



(10) **DE 10 2016 123 732 A1** 2017.06.08

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2016 123 732.9**

(22) Anmeldetag: **07.12.2016**

(43) Offenlegungstag: **08.06.2017**

(51) Int Cl.: **G02B 11/20** (2006.01)

G02B 11/00 (2006.01)

G02B 13/00 (2006.01)

G02B 1/02 (2006.01)

(66) Innere Priorität:

10 2015 015 960.7 **07.12.2015**

(71) Anmelder:

Strömich, Norbert, 99096 Erfurt, DE

(74) Vertreter:

**Patentanwälte Olbricht, Buchhold, Keulertz
Partnerschaft mbB, 60325 Frankfurt, DE**

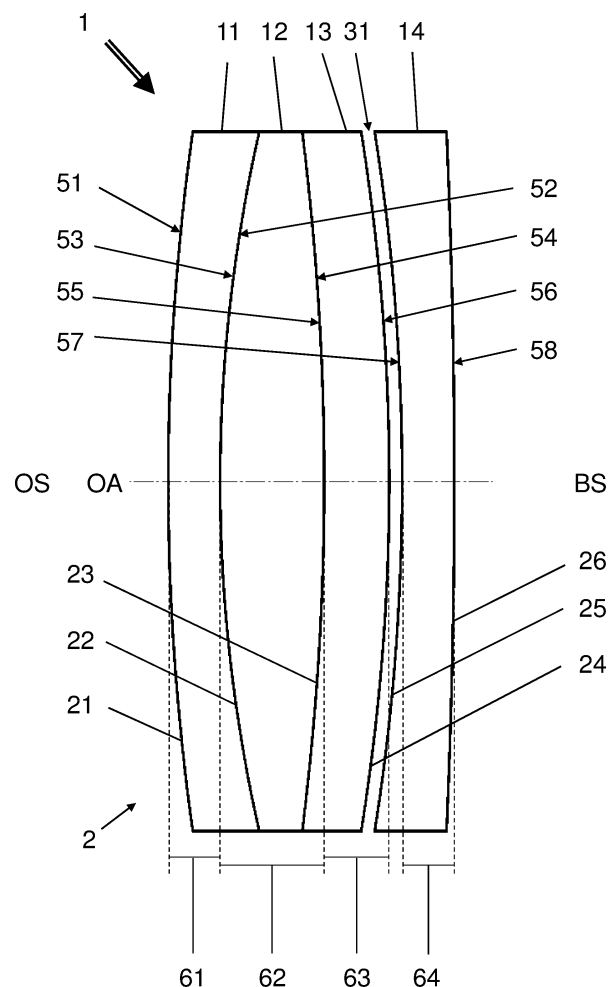
(72) Erfinder:

Laux, Uwe, 99425 Weimar, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Polychromatisches Objektiv und Verfahren zum Entwurf eines polychromatischen Objektivs**

(57) Zusammenfassung: Polychromatisches Objektiv (1), aufweisend vier Linsen (11, 12, 13, 14), die jeweils durch einen zwischen zwei Linsen befindlichen Luftspalt oder jeweils durch ein zwischen zwei Linsen befindliches, optisch transparentes Medium entlang einer optischen Achse (OA) angeordnet sind, wobei die erste Linse (11) eine negative Brechkraft aufweist und die dritte Linse (13) entweder eine positive oder negative Brechkraft aufweisen, und wobei zwischen der ersten Linse (11) und der dritten Linse (13) eine zweite Linse (12) mit einer positiven Brechkraft angeordnet ist und die vierte Linse (14) eine negative Brechkraft aufweist, wobei die erste Linse (11), die dritte Linse (13) und die vierte Linse (14) jeweils aus einem optischen Medium besteht, wobei die zweite Linse (12) ein auf einem Erdalkalifluorid oder einem Alkalifluorid basierendes optisches Medium aufweist.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft gemäß dem Oberbegriff von Anspruch 1 ein polychromatisches Objektiv für vielfältige Zwecke der optischen Abbildung, welches z. B. als Fernrohr- bzw. Kollimatorobjektiv großer Öffnung und mit lichtstarken Öffnungsverhältnissen bei höchster Bildgüte eingesetzt werden kann und ein Verfahren zum Entwurf eines polychromatischen Objektivs gemäß Anspruch 11. Ausgestaltungen des polychromatischen Objektivs sind Gegenstand der Ansprüche 2 bis 10.

[0002] Diese Anmeldung nimmt die Priorität der am 07.12.2015 beim Deutschen Patent- und Markenamt eingereichten Patentanmeldung mit dem Aktenzeichen 10 2015 015 960.7 in Anspruch, auf deren Inhalt hiermit vollumfänglich Bezug genommen wird.

[0003] Die Lichtrichtung bezeichnet die Richtung, die das Licht durch das Objektiv von der Objektseite her zu der Bildseite nimmt. Die Linsen eines Objektivs sind entlang der Lichtrichtung angeordnet, beginnend mit der objektseitig ersten Linse bis zur letzten Linse, die dem Fokus des Objektivs am nächsten steht.

[0004] Bekannte technische Lösungen für apochromatische Fernrohr- bzw. Kollimatorobjektive bestehen aus zwei, drei oder vier Linsen und lassen sich wie folgt unterteilen:

- Zweilinsige Apochromate sind dadurch ausgezeichnet, dass deren Linsen aus verschiedenen Glasarten oder einer Glaslinse und einer Linse aus einem Kristall oder einem kristallähnlichen Glas bestehen. Die Linsen sind entweder voneinander durch einen dünnen Luftspalt getrennt oder durch ein dazwischen befindliches fluides optisch transparentes Medium verbunden.
- Dreilinsige Apochromate zeichnen sich dadurch aus, dass deren Linsen aus verschiedenen Glasarten oder zwei Glaslinsen und einer Linse aus einem Kristall oder einem kristallähnlichen Glas, bzw. einer Glaslinse und zwei Linsen aus einem Kristall oder einem kristallähnlichen Glas bestehen. Die Linsen sind entweder voneinander durch einen dünnen Luftspalt getrennt oder durch ein dazwischen befindliches fluides optisch transparentes Medium verbunden.
- Vierlinsige Apochromate bestehen aus zwei Linsenpaaren zu jeweils zwei Linsen, wobei die Linsen jeden Paares jeweils aus Glas und aus einem Kristall oder einem kristallähnlichen Glas sind. Die Glaslinse und die Linse aus einem Kristall oder einem kristallähnlichen Glas sind jeweils voneinander durch einen dünnen Luftspalt getrennt oder durch ein dazwischen befindliches fluides optisch transparentes Medium verbunden. Die zwei Linsenpaare sind voneinander durch einen großen Luftabstand getrennt.

[0005] Als bekannte Lösungen sind die Schriften DE 31 20 276 A1, DD 292 731 A5, DD 241 142 A1, DD 245 499 A1, DD 266 860 A1, DD 269 692 A1, G 89 02 221.1, DE 41 09 835 A1 und DE 43 10 660 A1 zu nennen.

[0006] DE 31 20 276 A1 zeigt ein Linsensystem, bei dem mindestens ein optisches Kalziumfluoridelement in Kombination mit mindestens zwei üblichen Kronglaslinselementen verwendet wird.

[0007] DD 292 731 A5 zeigt einen kurzbrennweitigen Fernrohr- oder Kollimatorapochromaten, wobei der Apochromat aus einer Verbundgruppe aus drei Linsen, deren mittlere aus Bariumfluorid oder Kalziumfluorid besteht, und einer Einzellinse aufgebaut ist, die sich im konvergenten Strahlengang zwischen der Verbundgruppe und einem Brennpunkt befindet, daß der Abstand zwischen der Verbundgruppe und der Einzellinse kleiner 1/5 der Brennweite ist.

[0008] DD 241 142 A1 zeigt einen dreilinsigen Apochromaten bestehend aus einer Anordnung von drei aneinandergekoppelten optischen Elementen zwischen denen als Verbundmedium ein fluides optisch transparentes Medium eingesetzt ist, dadurch gekennzeichnet, daß die Anordnung der optischen Elemente eine Brechkraftfolge "–+–" aufweist, wobei das erste optische Element ein zerstreuer Meniskus aus Glas, das zweite optische Element eine Bikonvexlinse aus Flußspat oder flußspatähnlichem Glas und das dritte optische Element ein weiterer zerstreuer Meniskus aus Glas ist und die Linsen über ein fluides optisch transparentes Verbundmedium formschlüssig miteinander verbunden sind.

[0009] DD 245 499 A1 zeigt einen Achromaten mit Korrektor, bei dem das optische System aus zwei Gliedern besteht, wobei das erste ein verkitteter zweilinsiger Achromat als Objektiv ist, und das zweite ein vierlinsiger Korrektor ist, dessen Linsen durch ein fluides, optisch transparentes Medium formschlüssig miteinander verbunden sind. Die erste Linse des Korrektors ist eine Bikonvexlinse aus BaK5, die zweite eine Bikonvexlinse aus FK5, die dritte eine Bikonvexlinse aus BaF₂ oder SrF₂ und die vierte eine Bikonvexlinse aus FK5.

