im Wesentlichen durch einen Bereich mit einem positiven Abstand von der mittleren Profilebene unterbrochen. Entsprechend ist in dem in **Fig. 9** gezeigten Profil der Bereich mit einem positiven Abstand von der mittleren Profilebene (unterer Bereich des Profils) von einem Abschnitt mit einem negativen Abstand von der mittleren Profilebene unterbrochen. Das in **Fig. 9** dargestellte Freiformprofil weist die folgenden Koeffizienten auf:

y:	5.4000E-03	x^2y :	-1.1298E-04	y^3 :	-3.7660E-05
x^4y :	4.8194E-07	x^2y^3 :	3.2129E-07	y^5 :	9.6388E-08
x^6y :	-5.5358E-10	x^4y^3 :	-5.5358E-10	x^2y^5 :	-3.3215E-10
y^7 :	-7.9083E-11				

[0086] Die Koeffizienten sind in diesem Beispiel so gewählt, dass der Wellenfrontmanipulator bei maximaler Auslenkung ($\pm 2,5$ mm) und bei voller Blendenöffnung zusätzlich zu der sphärischen Aberration dritter Ordnung mit Beiträgen von $\pm 32 \lambda$ gleichzeitig eine sphärische Aberration fünfter Ordnung mit Beiträgen von $\pm 16 \lambda$ erzeugt, wobei die Beiträge der sphärischen Aberration fünfter Ordnung jedoch immer das umgekehrte Vorzeichen wie die Beiträge der sphärischen Aberration dritter Ordnung aufweisen und zu diesen in einem festen Verhältnis von 1:-0,5 stehen. Diese Kombination führt dazu, dass die Modulations-Transfer-Funktion (MTF) bei niedrigen Ortsfrequenzen (≤ 5 Linien pro Millimeter) nur sehr wenig abfällt aber bei höheren Ortsfrequenzen (≥ 30 Linien pro Millimeter) sehr stark. Empirisch hat sich gezeigt, dass bei diesem Verhältnis von Beiträgen der sphärischen Aberration dritter Ordnung zu Beiträgen der sphärischen Aberration fünfter Ordnung ein als besonders angenehm empfundener Bildeindruck entsteht.

[0087] Ein zweites konkretes Ausführungsbeispiel für ein erfindungsgemäßes Objektiv wird nachfolgend mit Bezug auf die **Fig. 10** bis **Fig. 12** beschrieben. Im Unterschied zu dem mit Bezug auf die **Fig. 6** bis **Fig. 8** beschriebenen ersten konkreten Ausführungsbeispiel weist die erste Linsenordnung **1** des zweiten konkre-

ten Ausführungsbeispiels eine deutlich höhere Anzahl an Linsen auf. Die zweite Linsenordnung **3** weist dagegen gegenüber der zweiten Linsenordnung des ersten konkreten Ausführungsbeispiels eine reduzierte Anzahl an Linsen auf. Zwischen der ersten Linsenordnung **1** und der zweiten Linsenordnung **3** befinden sich ein Wellenfrontmanipulator **5** und eine Aperturblende **7**. Während in **Fig. 11** der Wellenfrontmanipulator in Nullstellung dargestellt ist, ist der Wellenfrontmanipulator **5** in **Fig. 12** in einer Wirkstellung dargestellt.

[0088] Das Profil der Freiformflächen des Wellenfrontmanipulators des zweiten konkreten Ausführungsbeispiels ist in **Fig. 10** dargestellt. Dieses dient im Wesentlichen zum Erzeugen einer sphärischen Aberration dritter Ordnung und ähnelt in seiner Struktur daher dem Profil aus **Fig. 6**.

[0089] Das zweite konkrete Ausführungsbeispiel stellt ein weiteres erfindungsgemäß ausgelegtes Objektiv für Foto- oder Cine-Anwendung dar. Das Objektiv weist eine Brennweite von 25 mm und ein Öffnungsverhältnis von $f/1.75$ auf. Der Bildkreisdurchmesser beträgt maximal 18 mm und die maximale Verzeichnung liegt bei rund 2%.

[0090] Der maximale einstellbare Betrag von der sphärischen Aberration dritter Ordnung beträgt bei einem maximalen Stellweg der Freiformelemente von ± 2.0 mm ca. $\pm 14 \lambda$ bei der Bezugswellenlänge 546.074 nm. Die nachfolgende Tabelle enthält die Übersicht der Konstruktionsdaten des optischen System, wobei Dummy-Flächen weggelassen sind. Die Radien und Abstände sind in der Tabelle wieder als dimensionslose Maßzahlen in sogenannten Lens Units angegeben, d. h. alle Radien und Abstände können so interpretiert werden, dass sie durchgehend mit derselben Maßeinheit (nm, μm , mm, m) multipliziert werden. Im vorliegenden konkreten Ausführungsbeispiel ist die Maßeinheit mm.