[0010] DD 266 860 A1 zeigt ein apochromatisches Großfeldobjektiv bestehend aus 6 Linsen, die in vier Baugruppen zusammengefasst sind, wobei die zweite Baugruppe im Gegensatz zur dritten eine sehr große, positive oder negative, Brennweite hat und die dritte Baugruppe annähernd die positive Brechkraft des Objektivs hat.

[0011] DD 269 692 A1 zeigt ein apochromatisches Objektiv bestehend aus fünf Linsen, wobei das Frontglied eine mittels eines flüssigen Mediums verbundene Dreifachgruppe der Brechkraftfolge " $-+ -$ " ist, wobei die Positivlinse der Dreifachgruppe ein Erdalkalifluorid ist und die umschließenden Negativlinsen aus Gläsern sind.

[0012] G 89 02 221.1 zeigt einen Halbapochromat als 3-linsige Verbundgruppe mit der Brechkraftfolge " $+ - +$ ", zwei Glas-Luftflächen und unter Verwendung eines Verbundmediums, wobei die negative Linse aus KzF2, die Frontlinse aus ZK2 und die bildseitige Linse aus BaK2 besteht.

[0013] DE 41 09 835 A1 zeigt einen apochromatischen Feldlinsenkolimator bestehend aus 9 Linsen und maximal 10 Glas-Luftflächen: Verwendete Materialien sind hoch durchlässige Krongläser, Quarzglas und Erdalkali-fluorid.

[0014] DE 43 10 660 A1 zeigt ein apochromatisches Objektiv, bei dem als Sondermedium nicht Flußspat, sondern ein Fluorophosphatglas zum Einsatz kommt, wobei alle 3 Linsen miteinander verbunden sind, sei es durch ein festes kittähnliches oder auch durch ein zähflüssiges ölähnliches Medium.

[0015] Bei größeren Öffnungen und lichtstärkeren Öffnungsverhältnissen weisen die herkömmlichen Apochromate einen spektralbereichsbezogenen Farblängs- und Gaußfehler auf, der die polychromatische Point Spread Function (PSF, deutsch: Punktverteilungsfunktion) stört. Das Airy-Scheibchen entspricht der PSF einer Kreisblende. Die PSF beschreibt mathematisch ein abbildendes System. Das reale Bild gefaltet (mathematische Faltung) mit der PSF ergibt das beobachtete Bild. Der polychromatische Strehl wird aus diskreten Strehlwerten für festgelegte Spektralbereiche berechnet.

[0016] Bei allen bisher bekannten optischen Systemen sind die Abbildungsfehler im visuellen Wellenlängenbereich von 450 (436) bis 656 nm weitestgehend beseitigt. Die Abbildungsleistung dieser Objektive nach dem Stand der Technik ist für visuelle Anwendungen ausreichend. Der Gaußfehler (chromatische Variation des Öffnungsfehlers) ist wegen der spektralen Empfindlichkeit und Wichtung (Berechnung mit Wichtungstabellen, die meist der wellenlängenabhängigen Hellempfindlichkeit des Auges angepasst sind) bei visuellen Anwendungen von geringerer Bedeutung.

[0017] Nachteilig bei allen diesen Apochromaten nach dem Stand der Technik ist, dass sie nicht über einen großen Wellenlängenbereich apochromatisch korrigiert sind, insbesondere nicht für den Wellenlängenbereich vom UV (UV = Ultraviolett, 365 nm) bis in das IR (IR = Infrarot, 1014 nm), den moderne CCD-Kameras nutzen. Astronomische UV-VIS-IR-Spektrographen sind für diesen Spektralbereich korrigiert, benötigen dafür aber mehr als vier Linsen.

[0018] Die Stützwellenlängen sind die klassischen Fraunhofer-Wellenlängen, wie sie in jedem Glaskatalog als Bezugswellenlängen zu Grunde gelegt werden. Die verwendeten Stützwellenlängen sind (in nm):

365,01460
404,65610
435,83430
479,99140
486,13270
546,07400
587,56180
643,84690
656,27250
706,51880
852,11010
1013,9800

[0019] Die Strehl-Zahl oder das Strehl-Verhältnis ist ein Maß für die optische Qualität von Teleskopen und anderen optischen Instrumenten. Sie ist benannt nach dem deutschen Physiker und Mathematiker Karl Strehl. Einzelheiten sind in der DIN ISO 10110-5 festgelegt. Ein nützliches Maß für die Abbildungsqualität eines Systems ist die "Strehlsche Definitionshelligkeit" oder das "Strehlsche Intensitätsverhältnis", die als Verhältnis der Intensität in der Mitte des Punktbildes zu derjenigen des aberrationsfreien optischen Systems definiert ist. Der

Strehl sagt aus, wie viel Licht im Vergleich zu dem theoretisch möglichen, im Beugungsscheibchen vereint wird und wie viel Licht sich außerhalb befindet. Dieser Wert wird in zwei verschiedenen Schreibweisen angegeben. Entweder z. B. 80% oder 0,8. Bei einem Strehl-Wert von 1 (entsprechend 100%) wäre alles Licht innerhalb des Beugungsscheibchens, welches in der Theorie auch dort hingehört. Das System wäre ideal gefertigt. Optiken mit einer Strehl-Definitionshelligkeit besser 0,8 gelten nach dieser Norm als beugungsbegrenzt. Bei Abbildungen in Verbindung mit CCD-Kameras werden chromatische Bildfehler sichtbar und besonders der Gaußfehler wird sehr störend. Die Strehl-Definitionshelligkeit fällt bereits 50 bis 100 nm von der Mitte des Spektralbereichs sehr deutlich ab (d. h. Strehl-Definitionshelligkeit unter 0,8; oftmals sogar unter 0,5).

[0020] Von polychromatisch beugungsbegrenzter Korrektur wird dann gesprochen, wenn im definierten Spektralbereich die monochromatischen Strehlintensitäten (Strehl-Definitionshelligkeitswert) den 80% Wert (Beugungsgrenze) für jede einzelne gerechnete (rechenbare) Stützwellenlänge nicht unterschreitet.

[0021] Somit ist neben der Farblängsfehlerkorrektur (Apochromasie) auch die gleichwertige Korrektur des Öffnungs- und Gaußfehlers bezogen auf eine gemeinsame Fokalebene erforderlich (echte Polychromasie). Isoplanasie und Sinusbedingung sind für Öffnungsfehlerfreie Systeme gleichzusetzen. Unabhängig von der Position eines Strahles in der Pupille wird ein gleichgroßes Bild am gleichen Ort erzeugt. Die Brennweite ist damit für jeden Punkt in der Pupille gleich. Die Erfüllung der Sinusbedingung (1873 von Ernst Abbe aufgestellt) bewirkt auch im achsnahen Bereich die Komafreiheit.

[0022] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein polychromatisches, isoplanatisches Objektiv und ein Verfahren zu dessen Entwurf anzugeben, das auch bei großen Öffnungen und lichtstarken Öffnungsverhältnissen über einen großen Stützwellenlängenbereich beugungsbegrenzt abbildet.

[0023] Diese Aufgabe wird gelöst durch ein polychromatisches Objektiv mit den Merkmalen des Anspruchs 1 sowie durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 11.

[0024] Die Erfindung betrifft ein polychromatisches Objektiv, aufweisend vier Linsen, die jeweils durch einen zwischen zwei Linsen befindlichen Luftspalt oder jeweils durch ein zwischen zwei Linsen befindliches, optisch transparentes Medium (Verbindungsmedium) entlang einer optischen Achse angeordnet sind, wobei die erste Linse eine negative und die dritte Linse entweder eine positive oder negative Brechkraft aufweisen, und wobei zwischen der ersten Linse und der dritten Linse eine zweite Linse mit einer positiven Brechkraft angeordnet ist und die vierte Linse eine negative Brechkraft aufweist, wobei die erste Linse, die dritte Linse und die vierte Linse jeweils aus einem optischen Medium besteht, wobei die zweite Linse ein auf einem Erdalkalifluorid oder einem Alkalifluorid basierendes Medium aufweist.

[0025] Das optische Verbindungsmedium ist vorzugsweise ein Fluid (Öl), kann aber auch plastischelastischer Kitt, Luft oder Vakuum sein, d. h. optische Medien, die in der Lage sind, Differenzen der linearen Ausdehnung der Linsen auszugleichen. Das optische Verbindungsmedium sollte eine Brechzahl zwischen 1,435 (CaF_2) bzw. 1,617 (N-KZFS4) aufweisen, vorzugsweise den Mittelwert der anschließenden Medien.