Fläche Nr.	Flächentyp	Flächenradius	Abstand zur nächsten Fläche	Glas
Objekt				
1	Sphäre	108,3896	4,00	NLASF44 (Schott)
2	Sphäre	58,2438	11,9753	
3	Sphäre	91,5692	15,4746	NSK5 (Schott)
4	Sphäre	-355,4749	0,50	
5	Sphäre	75,2149	2,50	SFPL51 (Ohara)
6	Sphäre	26,1919	22,9848	
7	Sphäre	-57,1428	2,50	SFPL51 (Ohara)
8	Sphäre	44,6248	18,2346	
9	Sphäre	227,8161	2,50	NLAK10 (Schott)
10	Sphäre	53,2855	13,0469	SFPL51 (Ohara)
11	Sphäre	-98,7321	0,9654	
12	Sphäre	86,4962	14,5378	SFPL51 (Ohara)
13	Sphäre	-57,1321	0,50	
14	Sphäre	41,3163	10,4626	NLASF43 (Schott)
15	Sphäre	84,9045	9,6659	
16	Sphäre	∞	2,50	NLASF44 (Schott)
17			0,02	
18			2,50	NLASF44 (Schott)
19	Sphäre	∞	3,2378	
20 (Blende)	Sphäre	∞	1,2622	
21	Sphäre	-264,1395	2,50	SF4 (Schott)
22	Sphäre	19,6653	6,6539	SFPL51 (Ohara)
23	Sphäre	7962,4250	4,7102	

24	Asphäre	65,1343	4,7679	NLASF44 (Schott)
25	Sphäre	-101,2157	32,00	
Bild				

[0091] Die zugehörigen Koeffizienten der Freiformfläche lauten:

$$\begin{array}{llll}
 x^2y: & -7.8039E-05 & y^3: & -2.6810E-05 & x^4y: & 4.5582E-07 \\
 x^2y^3: & 3.0371E-07 & y^5: & 9.1119E-08 & &
 \end{array}$$

[0092] Hierbei entspricht beispielsweise der dem Term x^2y^3 zugeordnete Wert dem Koeffizienten $C_{2,3}$ aus Gleichung (1). Dieses Freiformprofil stellt eine Überlagerung eines Terms für die sphärische Aberration dritter Ordnung gemäß Gleichung (5) mit einem Defokus-Term gemäß Gleichung (2) dar.

[0093] Das Profil ist in diesem Beispiel (willkürlich) so gewählt, dass sich bei voller Öffnung (Blende 1.76) und bei Einstellung von sphärischer Unterkorrektur (sphärische Aberration dritter Ordnung) die zugehörige Nachfokussierung durch den Defokus-Anteil aus dem Freiformprofil von selbst ergibt. Das zugehörige Profil der Freiformflächen ist in **Fig. 10** dargestellt. Die Fokussierung des Objektivs auf andere Objektentfernungen erfolgt durch Verschiebung des durch die Linsen 5 und 6 (von der Objektseite aus gezählt) gebildete Kittglied, welches ein Innenfokussierglied darstellt.

[0094] Die **Fig. 11** und **Fig. 12** zeigen Schnittbilder des Objektivs gemäß dem zweiten konkreten Ausführungsbeispiel bei Objektentfernung Unendlich für die Nullstellung und für die in einer Richtung maximal ausgelenkte Wirkstellung des Wellenfrontmanipulators **5**. Eingezeichnet sind das Mittenbündel und die zu Bildhöhen von $y' = 10,7$ mm und $y' = 17,8$ mm gehörigen schiefen Strahlbündel. In **Fig. 11** ist zu erkennen, dass die Strahlen des Mittenbündels und die Strahlen der schiefen Strahlbündel genau auf den Bildsensor **11** fokussiert werden, wohingegen die Strahlen der Bündel in der Wirkstellung des Wellenfrontmanipulators unterschiedliche Schnittweiten aufweisen, so dass eine sphärische Aberration vorliegt.

[0095] Die vorliegende Erfindung wurde anhand von Ausführungsbeispielen zu Erläuterungszwecken detailliert beschrieben. Dabei können einzelne Merkmale der unterschiedlichen Ausführungsbeispiele auch miteinander kombiniert werden, so dass die Erfindung nicht auf eine in bestimmten Ausführungsbeispielen offenbarte Merkmalskombination eingeschränkt werden soll. Vielmehr soll die Erfindung lediglich durch die beigefügten Ansprüche beschränkt sein.

Bezugszeichenliste

- 1 Linsenanordnung
- 3 Linsenanordnung
- 5 Wellenfrontmanipulator
- 7 Aperturblende
- 9 Zwischenraum
- 11 Bildsensor
- 13 Sammellinse
- 15 Zerstreuungslinse
- 17 Sammellinse
- 19 erste optische Komponente
- 21 zweite optische Komponente
- 23 Freiformfläche>
- 25 Freiformfläche>
- 27 Planfläche
- 29 Planfläche
- 31 Aktor
- 33 Aktor
- 34 Aktor
- 35 Immersionsmedium
- 37 Berechnungseinheit
- 39 Erfassungseinheit

ZITATE ENTHALTEN 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 [0053]

Zitierte Nicht-Patentliteratur

- Lohmann (vgl. Appl. Opt. Vol. 9, No 7, (1970), p. 1669–1671) [0060]

Patentansprüche

1. Objektiv für eine Foto- oder Filmkamera mit einer ersten Linsenordnung (1), wenigstens einer zweiten Linsenordnung (3) und wenigstens einem Wellenfrontmanipulator (5), wobei
 – die erste Linsenordnung (1) und die zweite Linsenordnung (3) entlang einer optischen Achse (OA) des Objektivs voneinander beabstandet angeordnet sind, so dass zwischen der ersten Linseneinheit (1) und der zweiten Linseneinheit (3) ein Zwischenraum (9) vorhanden ist,
 – sich der Wellenfrontmanipulator (5) im Zwischenraum (9) zwischen der ersten Linseneinheit (1) und der zweiten Linseneinheit (3) befindet, und wenigstens zwei optische Komponenten (19, 21) umfasst, die gegenläufig zueinander senkrecht zur optischen Achse (OA) des Objektivs verschiebbar angeordnet sind und jeweils wenigstens eine Freiformfläche (23, 25) aufweisen,

dadurch gekennzeichnet, dass

der Wellenfrontmanipulator (5) eine Nullstellung aufweist, in der seine optischen Komponenten (19, 21) keine Bildfehler in den Abbildungseigenschaften des Objektivs hervorrufen, und Wirkstellungen, in denen die optischen Komponenten (19, 21) gegenläufig zueinander senkrecht zur optischen Achse (OA) des Objektivs aus der Nullstellung heraus verschoben sind und in denen die optischen Komponenten (19, 21) wenigstens eine sphärische Aberration in den Abbildungseigenschaften des Objektivs hervorrufen.

2. Objektiv nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Wellenfrontmanipulator (5) in den Wirkstellungen seiner optischen Komponenten (19, 21) wenigstens eine sphärische Aberration dritter Ordnung in den Abbildungseigenschaften des Objektivs hervorruft.

3. Objektiv nach Anspruch 1 oder Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Wellenfrontmanipulator (5) in den Wirkstellungen seiner optischen Komponenten (19, 21) wenigstens eine sphärische Aberration fünfter Ordnung in den Abbildungseigenschaften des Objektivs hervorruft.

4. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Freiformflächen (23, 25) in einem kartesischen Koordinatensystem mit einer x-Achse, einer y-Achse und einer z-Achse definiert ist, wobei die z-Achse die optische Achse (OA) des Objektivs darstellt und die z-Koordinaten einer Freiformfläche (23, 25) in Abhängigkeit von den x- und y-Koordinaten durch eine Polynomentwicklung der Form

$$Z = \sum_{m,n=0}^{\infty} C_{m,n} x^m y^n$$

beschrieben werden, wobei $C_{m,n}$ den Entwicklungskoeffizienten der Polynomentwicklung der jeweiligen Freiformfläche (23, 25) in der Ordnung m bzgl. der x-Koordinate und der Ordnung n bzgl. der y-Koordinate darstellt, wobei die Bewegungsrichtung der optischen Komponenten (19, 21) mit den Freiformflächen (23, 25) parallel zur y-Achse verläuft und nur Polynome mit ungerader Ordnung n und gerader Ordnung m von Null verschiedene Entwicklungskoeffizienten $C_{m,n}$ aufweisen.

5. Objektiv nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass wenigstens die Entwicklungskoeffizienten der Polynome x^4y , x^2y^3 und y^5 von Null verschieden sind.

6. Objektiv nach den Ansprüchen 3, 4 und 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass wenigstens die Entwicklungskoeffizienten der Polynome x^6y , x^4y^3 , x^2y^5 und y^7 von Null verschieden sind.

7. Objektiv nach Anspruch 5 oder Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass außerdem die Entwicklungskoeffizienten der Polynome x^2y und y^3 von Null verschieden sind.

8. Objektiv nach einem der Ansprüche 5 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass außerdem der Entwicklungskoeffizient des Polynoms y von Null verschieden ist.

9. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Objektiv im Zwischenraum (9) zwischen der ersten Linsenordnung (1) und der zweiten Linsenordnung (3) eine gegenständliche Aperturblende (7) aufweist und sich der Wellenfrontmanipulator (5) vor oder hinter der gegenständlichen Aperturblende (7) befindet.

10. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Objektiv im Zwischenraum (9) zwischen der ersten Linsenordnung (1) und der zweiten Linsenordnung (3) eine virtuelle Aperturblende aufweist und sich der Wellenfrontmanipulator (5) am Ort der virtuellen Aperturblende befindet.

11. Objektiv nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass
- das Objektiv eine Erfassungseinheit (39) zum Erfassen mindestens einer für das Ermitteln einer geeigneten Wirkstellung der optischen Komponenten (19, 21) des Wellenfrontmanipulators (5) relevante Einflussgröße des Objektivs aufweist und
 - das Objektiv eine Berechnungseinheit (37) zum Berechnen der Verschiebewege der optischen Komponenten (19, 21) des Wellenfrontmanipulators (5) zum Erreichen der Wirkstellung ausgehend von der Nullstellung auf der Basis der erfassten Einflussgröße und des gewünschten Grades an sphärischer Aberration aufweist oder dem Objektiv eine derartige Berechnungseinheit (37) zugeordnet ist.
12. Objektiv nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Objektiv eine Aktorik (34) zum Verschieben wenigstens eines Teils einer der Linsenanordnungen (1, 3) entlang der optischen Achse (OA) aufweist.
13. Objektiv nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Wellenfrontmanipulator (5) vorhanden ist, dessen optische Komponenten (19, 21) mit den Freiformflächen (23, 25) aus einem Material mit einer Abweichung der Brechzahldispersion von der Normalgeraden hergestellt sind.
14. Objektiv nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Wellenfrontmanipulator (5) vorhanden ist, bei dem sich zwischen den optischen Komponenten (19, 21) mit den Freiformflächen (23, 25) ein Immersionsmedium (35) befindet.
15. Objektiv nach Anspruch 14, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Immersionsmedium (35) eine Abweichung der Brechzahldispersion von der Normalgeraden aufweist.
16. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 15, **dadurch gekennzeichnet**, dass der wenigstens eine Wellenfrontmanipulator (5) aus dem Objektiv entnehmbar ist.
17. Foto- oder Filmkamera mit einem Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 16.
18. Verfahren zum gezielten Dämpfen bestimmter Raumfrequenzbereiche der Modulations-Transfer-Funktion eines Objektivs nach einem der Ansprüche 1 bis 16, **dadurch gekennzeichnet**, dass durch gegenläufiges Verschieben der Freiformflächen (23, 25) senkrecht zur optischen Achse (OA) des Objektivs eine sphärische Aberration gezielt herbeigeführt wird.
19. Verfahren nach Anspruch 18, **dadurch gekennzeichnet**, dass durch gegenläufiges Verschieben der Freiformflächen (23, 25) senkrecht zur optischen Achse (OA) des Objektivs wenigstens eine sphärische Aberration dritter Ordnung gezielt herbeigeführt wird
20. Verfahren nach Anspruch 18 oder Anspruch 19, **dadurch gekennzeichnet**, dass durch gegenläufiges Verschieben der Freiformflächen (23, 25) senkrecht zur optischen Achse (OA) des Objektivs wenigstens eine sphärische Aberration fünfter Ordnung gezielt herbeigeführt wird.