[0026] Durch die Ausgestaltung, Anordnung und Materialauswahl der Linsen ist ein polychromatisches Objektiv herstellbar, das mit besonders wenig Linsen auskommt. Bevorzugt besteht das Objektiv aus den vier Linsen. Das erfindungsgemäße polychromatische Objektiv ermöglicht z. B. in Verbindung mit nachgekoppelten Fokalreduktor-Korrektoren (optische Systeme zur Brennweitenverkürzung und der Bildfeldebnung) und Feldkorrektoren (optische Systeme zur Bildfeldebnung) polychromatische Systeme mit einem ca. um den Faktor 0,7 vergrößerten Öffnungsverhältnis gegenüber herkömmlichen Apochromaten und sehr großen Bildfeldern von ca. 3,5 bis 4° bzw. ca. 70 mm Bildkreis im Spektralbereich von 405 bis 852 nm mit beugungsbegrenzter Abbildung. Im angrenzenden Spektralbereich von 365 bis 1014 nm ist, je nach Schmelze des Halbzeugs, aus dem die Linsen hergestellt werden, mit größeren Variationen der Definitionshelligkeit zu rechnen.

[0027] Ebenso ist an der erfindungsgemäßen Ausgestaltung vorteilhaft, dass die zweite Linse geschützt zwischen den Linsen aus den optischen Medien liegt. Vorteilhaft ist weiterhin, dass durch den vierlinsigen Aufbau des polychromatischen Objektivs viele Glasvariationen möglich sind.

[0028] Eine besonders zweckmäßige Ausführungsform sieht vor, dass sich zwischen der dritten Linse und der vierten Linse ein Abstand befindet, der durch einen Luftspalt gebildet ist. Durch die Beabstandung der dritten Linse von der vierten Linse lässt sich die beabsichtigte Strehl-Definitionshelligkeit in einer besonders vorteilhaften Weise erreichen.

[0029] Bevorzugterweise ist vorgesehen, dass die erste Linse jeweils die zweite Linse, sowie die zweite Linse und die dritte Linse jeweils Abstand von 1 bis maximal 15 μm , vorzugsweise bis maximal 10 μm , weiter bevorzugt maximal 5 μm zueinander aufweisen. Weiterhin ist es besonders zweckmäßig, dass an den Grenzflächen zwischen dem jeweiligen Linsenmaterial und Luft die Linsen mit einer Antireflexbeschichtung ausgestattet sind.

[0030] Durch die Abstände der ersten drei Linsen ist gleichermaßen eine gewisse Toleranz gegenüber Materialausdehnungen, die durch das thermische Verhalten der optischen Medien hervorgerufen werden, gegeben. Zudem sind die Abstände so gewählt, dass die Auswirkungen der Brechungen an den jeweiligen Linsenflächen vernachlässigbar sind. Die Brechungen an den Glas-Luft Grenzflächen werden außerdem durch die Antireflexbeschichtung in besonders vorteilhafter Weise abgeschwächt.

[0031] Besonders bevorzugter Weise ist vorgesehen, dass sich zwischen der ersten Linse, der zweiten Linse und der dritten Linse jeweils ein optisch transparentes Medium befindet, vorzugsweise ein fluides.

[0032] Durch das Vorsehen eines optisch transparenten Mediums werden thermische Spannungen zwischen den Linsen ausgeschlossen. Außerdem passen sich die optischen Linsen schneller an wechselnde Temperaturveränderungen an, so dass sich das thermische Verhalten des Gesamtsystems verbessert. Darüber hinaus gibt es weniger Glas-Luft-Flächen, so dass ein hoher Transmissionsgrad durch Vermeidung von Reflexionsverlusten erreicht wird. Das optisch transparente Medium sorgt dafür, dass die Linsen, zwischen denen sich das optisch transparente Medium befindet, zusammenfügbar sind, sodass durch die Fügung keine Spannungen in den Linsen auftreten. Außerdem sind die Linsen auf diese Weise leicht justierbar. Zudem kann der Brechungsindex des optisch transparenten Mediums derart gewählt werden, sodass der Brechungsindex zwischen oder zumindest im Bereich der Brechungsindizes der jeweiligen Linsen liegt, wodurch die Brechung an den Grenzen zwischen den Linsen vermindert wird. Der Einfluss des optischen Mediums auf den Strahlengang ist, bedingt durch die geringe Dicke, ohnehin zu vernachlässigen.

[0033] Eine besonders zweckmäßige Ausführungsform sieht vor, dass sich zwischen der dritten Linse und der vierten Linse ein Abstand befindet, der durch einen Luftspalt gebildet ist.

[0034] Durch das Vorsehen eines Luftspalts zwischen der dritten und vierten Linse sind für die der Bildseite zugewandten Fläche der dritten Linse und die der Objektseite zugewandten Fläche der vierten Linse unterschiedliche Radien ermöglicht. Insbesondere ist durch das Vorsehen des Luftspalts ein negativer Radius für die Bildseite der dritten Linse und ein positiver Radius für die Objektseite der vierten Linse, oder umgekehrt, ermöglicht.

[0035] Eine bevorzugte Weiterbildung sieht vor, dass zwischen der dritten Linse und der vierten Linse ein fluides optisch transparentes Medium angeordnet ist.

[0036] Durch das Vorsehen eines optisch transparenten Mediums werden thermische Spannungen zwischen der dritten Linse und der vierten Linse ausgeschlossen. Außerdem passen sich die optischen Linsen schneller an wechselnde Temperaturveränderungen an, so dass sich das thermische Verhalten des Gesamtsystems verbessert. Darüber hinaus gibt es weniger Glas-Luft-Flächen, so dass ein hoher Transmissionsgrad durch Vermeidung von Reflexionsverlusten erreicht wird. Das optisch transparente Medium sorgt dafür, dass die Linsen, zwischen denen sich das optisch transparente Medium befindet, zusammenfügbar sind, sodass durch die Fügung keine Spannungen in den Linsen auftreten. Außerdem sind die Linsen auf diese Weise leicht justierbar. Zudem kann der Brechungsindex des optisch transparenten Mediums derart gewählt werden, sodass der Brechungsindex zwischen oder zumindest im Bereich der Brechungsindizes der jeweiligen Linsen liegt, wodurch die Brechung an den Grenzen zwischen den Linsen vermindert wird. Der Einfluss des optischen Mediums auf den Strahlengang ist, bedingt durch die geringe Dicke ohnehin zu vernachlässigen.

[0037] Eine weitere bevorzugte Ausführungsform sieht vor, dass der Abstand im Bereich der optischen Achse zwischen der dritten Linse und der vierten Linse geringer ist, als der kleinste Durchmesser der ersten Linse, der zweiten Linse, der dritten Linse und der vierten Linse.

[0038] Durch den Abstand zwischen der dritten Linse und der vierten Linse wird eine besonders kompakte Bauform des polychromatischen Objektivs erreicht.

[0039] Eine besonders zweckmäßige Ausgestaltung sieht vor, dass das optische Medium der ersten Linse, der dritten Linse und der vierten Linse, jeweils ein Kronglas, ein Flintglas, ein Bariumkronglas, ein leichtes Flintglas oder ein Bariumflintglas ist.