Es folgen 5 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

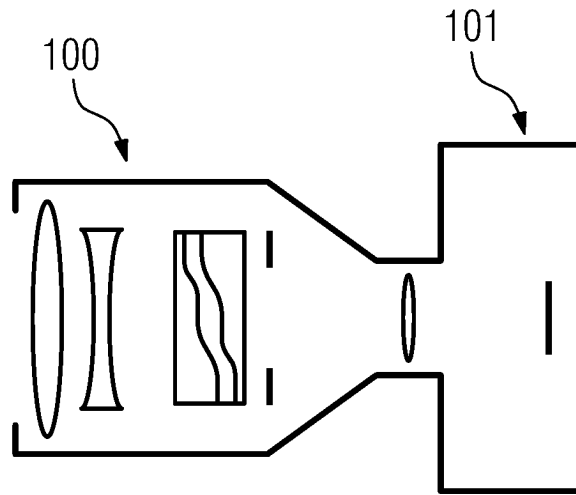


FIG 1

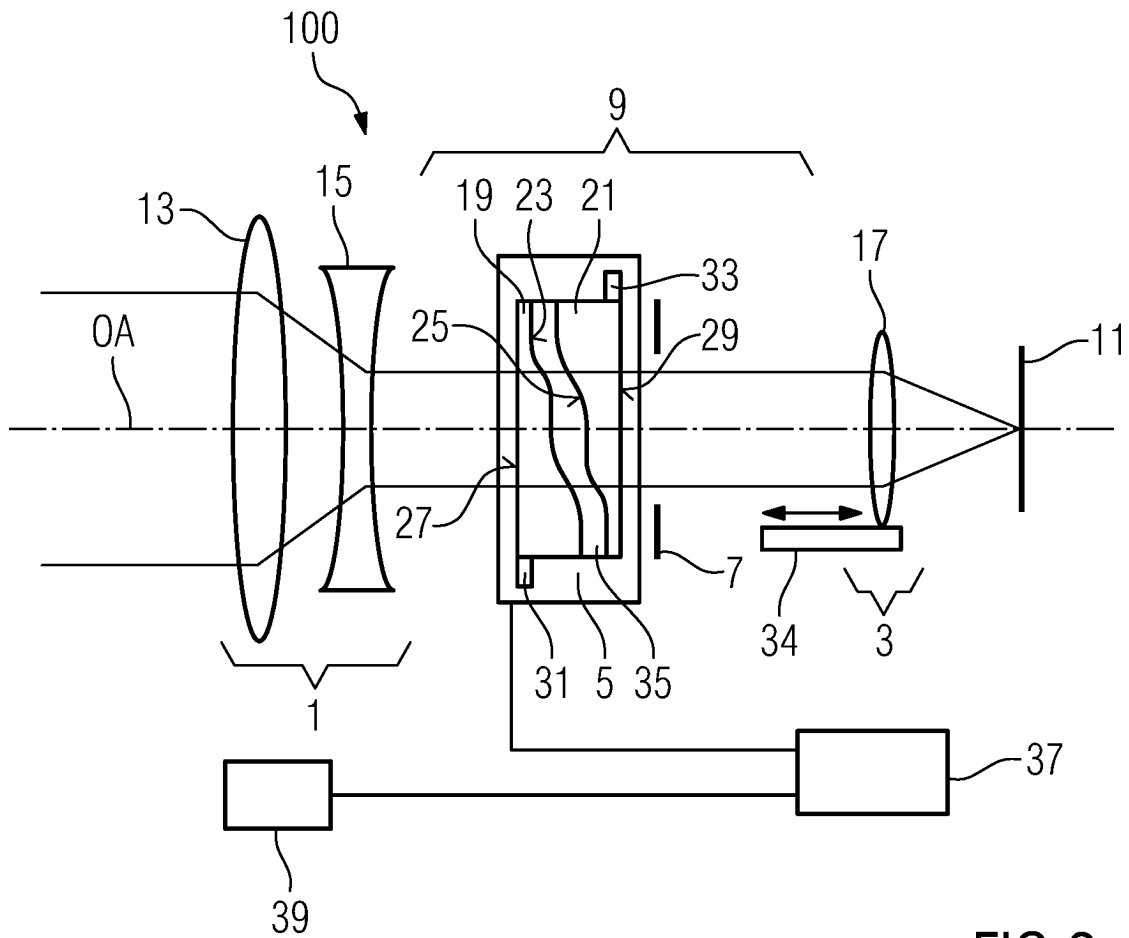
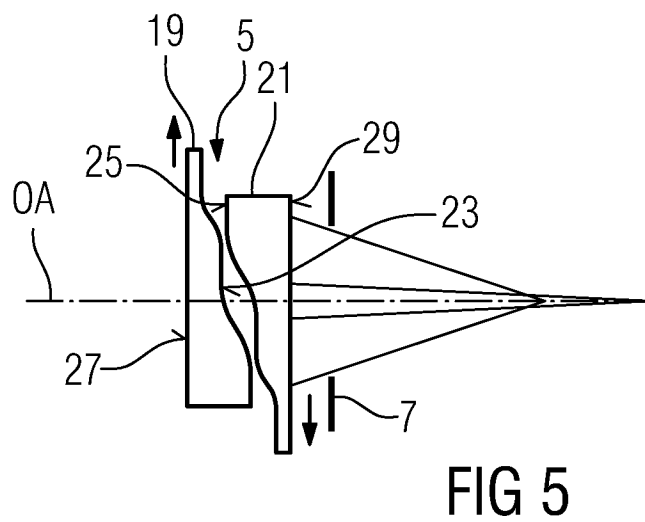
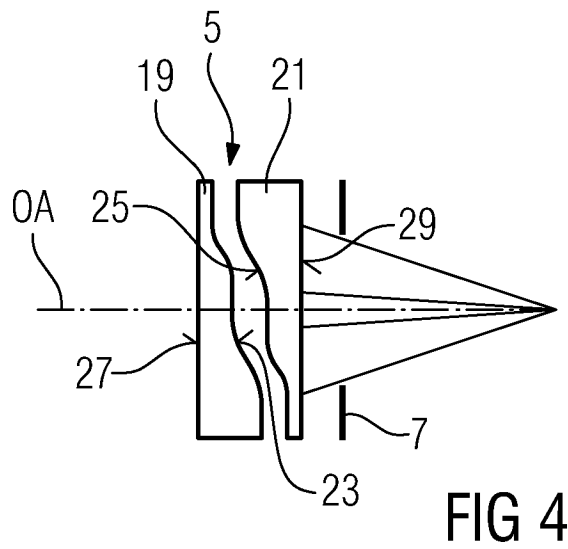
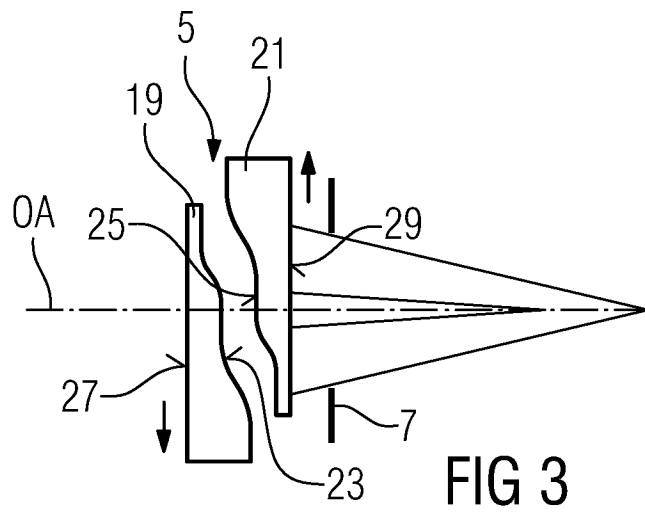