- [0040]** Durch das Vorsehen der oben genannten Medien sind die optischen Eigenschaften der Linsenanordnungen in einem weiten Bereich durch die Auswahl eines entsprechenden Mediums definierbar.
- [0041]** Bevorzugterweise ist vorgesehen, dass das optische Medium der zweiten Linse ein Erdalkalifluorid aus der Gruppe CaF_2 , SrF_2 , BaF_2 oder LiF ist.
- [0042]** Erdalkalifluoride oder Alkalifluoride weisen eine hohe Teildispersion im kurzwelligen Bereich des Spektrums auf, was bedeutet, dass sich der Brechungsindex in diesem Bereich stark mit der Wellenlänge des Lichts ändert. Dadurch sind Farblängsfehler des Objektivs, die in Verbindung mit den optischen Medien auftreten, korrigierbar.
- [0043]** Vorzugsweise ist vorgesehen, dass eine erste Fläche der zweiten Linse konvex ist, eine zweite Fläche der zweiten Linse konvex ist, eine erste Fläche der dritten Linse konkav ist, eine zweite Fläche der dritten Linse konvex ist, eine zweite Fläche der ersten Linse konkav ist, eine erste Fläche der ersten Linse konvex oder konkav ist, eine erste Fläche der vierten Linse konkav ist, eine zweite Fläche der vierten Linse konkav oder konvex ist, wobei die zweite Fläche der ersten Linse, die erste Fläche der zweiten Linse, die zweite Fläche der zweiten Linse, die erste Fläche der dritten Linse, die zweite Fläche der dritten Linse und die erste Fläche der vierten Linse sphärisch sind und die erste Fläche der ersten Linse und die zweite Fläche der vierten Linse asphärisch oder sphärisch sind.
- [0044]** Dadurch, dass alle Linsen, bzw. der Großteil der Linsen sphärisch ausgebildet sind, verringert sich der Herstellungsaufwand der einzelnen Linsenoberflächen. Zudem sind durch entsprechende Anordnung zweier sphärischer Flächen zueinander geringe Linsenabstände möglich.
- [0045]** Eine weitere bevorzugte Ausführungsform sieht vor, dass sich die zweite Fläche der ersten Linse und die erste Fläche der zweiten Linse, sowie die zweite Fläche der zweiten Linse, sowie die erste Fläche der dritten Linse und die zweite Fläche der dritten Linse, sowie die erste Fläche der vierten Linse unmittelbar gegenüberstehen, wobei die erste Fläche der ersten Linse und die zweite Fläche der vierten Linse, entlang der optischen Achse gesehen, die Außenseiten des polychromatischen Objektivs bilden.
- [0046]** Eine derartige Anordnung der Linsen gestaltet sich für das polychromatische Objektiv vorteilhaft, da die Abstände zwischen den Linsen und insbesondere zwischen der dritten Linse und der vierten Linse besonders gering ausfallen. Somit sind Luftspalte zwischen den Linsen weitestgehend beseitigt. Dies wirkt sich positiv auf das Brechungsverhalten des polychromatischen Objektivs aus, da die Lichtbrechung bei einer derartigen Anordnung der Linsen im Wesentlichen von den optischen Eigenschaften der Linsen abhängt.
- [0047]** Eine besonders zweckmäßige Ausführungsform sieht vor, dass die zweite Fläche der ersten Linse sowie die erste Fläche der zweiten Linse einen zweiten Radius haben, die zweite Fläche der zweiten Linse sowie die erste Fläche der dritten Linse einen dritten Radius haben, die zweite Fläche der dritten Linse einen vierten Radius hat und die erste Fläche der vierten Linse einen fünften Radius hat.
- [0048]** Vorzugsweise hat die erste Fläche der ersten Linse einen ersten Radius. Außerdem ist es zur Erreichung der gewünschten Definitionshelligkeit günstig, wenn die zweite Fläche der vierten Linse einen sechsten Radius hat.
- [0049]** Dadurch, dass die erste Linse an ihrer zweiten Fläche auf der Bildseite und die zweite Linse ihrer ersten Fläche auf der Objektseite den gleichen Radius haben, sind die Linsen mit einem besonders geringen Abstand zueinander anordenbar. Gleiches gilt für die zweite und die dritte Linse, die für die jeweils der anderen Linse zugewandten Fläche denselben Radius aufweisen. Durch den Abstand zwischen der dritten Linse und der vierten Linse sind für die Fläche auf der Bildseite der dritten Linse und für die Fläche auf der Objektseite der vierten Linse unterschiedliche Radien vorsehbar, sodass eine Variation der optischen Eigenschaften des polychromatischen Objektivs in einem großen Bereich ermöglicht wird.
- [0050]** Durch Ausgestaltung der Radien ist die erste Linse als Streulinse, die zweite Linse als Sammellinse, die dritte Linse entweder als Sammellinse oder als Streulinse und die vierte Linse als Streulinse ausbildbar, wodurch die optischen Eigenschaften des polychromatischen Objektivs insbesondere in Verbindung mit der Materialauswahl für die optischen Medien in Bezug auf den Strehlwert günstig sind.
- [0051]** Eine weitere bevorzugte Ausführungsform sieht vor, dass das polychromatische Objektiv im Wellenlängenbereich zwischen 365 nm und 1014 nm beugungsbegrenzt ist.

[0052] Durch den Strehlwert des polychromatischen Objektivs, der über den Wellenlängenbereich zwischen 365 nm und 1014 nm im beugungsbegrenzten Bereich liegt, ist die Abbildungsqualität des polychromatischen Objektivs in Bezug auf die chromatische Aberration hoch. Dies trifft auch für Wellenlängenbereiche von etwa 360 nm bis etwa 400 nm und etwa 700 nm bis etwa 1020 nm zu. Diese Wellenlängenbereiche sind insbesondere für Astronomische UV-VIS-IR-Spektrographen relevant und können mittels geeigneter Detektoren erfasst werden, wobei die Beugungsbegrenzung für eine hohe Abbildungsqualität sorgt.

[0053] Besonders bevorzugter Weise ist vorgesehen, dass das polychromatische Objektiv einen Strehlwert für einen Wellenlängenbereich zwischen etwa 400 nm und etwa 700 nm über 0,9 aufweist.

[0054] Ein hoher Strehlwert im Bereich von etwa 400 nm bis etwa 700 nm gestaltet sich vorteilhaft, da das Objektiv insbesondere bei Anwendungsfällen in diesem Bereich (etwa in Objektiven für Fotoapparate, Ferngläser oder Fernrohren) eine hohe Abbildungsgenauigkeit aufweist.

[0055] Eine weitere bevorzugte Ausführungsform sieht vor, dass die erste Linse, die zweite Linse und die dritte Linse eine Dreifachverbundgruppe bilden und die vierte Linse eine freistehende Einzellinse ist.

[0056] Das Gruppieren der ersten drei Linsen in einer Dreifachverbundgruppe und das Vorsehen einer weiteren vierten Linse wirkt sich besonders vorteilhaft auf die Strehl-Definitionshelligkeit des Objektivs aus.

[0057] Für das polychromatische Objektiv ist in einer weiteren Ausführungsform vorgesehen, dass entlang der optischen Achse vier Linsen mit fünf optisch wirksamen Radien angeordnet sind, von denen zwei Radien Glas-Luft-Flächen bilden. Bevorzugt sind entlang der optischen Achse vier Linsen mit acht optisch wirksamen Radien angeordnet, von denen alle acht Radien Glas-Luft-Flächen bilden. Diese Konfigurationen der Linsen und der optisch wirksamen Radien wirken sich vorteilhaft auf die Beugungsbegrenztheit des Objektivs aus.

[0058] Weiterhin betrifft die Erfindung ein Verfahren zum Entwurf eines polychromatischen Objektivs, insbesondere, wie es vor- und nachstehend beschrieben ist bei dem die Definition eines Spektralbereichs mittels einer Stützwellenlängen- und Wichtungstabelle eine primäre Bezugsgröße für die Berechnung der polychromatischen Bildgüte ist, und die Berechnung der Wellenfront für 9 bis 12 Stützwellenlängen innerhalb des Spektralbereichs unter Berücksichtigung von Schmelzenmessprotokollen und daraus die Berechnung der Strehl-Definitionshelligkeit bezogen auf eine gemeinsame Fokalebene erfolgt, und durch eine besondere Materialauswahl der Materialien für die optischen Medien der ersten, zweiten, dritten und vierten Linse und die Berechnung der Wellenfront für 9 bis 12 Stützwellenlängen in dem Spektralbereich eine beugungsbegrenzte Abbildungsleistung des polychromatischen Objektivs in einem Spektralbereich zwischen Stützwellenlängen von 365 nm bis 1014 nm.

[0059] Dadurch, dass die Wellenfronten für 9 bis 12 Stützwellenlängen berechnet werden, lassen sich die optischen Parameter durch die Wahl der Linsengeometrien und der optischen Medien dahingehend optimieren, dass für jede der untersuchten Wellenlängen (bzw. Stützwellenlängen) eine beugungsbegrenzte Abbildung erreicht wird. Die Spektralbereiche außerhalb des visuellen Spektrums sind ebenfalls durch den Einbezug entsprechender Stützwellenlängen in die Optimierung mit einbeziehbar. Durch die Berücksichtigung von Daten aus den Schmelzenmessprotokollen der Halbzeuge, aus denen die Linsen hergestellt werden, wird die Genauigkeit der Optimierung erhöht, da bezüglich der optisch relevanten Materialeigenschaften der jeweiligen optischen Medien genauere Ausgangsdaten für die Optimierung zur Verfügung stehen.

[0060] Das polychromatische Objektiv weist im Spektralbereichsintervall in der Regel jeweils einen monochromatischen Strehl von mindestens 0,8 auf.

[0061] Dies wird vorzugsweise erreicht, indem einem dreilinsigen CaF_2 -Apochromat, bei dem die Linsen durch ein dazwischen befindliches fluides optisch transparentes Medium verbunden sind, eine vierte Linse hinzugefügt wird. Durch die Glaskombinationen kann der Farbblängsfehler deutlich besser korrigiert werden und der besonders störende Gaußfehler, der bei einem dreilinsigen Apochromat nach dem Stand der Technik nicht korrigierbar ist, wird fast völlig behoben. Bei einem solchen polychromatischen Objektiv kommen andere optische Gläser als beim dreilinsigen Apochromat zur Anwendung.

[0062] Dazu bestehen die vier Linsen des polychromatischen Objektivs bevorzugt ausschließlich aus refraktiven optischen Elementen unterschiedlicher Materialien, wobei vier Linsen entlang der optischen Achse angeordnet sind, wobei das polychromatische Objektiv besonders gut mit den Gläsern der Firma SCHOTT AG mit

den Produktbezeichnungen N-BAK1, NSK2, N-BAK4 in Verbindung mit CaF_2 und einer Linse aus F, LF, LLF, BAF und KZFS-ähnlichen Gläsern ausführbar ist.

[0063] Die Definition des Spektralbereichs mittels einer Stützwellenlängen- und Wichtungstabelle ist insbesondere für polychromatische Objektive von Bedeutung und für die Berechnung der polychromatischen Bildgüte (z. B. polychromatischer Strehl) bevorzugt eine primäre Bezugsgröße.

[0064] Statt der klassischen Rechnung mit drei bis fünf Stützwellenlängen wie bei Apochromaten nach dem Stand der Technik ist es zu bevorzugen, bei einem polychromatischen Objektiv die Berechnung der Wellenfront für ca. neun bis zwölf Stützwellenlängen im Spektralbereich unter Berücksichtigung der Schmelzenmessprotokolle und darauf basierend die Berechnung der Strehl-Definitionshelligkeit bezogen auf eine gemeinsame Fokalebene durchzuführen.

[0065] Durch die besondere Materialauswahl und die Berechnung der Wellenfront für ca. neun bis zwölf Stützwellenlängen im Spektralbereich wird vorteilhafterweise die gewünschte beugungsbegrenzte Abbildungsleistung des polychromatischen Objektivs im Wellenlängenbereich von 365 nm bis 1014 nm erreicht.

[0066] Mit optischen Systemen (Fokalreduktor-Korrektoren und Feldkorrektoren) in Verbindung mit dem polychromatischen Objektiv als Basissystem werden große Bilddiagonalen, Pixelzahlen und hohe Quanteneffizienz von CCD-Chips wie z. B. der Kodak KAF-16803 (17 Megapixel, Bilddiagonale 52,1 mm), der KAF-50100 (50 Megapixel, Bilddiagonale 61,3 mm) oder der Sony ICX-694 (65% Quanteneffizienz bei 400 nm) voll ausgenutzt.

[0067] Zur Gewährleistung extremer Öffnungsverhältnisse ($F:1$ bis $F:8$) sind in einer alternativen Ausführungsform zu den vier Linsen des polychromatischen Objektivs weitere Linsen aufzubauen, die fluiden, optisch transparenten Medien durch Luftspalte zu ersetzen oder Glas-Luftflächen als Asphären auszuführen.

[0068] Da der Spektralbereich praktisch nur durch die Transmission der optischen Gläser beschränkt wird, können die optischen Gläser durch kristalline und Sondermedien substituiert werden. Infolge dessen sind dann nutzbare Spektralbereiche von 320 bis 2500 nm möglich.

[0069] Eine besonders zweckmäßige Ausführungsform zeigt ein polychromatisches Objektiv, ausschließlich aus refraktiven optischen Elementen aus unterschiedlichen Materialien bestehend, wobei das polychromatische Objektiv vier entlang der optischen Achse angeordnete Linsen umfasst, wobei die objektseitig ersten drei Linsen eine Dreifachverbundgruppe mit der Brechkraftfolge negativ – positiv – negativ und die vierte Linse eine freistehende Negativlinse ist, wobei die Linsen der Dreifachverbundgruppe durch ein dazwischen befindliches fluides optisch transparentes Medium verbunden sind, wobei die Dreifachverbundgruppe und die vierte Linse durch einen Luftspalt voneinander getrennt sind, wobei die zweite Linse aus Flußspat (CaF_2 bzw. Kalziumfluorid) ist, wobei die erste, dritte und vierte Linse vorzugsweise jeweils aus einem der nachfolgend genannten Materialien (entsprechend den Produktbezeichnungen für Gläser der Firma SCHOTT AG) bestehen: N-BAK1, N-SK2, N-BAK4, F2, LFS, LLF1, N-LLF1, N-BAF4, N-KZFS4, wobei das optische System durch Konstruktionsdaten charakterisiert ist.

[0070] Vorzugsweise ist vorgesehen, dass die zweite Linse aus einem anderen optischen Kristall als CaF_2 , vorzugsweise aus LiF , BaF_2 oder SrF_2 besteht, wobei sich die optischen Partnermedien, mit denen das Objektiv besonders gut ausführbar ist, ändern.

[0071] Bevorzugterweise ist vorgesehen, dass die Gläser untereinander austauschbar sind, wobei auch Gläser anderer Hersteller mit analogen oder ähnlichen Eigenschaften gemäß den Austauschlisten dieser Hersteller verwendbar sind, wobei die Glaskatalogdaten nur Richtwerte für die Berechnung der Systeme sind und die reale optimale Bildgüte sowie individuelle wellenoptische Optimierung für jedes einzelne optische System über eine schmelzenoptimierte finale Designerstellung mit den Stützwellenlängen realisiert wird.

[0072] Besonders bevorzugter Weise ist vorgesehen, dass die optischen Systeme proportional oder unproportional skalierbar sind, wobei die kleinste ökonomisch sinnvoll herstellbare (freie) Öffnung ca. 80 mm und die maximal erreichbare (freie) Öffnung ca. 440 mm aufgrund der derzeitigen Verfügbarkeit von Flußspatblanks ist, wobei die Skalierung nicht durch lineare Umrechnung der Systemdaten erfolgt, sondern durch eine individuelle wellenoptische Optimierung jeden einzelnen optischen Systems und die reale optimale Bildgüte über eine schmelzenoptimierte finale Designerstellung mit den Stützwellenlängen realisiert wird.

[0073] Eine besonders zweckmäßige Ausführungsform sieht für das polychromatische Objektiv vor, dass zur Gewährleistung von Öffnungsverhältnissen zwischen $F:1$ und $F:5$ für Refraktorkameras, Astrographen und Spektrographenkameras, bei dem alternativ zu den vier Linsen weitere Linsen vorgesehen werden, wobei mindestens eine Glas-Luftfläche asphärisch ausgebildet ist.

[0074] Eine bevorzugte Weiterbildung sieht vor, dass zur Gewährleistung von Öffnungsverhältnissen zwischen $F:5$ und $F:8$ für Reisefernrohre und Refraktoren für terrestrische und Deep-Sky Beobachtungen, wobei mindestens eine Glas-Luftfläche asphärisch ausgebildet ist.

[0075] Eine weitere bevorzugte Ausführungsform sieht für das polychromatische Objektiv vor, dass zur Gewährleistung von Öffnungsverhältnissen zwischen $F:8$ und $F: \geq 15$ für Planeten-Universal-Refraktoren bei uneingeschränktem Einsatz von Feldkorrektoren, Fokalreduktor-Korrektoren und Barlowlinsen, wobei bei steigenden Öffnungen ein kleineres Öffnungsverhältnis zu wählen ist.

[0076] Weiterhin ist besonders zweckmäßig, dass die vier Linsen durch ein dazwischen befindliches fluides optisch transparentes Medium verbunden sind.

[0077] Alternativ ist in einer Ausführungsform vorgesehen, dass die vier Linsen durch einen dazwischen befindlichen Luftspalt voneinander getrennt sind.

[0078] Weiterhin ist in einer alternativen Ausgestaltung vorgesehen, dass die vier Linsen durch ein dazwischen befindliches fluides optisch transparentes Medium verbunden oder einen dazwischen befindlichen Luftspalt voneinander getrennt sind.

[0079] Weiterhin ist das polychromatische Objektiv in einer Ausgestaltung in einem Wellenlängenbereich von 320 bis 2500 nm nutzbar. Hierbei deckt der Wellenlängenbereich von 365 bis 1014 nm alle nutzbaren Empfindlichkeitsbereiche von hochwertigen CCD-Kameras nach dem Stand der Technik ab. Im IR- bzw. UV-Wellenlängenbereich schließen sich entsprechende Kamerasysteme mit Empfindlichkeiten im UV und IR an.

[0080] Außerdem wird in einer weiteren Ausgestaltung ein Wellenlängenbereich überdeckt, der dem Transmissionsbereich der optischen Medien entspricht, wobei die Transmission der optischen Gläser den erreichbaren Spektralbereich begrenzt. Dieser Bereich wird weiterhin eingeschränkt durch die Quanteneffizienz moderner CCD-Kameras. Dieser liegt für astronomische Anwendungen bei ca. 350 bis 1100 nm. Im Rahmen der optischen Entwicklung dieser Ausgestaltung wurde der Wellenlängenbereich des polychromatischen Objektivs auf 365 bis 1014 nm eingeschränkt, weil für diesen Bereich kommerzielle hochgenaue Schmelzenmessungen (Schmelzenprotokolle) lieferbar sind. Mit hohem technischen Aufwand sind auch Schmelzenmessungen unterhalb von 365 nm und oberhalb von 1014 nm möglich. Stehen diese Messwerte zur Verfügung, kann der Wellenlängenbereich entsprechend erweitert werden. Dabei ist zu erwarten, dass in den Randzonen des Spektralbereichs der Strehlwert die Beugungsgrenze unterschreiten wird. In einem Subwellenlängenbereich von 404 bis 852 nm oder 436 bis 707 nm sind Strehlwerte von deutlich besser als 0,9 erreichbar.