FIG 2



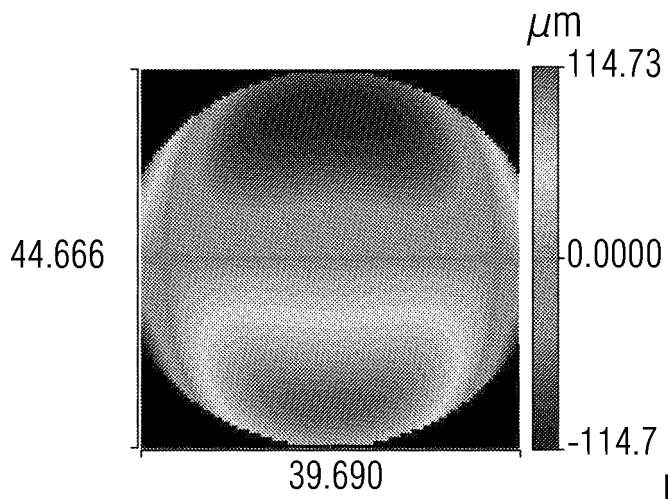


FIG 6

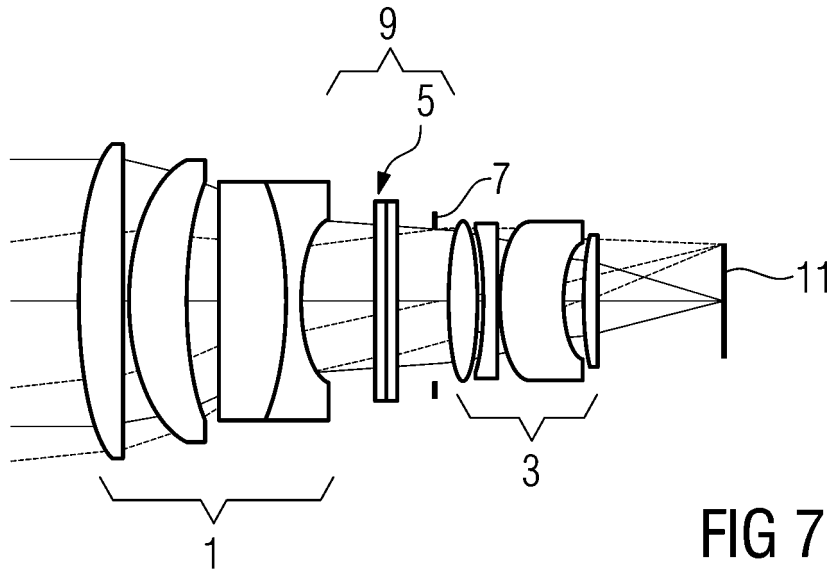


FIG 7