[0081] Außerdem sieht ein Verfahren zum Entwurf des polychromatischen Objektivs in einer alternativen Ausgestaltung vor, dass das polychromatische Objektiv ausschließlich aus refraktiven optischen Elementen unterschiedlicher Materialien mit mindestens vier, vorzugsweise genau vier, aufeinander folgenden optischen Linsen besteht, wobei die Linsen entweder voneinander durch einen dünnen Luftspalt getrennt oder durch ein dazwischen befindliches fluides optisch transparentes Medium verbunden sind, wobei die Definition des Spektralbereichs mittels einer Stützwellenlängen- und Wichtungstabelle eine primäre Bezugsgröße für die Berechnung der polychromatischen Bildgüte ist, wobei die Berechnung der Wellenfront für ca. 9 bis 12 Stützwellenlängen im Spektralbereich unter Berücksichtigung der Schmelzen-Messprotokolle und daraus die Berechnung der Strehl-Definitionshelligkeit bezogen auf eine gemeinsame Fokalebene erfolgt, wobei durch die besondere Materialauswahl und die Berechnung der Wellenfront für ca. 9 bis 12 Stützwellenlängen im Spektralbereich die gewünschte beugungsbegrenzte Abbildungsleistung des polychromatischen Objektivs im Wellenlängenbereich von 365 nm bis 1014 nm erreicht wird.

[0082] Weitere Merkmale, Einzelheiten und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus dem Wortlaut der Ansprüche sowie aus der folgenden Beschreibung von Ausführungsbeispielen anhand der Zeichnungen. Es zeigt:

[0083] Fig. 1 zeigt ein schematisches Linsenschnittbild eines erfindungsgemäßen polychromatischen Objektivs.

[0084] Das bevorzugte Ausführungsbeispiel ist nachfolgend näher beschrieben und erläutert. Das erfindungsgemäße polychromatische Objektiv **1** besteht aus vier Linsen, nämlich einer ersten Linse **11**, einer zweiten Linse **12**, einer dritten Linse **13** und einer vierten Linse **14**, die entlang einer optischen Achse OA angeordnet sind, wobei die objektseitigen OS ersten drei Linsen **11**, **12**, **13** eine Dreifachverbundgruppe **2** entweder mit der Brechkraftfolge negativ – positiv – negativ oder mit der Brechkraftfolge negativ – positiv – positiv und die vierte Linse **14** eine konkav-konvexe Linse mit negativer Brechkraft ist.

[0085] Entlang der optischen Achse OA, in Lichtrichtung von der Objektseite OS aus gesehen, ist zuerst die erste Linse **11** mit einer ersten Fläche **51** angeordnet. Die zweite Linse **12** schließt sich mit ihrer ersten Fläche **53** flächendeckend an eine, der Bildseite BS zugewandten zweiten Fläche **52** der ersten Linse **11** an. An eine zweite Fläche **54** der zweiten Linse **12**, die ebenfalls der Bildseite BS zugewandt ist, schließt sich eine erste Fläche **55** der dritten Linse **13** flächendeckend an. Die dritte Linse **13** weist eine zweite Fläche **56** auf, die der Bildseite BS zugewandt ist. Die erste Fläche **51** der ersten Linse **11** und die zweite Fläche **56** der dritten Linse **13** bilden die äußeren Flächen der Dreifachverbundgruppe **2**. Zwischen der Dreifachverbundgruppe **2** und der vierten Linse **14** ist ein Abstand **31** angeordnet. An den Abstand **31** schließt sich in Richtung der Objektseite OS eine erste Fläche **57** der vierten Linse **14** an, wobei in Richtung der Bildseite BS eine zweite Fläche **58** der vierten Linse **14** angeordnet ist. Die erste Fläche **51** der ersten Linse **11** und die zweite Fläche **58** der vierten Linse **14** bilden, entlang der optischen Achse OA gesehen, die Außenflächen des polychromatischen Objektivs **1**.

[0086] Das polychromatische Objektiv ist auf eine dem Fachmann bekannte Weise in einer (nicht abgebildeten) Fassung befestigt.

[0087] Die Dreifachverbundgruppe **2** besteht aus einer ersten Linse **11**, die eine konvex-konkave Negativlinse ist, einer zweiten Linse **12**, die eine bikonvexe Positivlinse ist und einer dritten Linse **13**, die entweder eine konkav-konvexe Negativlinse oder eine konkav-konvexe Positivlinse ist.

[0088] Die Linsen **11**, **12**, **13**, **14** sind durch ihre Radien und durch ihre Dicken beschrieben, wobei die erste Dicke **61** die Dicke der ersten Linse **11** entlang der optischen Achse OA ist, die zweite Dicke **62** die Dicke der zweiten Linse **12** entlang der optischen Achse OA ist, die dritte Dicke **63** die Dicke der dritten Linse **13** entlang der optischen Achse OA ist und die Dicke **64** die Dicke der vierten Linse **14** entlang der optischen Achse OA ist.

[0089] Jede der Linsen **11**, **12**, **13**, **14** weist zwei Flächen auf, nämlich jeweils eine erste Fläche und eine zweite Fläche. Hierbei ist jeweils die erste Fläche objektseitig OS angeordnet und die zweite Fläche bildseitig BS angeordnet. Die erste Fläche **53** der zweiten Linse **12** hat denselben zweiten Radius **22**, wie zweite Fläche **52** der ersten Linse **11**. Die erste Fläche **53** der zweiten Linse **12** und die zweite Fläche **52** der ersten Linse **11** sind sphärisch ausgebildet. Die erste Fläche **55** der dritten Linse **13** hat denselben dritten Radius **23**, wie die zweite Fläche **54** der zweiten Linse **12**. Die erste Fläche **55** der dritten Linse **13** und die zweite Fläche **54** der zweiten Linse **12** sind sphärisch ausgebildet. Der dritte Radius **23** ist im Betrag größer, als der Betrag des zweiten Radius **22**.

[0090] Die dritte Linse **13** weist eine bildseitig BS zweite Fläche **56** auf, deren Radius **24** im Betrag kleiner ist als der Betrag des dritten Radius **23**. Der Radius **26** der bildseitig BS zweiten Fläche **58** der vierten Linse **14** ist größer als der Radius **22** der objektseitig OS ersten Fläche **51** der ersten Linse **11**, wobei dieser erste Radius **11** größer als der Radius **12** der objektseitig OS ersten Fläche **53** der zweiten Linse **12** ist.

[0091] Die erste Fläche **51** der ersten Linse **11**, die erste Fläche **53** der zweiten Linse **12**, die zweite Fläche **54** der zweiten Linse **12**, die zweite Fläche **56** der dritten Linse **13** und die zweite Fläche **58** der vierten Linse **14** sind konvex ausgebildet. Die zweite Fläche **51** der ersten Linse **11**, die erste Fläche **55** der dritten Linse **13** und die erste Fläche **57** der vierten Linse **14** sind konkav ausgebildet.

[0092] Weiterhin werden die Linsen **11**, **12**, **13**, **14** durch ihre Durchmesser sowie durch ihre optischen Eigenschaften beschrieben. Zwischen der Dreifachverbundgruppe **2** und der vierten Linse **14** ist ein Abstand **31** vorgesehen, der als Luftspalt ausgebildet ist.

[0093] Die Linsen **11**, **12**, **13** der Dreifachverbundgruppe **2** sind durch ein dazwischen befindliches fluides optisch transparentes Medium verbunden. Das optische Medium der Linse **12**, die eine eingeschlossene bikonvexe Positivlinse der Dreifachverbundgruppe **2** ist, besteht aus Kalziumfluorid (CaF_2) bzw. Flußspat. Alle anderen Linsen **11**, **13**, **14** des polychromatischen Objektivs bestehen aus optischen Gläsern, wobei die äußeren Linsen (erste Linse **11** und vierte Linse **14**) aus Kronglas und die dritte Linse **13**, die zwischen der zweiten

Linse **12** (Flußspat-Linse) und der in Richtung der Bildseite BS nachgeordneten vierten Linse **14** (Negativlinse) angeordnet ist, aus Flintglas besteht.

[0094] Die Brechzahlen der zur Herstellung eines polychromatischen Objektivs verwendeten optischen Medien, die die erste Linse **11**, die dritte Linse **13** und die vierte Linse **14** aufweisen, hängt von der Wellenlänge des die jeweilige Linse durchscheinenden Lichts ab. Die Brechzahl in Abhängigkeit von der Wellenlänge lässt sich nach der Dispersionsformel nach Sellmeier beschreiben,

$$n^2(\lambda) - 1 = \frac{B_1 \lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2 \lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3 \lambda^2}{\lambda^2 - C_3}$$

wobei n die Brechzahl ist, λ die Wellenlänge ist, für die die Brechzahl berechnet wird, und $B_1, B_2, B_3, C_1, C_2, C_3$ mediumsspezifische Konstanten sind, die in Tabelle 1 angegeben sind.

Tabelle 1: Mediumsspezifische Konstanten nach Sellmeier der optischen Medien (siehe Datenblätter der optischen Gläser, z. B. SHOTT, OHARA, HOYA und weiteren Glaswerken; in denen sind alle relevanten optischen Eigenschaften der Gläser sowie die Toleranzen der Glasschmelzen definiert) nach Materialbezeichnungen der SCHOTT AG.

	B_1	B_2	B_3	C_1	C_2	C_3
N-BAK1	1,12365662	0,30927685	0,88151196	0,00644743	0,02222844	107,297751
N-SK2	1,28189012	0,25773826	0,96818604	0,00727192	0,02428235	110,377773
N-BAK4	1,28834642	0,13281772	0,94539537	0,00779981	0,03156312	105,965875
F2	1,34533359	0,20907318	0,93735716	0,00997744	0,04704508	111,886764
LF5	1,28035628	0,16350597	0,89393011	0,00929854	0,04491358	110,493685
LLF1	1,21640125	0,13366454	0,88339947	0,00857807	0,0420143	107,596306
N-LLF1	1,27618030	0,94221241	0,05468007	0,07502853	0,00911216	102,329548
N-BAF4	1,42056328	0,10272127	1,14380976	0,00942015	0,05310873	110,278856
N-KZFS4	1,35055424	0,19757551	1,09962992	0,00876282	0,03717672	90,3866994

[0095] Die Brechzahlen (Katalogbrechzahl) gemäß Tabelle 1 weisen schmelzenmäßige Schwankungen auf. Diese Toleranzen sind definiert. Für die Fertigung des polychromatischen Objektivs sollten die medienspezifischen Konstanten der Schmelzenwerte aus den Schmelzenprotokollen verwendet werden. Gläser anderer Hersteller mit ähnlichen Eigenschaften haben eine größere Abweichung als die katalogmäßigen Toleranzen. Hierzu muss im Rahmen des Optimierungsprozesses der Optik, basierend auf den Schmelzenwerten geprüft werden, ob die Strehlparameter noch erreicht werden können.

[0096] Das oben beschriebene beugungsbegrenzte polychromatische Objektiv 1 ist anhand der nachfolgend tabellarisch (Tabelle 2 bis Tabelle 13) aufgeführten Ausführungsbeispiele realisierbar. In den Tabellen sind die Radien **21, 22, 23, 24, 25, 26** der Linsen **11, 12, 13, 14** angegeben, wobei ein positiver Radius, auf der optischen Achse OA gesehen, vom Mittelpunkt der durch den Radius definierten Kreisfläche in Richtung der Objektseite OS zeigt und ein negativer Radius, auf der optischen Achse OA gesehen, vom Mittelpunkt der durch den Radius definierten Kreisfläche in Richtung der Bildseite BS zeigt.

[0097] Das in Tabelle 2 bis Tabelle 13 aufgeführte Medium ist das Material des entsprechenden Abschnitts des polychromatischen Objektivs und ist entweder eines der optischen Medien aus Tabelle 1, Luft oder Flußspat (CaF_2). Für die optischen Medien wurden die Bezeichnungen der Gläser des Unternehmens SCHOTT AG gewählt. Als optische Medien können auch Materialien von anderen Herstellern verwendet werden, sofern sie die optischen Eigenschaften entsprechend der nach Tabelle 1 angegebenen Konstanten und der damit nach der Dispersionsformel nach Sellmeier bestimmbaren Brechzahlen aufweisen. Die angegebenen Brechzahlen entsprechen der Sollbrechzahl des jeweiligen optischen Mediums und sind durch die Brechzahl, die sich aus den optisch relevanten Materialeigenschaften des jeweiligen Schmelzenprotokolls ergibt, ersetzbar.

[0098] Die jeweils erste und die letzte Distanz in der Tabelle 2 bis Tabelle 13 geben den Abstand von einem Objekt zur ersten Fläche **51** der ersten Linse **11** bzw. den Abstand der zweiten Fläche **58** der vierten Linse **14** zu der Bildebene eines Objektivs an.

[0099] Die Linsen **11**, **12**, **13**, **14** der nachfolgend aufgeführten Ausführungsbeispiele weisen vorzugsweise einen Außendurchmesser von 104 mm auf, wobei der freie Durchmesser 100 mm beträgt.

Tabelle 2: Erstes Ausführungsbeispiel

Stützwellenlänge: 546.074nm

Radius	Radius (mm)	Linse	Medium	Distanz (mm)	Brechzahl
			Luft	unendlich	1.000000
(21)	378.18				
		(11)	N-BAK1	8	1.574871
(22)	221.74				
		(12)	CaF ₂	16	1.434936
(23)	-479.63				
		(13)	F2	10	1.624080
(24)	-408.14				
			Luft	2	1.000000
(25)	-423.00				
		(14)	N-BAK1	8	1.574871
(26)	-1737.40				
			Luft	971.6468	1.000000

Tabelle 3: Zweites Ausführungsbeispiel

Stützwellenlänge: 546.074nm

Radius	Radius (mm)	Linse	Medium	Distanz (mm)	Brechzahl
			Luft	unendlich	1.000000
(21)	396.53				
		(11)	N-BAK1	8	1.574871
(22)	238.90				
		(12)	CaF ₂	16	1.434936
(23)	-409.34				
		(13)	LF5	10	1.584818
(24)	-332.49				
			Luft	2	1.000000
(25)	-338.36				
		(14)	N-BAK1	8	1.574871
(26)	-1314.78				
			Luft	972.4421	1.000000

Tabelle 4: Drittes Ausführungsbeispiel

Stützwellenlänge: 546.074nm

Radius	Radius (mm)	Linse	Medium	Distanz (mm)	Brechzahl
			Luft	unendlich	1.000000
(21)	406.87				
		(11)	N-BAK1	8	1.574871
(22)	253.37				
		(12)	CaF ₂	16	1.434936
(23)	-362.83				
		(13)	LLF1	10	1.550987
(24)	-266.51				
			Luft	2	1.000000
(25)	-270.08				
		(14)	N-BAK1	8	1.574871
(26)	-1120.18				
			Luft	971.9213	1.000000

Tabelle 5: Viertes Ausführungsbeispiel

Stützwellenlänge: 546.074nm

Radius	Radius (mm)	Linse	Medium	Distanz (mm)	Brechzahl
			Luft	unendlich	1.000000
(21)	402.05				
		(11)	N-BAK1	8	1.574871
(22)	244.97				
		(12)	CaF ₂	16	1.434936
(23)	-409.70				
		(13)	N-BAF4	10	1.608969
(24)	-330.49				
			Luft	2	1.000000
(25)	-333.27				
		(14)	N-BAK1	8	1.574871
(26)	-1295.61				
			Luft	972.9120	1.000000

Tabelle 6: Fünftes Ausführungsbeispiel

Stützwellenlänge: 546.074nm

Radius	Radius (mm)	Linse	Medium	Distanz (mm)	Brechzahl
			Luft	unendlich	1.000000
(21)	337.06				
		(11)	N-BAK1	8	1.574871
(22)	195.42				

Radius	Radius (mm)	Linse	Medium	Distanz (mm)	Brechzahl
		(12)	CaF ₂	16	1.434936
(23)	-398.99				
		(13)	N-KZFS4	10	1.616638
(24)	-242.92				
			Luft	2	1.000000
(25)	-242.89				
		(14)	N-BAK1	8	1.574871
(26)	-2068.79				
			Luft	967.0886	1.000000

Tabelle 7: Sechstes Ausführungsbeispiel

Stützwellenlänge: 546.074nm

Radius	Radius (mm)	Linse	Medium	Distanz (mm)	Brechzahl
			Luft	unendlich	1.000000
(21)	415.35				
		(11)	N-BAK1	8	1.574871
(22)	260.60				
		(12)	CaF ₂	16	1.434936
(23)	-379.38				
		(13)	N-LLF1	10	1.550977
(24)	-297.18				
			Luft	2	1.000000
(25)	-301.22				
		(14)	N-BAK1	8	1.574871
(26)	-1131.20				
			Luft	972.6083	1.000000

Tabelle 8: Siebtes Ausführungsbeispiel

Stützwellenlänge: 546.074nm

Radius	Radius (mm)	Linse	Medium	Distanz (mm)	Brechzahl
			Luft	unendlich	1.000000
(21)	359.39				
		(11)	N-SK2	8	1.609937
(22)	221.03				
		(12)	CaF ₂	16	1.434936
(23)	-508.00				
		(13)	F2	10	1.624080
(24)	-422.63				
			Luft	2	1.000000
(25)	-446.26				

Radius	Radius (mm)	Linse	Medium	Distanz (mm)	Brechzahl
(26)	-1739.33	(14)	N-SK2	8	1.609937
			Luft	970.6908	1.000000

Tabelle 9: Achtes Ausführungsbeispiel

Stützwellenlänge: 546.074nm

Radius	Radius (mm)	Linse	Medium	Distanz (mm)	Brechzahl
(21)	377.76	(11)	Luft	unendlich	1.000000
			N-SK2	8	1.609937
(22)	237.35	(12)	CaF ₂	16	1.434936
(23)	-433.51				
(24)	-342.03	(13)	LF5	10	1.584818
			Luft	2	1.000000
(25)	-352.56	(14)	N-SK2	8	1.609937
(26)	-1265.16				
			Luft	971.5725	1.000000