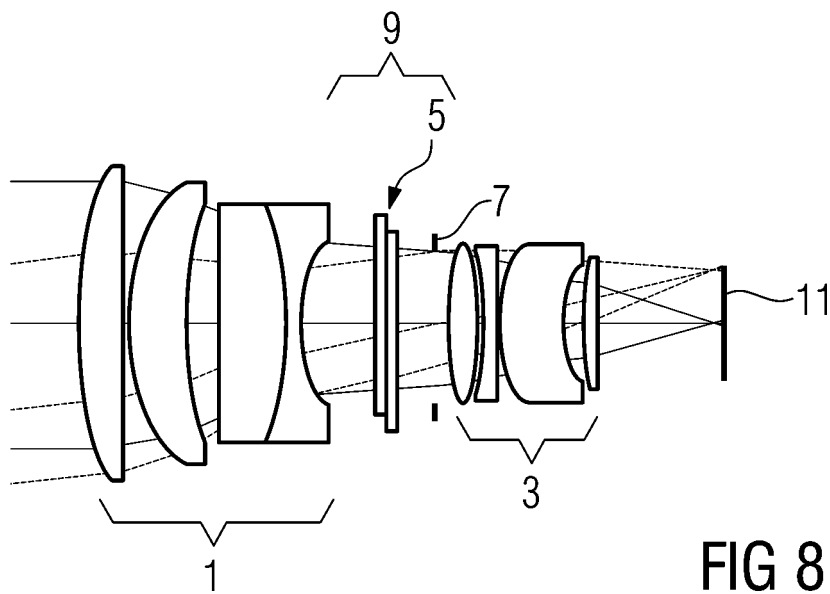


FIG 8

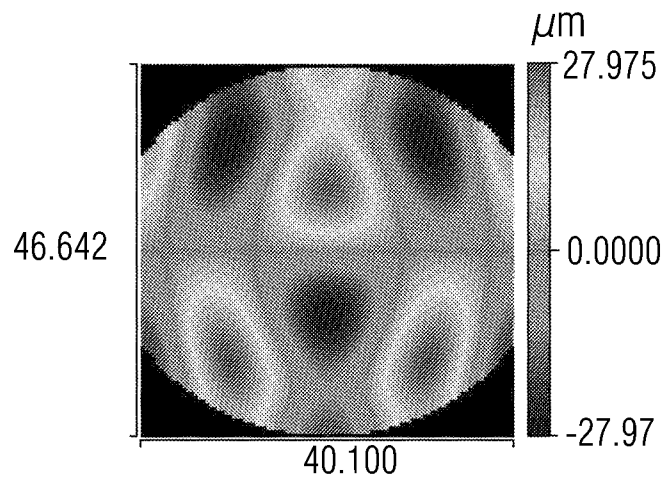


FIG 9

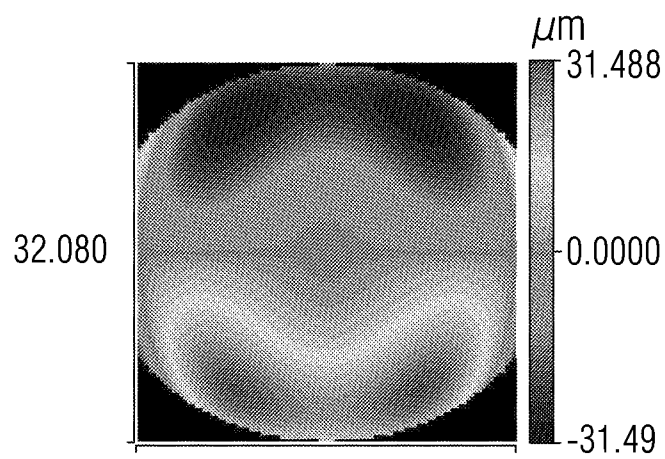


FIG 10

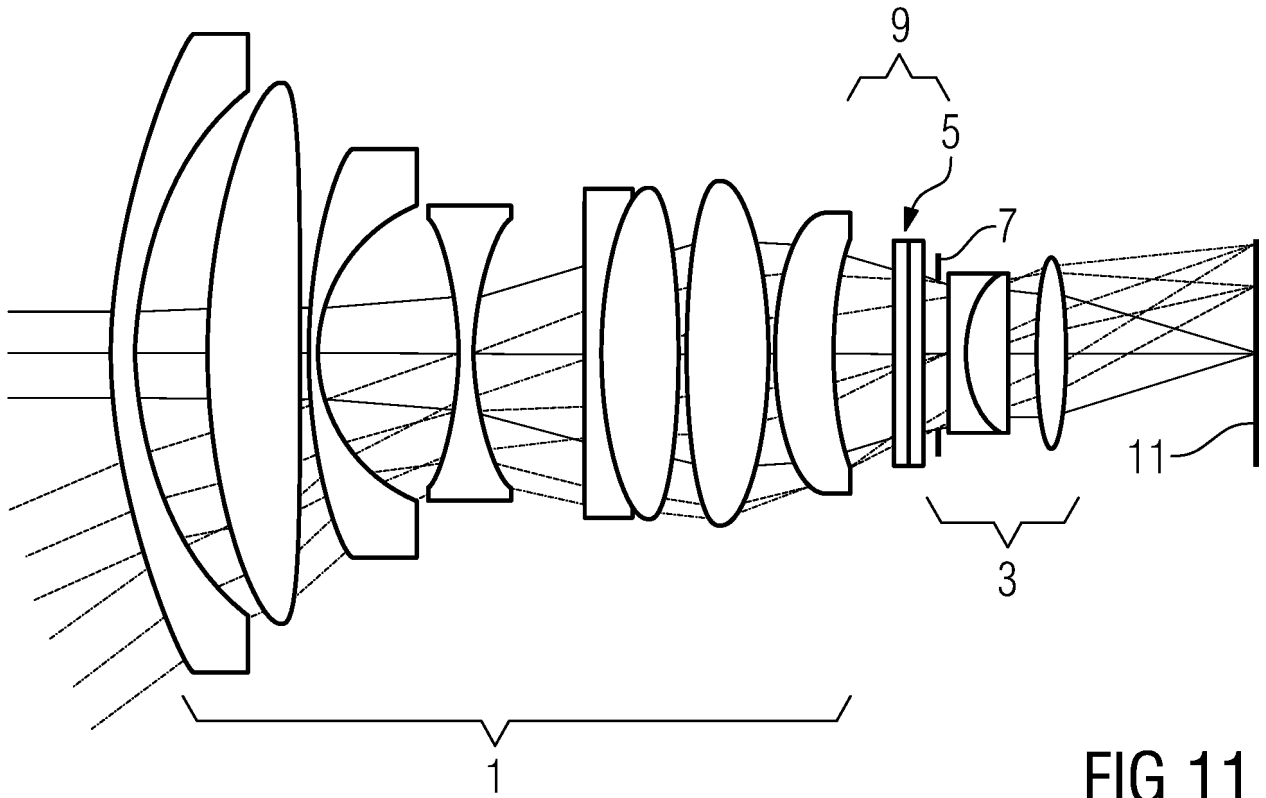


FIG 11

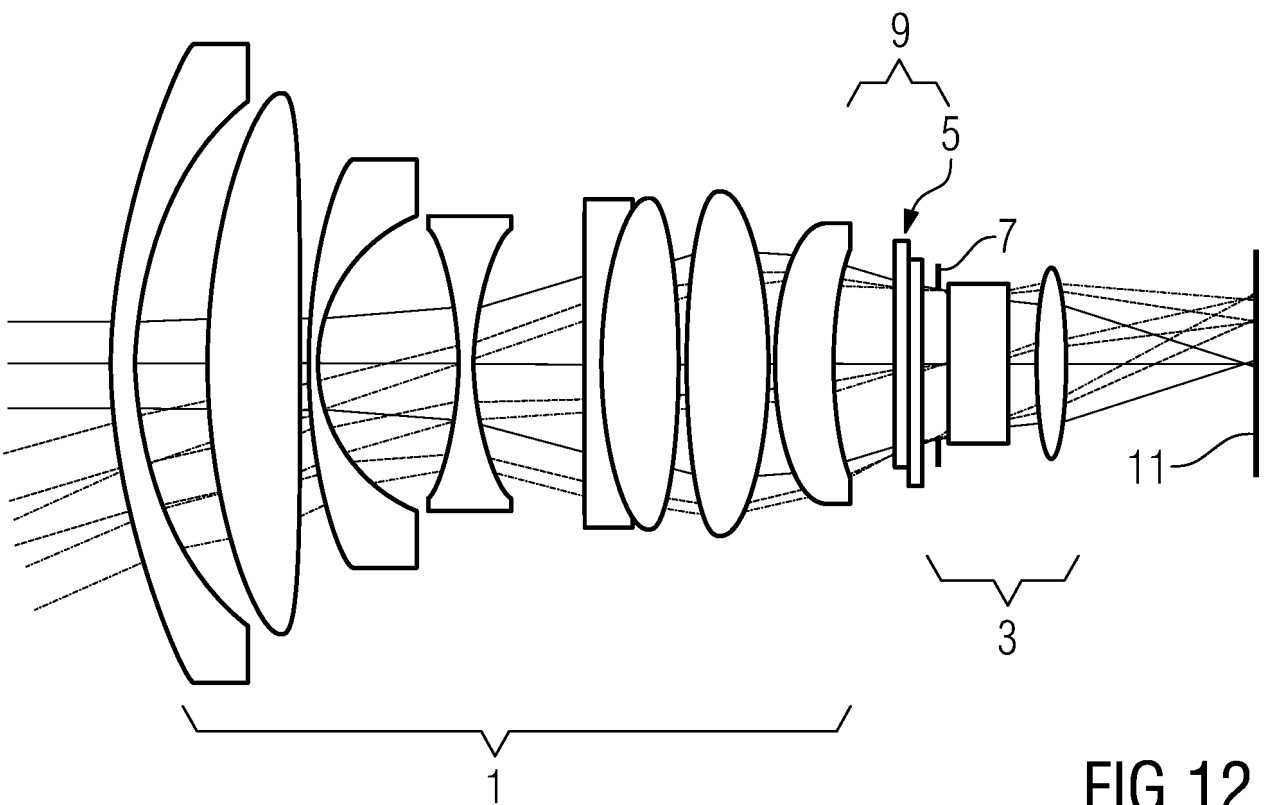


FIG 12