Tabelle 10: Neuntes Ausführungsbeispiel

Stützwellenlänge: 546.074nm

Radius	Radius (mm)	Linse	Medium	Distanz (mm)	Brechzahl
(21)	384.87	(11)	Luft	unendlich	1.000000
			N-SK2	8	1.609937
(22)	247.06	(12)	CaF ₂	16	1.434936
(23)	-394.86				
(24)	-275.61	(13)	LLF1	10	1.550977
			Luft	2	1.000000
(25)	-282.57	(14)	N-SK2	8	1.609937
(26)	-1073.82				
			Luft	971.1429	1.000000

Tabelle 11: Zehntes Ausführungsbeispiel

Stützwellenlänge: 546.074nm

Radius	Radius (mm)	Linse	Medium	Distanz (mm)	Brechzahl
			Luft	unendlich	1.000000
(21)	385.69				
		(11)	N-SK2	8	1.609937
(22)	245.10				
		(12)	CaF ₂	16	1.434936
(23)	-431.85				
		(13)	N-BAF4	10	1.608969
(24)	-339.29				
			Luft	2	1.000000
(25)	-345.88				
		(14)	N-SK2	8	1.609937
(26)	-1224.82				
			Luft	972.3772	1.000000

Tabelle 12: Elftes Ausführungsbeispiel

Stützwellenlänge: 546.074nm

Radius	Radius (mm)	Linse	Medium	Distanz (mm)	Brechzahl
			Luft	unendlich	1.000000
(21)	309.95				
		(11)	N-SK2	8	1.609937
(22)	187.23				
		(12)	CaF ₂	16	1.434936
(23)	-455.83				
		(13)	N-KZFS4	10	1.616638
(24)	-250.68				
			Luft	2	1.000000
(25)	-254.72				
		(14)	N-SK2	8	1.609937
(26)	-2183.54				
			Luft	964.9000	1.000000

Tabelle 13: Zwölftes Ausführungsbeispiel

Stützwellenlänge: 546.074nm

Radius	Radius (mm)	Linse	Medium	Distanz (mm)	Brechzahl
			Luft	unendlich	1.000000
(21)	400.85				
		(11)	N-SK2	8	1.609937
(22)	261.44				

Radius	Radius (mm)	Linse	Medium	Distanz (mm)	Brechzahl
		(12)	CaF ₂	16	1.434936
(23)	-398.14	(13)	N-LLF1	10	1.550977
(24)	-303.45		Luft	2	1.000000
(25)	-310.66	(14)	N-SK2	8	1.609937
(26)	-1050.55		Luft	972.3361	1.000000

[0100] In einem weiteren Ausführungsbeispiel wird der grundsätzliche Aufbau des polychromatischen Objektivs beschrieben durch ein vierlinsiges Objektiv, wobei die erste Linse **11**, die dritte Linse **13** und die vierte Linse aus optischen Gläsern und die zweite Linse **12** aus Flußspat (Fluorit) bestehen.

[0101] Die Brechkraft der ersten Linse **11** und der vierten Linse **14** ist negativ, die Brechkraft der zweiten Linse **12** ist positiv und die dritte Linse **13** kann sowohl eine positive als auch eine negative Brechkraft haben.

[0102] Eine weitere Ausführungsform stellt eine Variante mit einer negativen Brechkraft für die erste Linse **11**, einer positiven Brechkraft für die zweite Linse **12**, einer negativen Brechkraft für die dritte Linse **13** und einer negativen Brechkraft für die vierte Linse **14** dar.

[0103] Eine andere Ausführungsform stellt eine Variante mit einer negativen Brechkraft für die erste Linse **11**, einer positiven Brechkraft für die zweite Linse **12**, einer positiven Brechkraft für die dritte Linse **13** und einer negativen Brechkraft für die vierte Linse **14** dar.

[0104] Eine alternative Ausführungsform sieht ein polychromatisches Objektiv mit vier entlang der optischen Achse OA angeordneten Linsen **11**, **12**, **13**, **14** mit sechs optisch wirksamen Radien **21**, **22**, **23**, **24**, **25**, **26** vor, von denen vier Radien **21**, **24**, **25**, **26** Glas-Luft-Flächen bilden, wobei die objektseitigen ersten drei Linsen **11**, **12**, **13** eine Dreifachverbundgruppe **2** entweder mit der Brechkraftfolge $(-)(+)-$ oder $(-)(+)+$ und die vierte Linse **14** eine freistehende Linse mit einer negativen Brechkraft ist, wobei die Linsen **11**, **12**, **13** der Dreifachverbundgruppe **2** durch ein dazwischen befindliches fluides optisch transparentes Medium verbunden sind, wobei die Dreifachverbundgruppe **2** und die vierte Linse **14** durch einen Luftspalt voneinander getrennt sind, wobei alle Linsen **11**, **12**, **13**, **14** ausschließlich sphärische Flächen aufweisen, wobei die zweite Linse **12** aus Flußspat (CaF₂ bzw. Flußspat) ist, wobei die Linsen **11**, **13**, **14** vorzugsweise jeweils aus einem der optischen Medien bestehen, deren Brechzahl sich in Abhängigkeit von der Wellenlänge so wie die Brechzahl der Medien verhält, die in Tabelle 1 mit den Konstanten angegeben sind, wobei sich die jeweilige Brechzahl nach der Dispersionsformel nach Sellmeier bestimmen lässt.

[0105] Eine Ausführungsform des polychromatischen Objektivs umfasst vier entlang der optischen Achse OA angeordnete Linsen **11**, **12**, **13**, **14** mit fünf optisch wirksamen Radien, von denen zwei Radien Glas-Luft-Flächen bilden, wobei die in Lichtrichtung angeordneten Linsen **11**, **12**, **13** entweder die Brechkraftfolge $(-)(+)-$ oder $(-)(+)+$ aufweisen und die vierte Linse **14** eine Negativlinse ist, wobei die vier Linsen **11**, **12**, **13**, **14** durch ein dazwischen befindliches fluides optisch transparentes Medium verbunden sind, wobei die zweite Linse **12** und die dritte Linse **13** ausschließlich sphärische Flächen aufweisen.

[0106] In einer Ausgestaltung dieser Ausführungsform ist die objektseitige erste Fläche der ersten Linse **11** asphärisch deformiert (H4, H6, d. h. Asphärenkoeffizienten 4. und 6. Ordnung) und die restlichen Flächen der ersten Linse **11** und der vierten Linse **14** sind jeweils sphärisch, wobei die zweite Linse **12** aus Flußspat (CaF₂ bzw. Flußspat) ist, wobei die erste Linse **11**, die dritte Linse **13** und die vierte Linse **14** vorzugsweise jeweils aus einem der optischen Medien bestehen, deren Brechzahl sich in Abhängigkeit von der Wellenlänge so wie die Brechzahl der Medien verhält, die in Tabelle 1 mit den Konstanten angegeben sind, wobei sich die jeweilige Brechzahl nach der Dispersionsformel nach Sellmeier bestimmen lässt.

[0107] In einer weiteren Ausgestaltung der zuletzt genannten Ausführungsform ist die bildseitig zweite Fläche der vierten Linse **14** asphärisch deformiert (H4, H6, d. h. Asphärenkoeffizienten 4. und 6. Ordnung) und die

restlichen Flächen der ersten Linse **11** und der vierten Linse **14** sind jeweils sphärisch, wobei die zweite Linse **12** aus Flußspat (CaF_2 bzw. Flußspat) ist, wobei die erste Linse **11**, die dritte Linse **13** und die vierte Linse **14** vorzugsweise jeweils aus einem der optischen Medien bestehen, deren Brechzahl sich in Abhängigkeit von der Wellenlänge so wie die Brechzahl der Medien verhält, die in Tabelle 1 mit den Konstanten angegeben sind, wobei sich die jeweilige Brechzahl nach der Dispersionsformel nach Sellmeier bestimmen lässt.

[0108] Weiterhin sieht eine alternative Ausführungsform vor, dass entlang der optischen Achse OA vier Linsen **11**, **12**, **13**, **14** mit acht optisch wirksamen Radien angeordnet sind, von denen alle acht Radien Glas-Luft-Flächen bilden, wobei die in Lichtrichtung angeordnete erste Linse **11**, die zweite Linse **12** und die dritte Linse **13** entweder die Brechkraftfolge $(-)(+)-$ oder $(-)(+)+$ aufweisen und die vierte Linse **14** eine Negativlinse ist, wobei die vier Linsen **11**, **12**, **13**, **14** jeweils durch einen Luftspalt voneinander getrennt sind, wobei die zweite Linse **12** und die dritte Linse **13** ausschließlich sphärische Flächen aufweisen.

[0109] In einer Ausgestaltung dieser Ausführungsform ist die objektseitig erste Fläche der ersten Linse **11** asphärisch deformiert (H4, H6, d. h. Asphärenkoeffizienten 4. und 6. Ordnung) und die restlichen Flächen der ersten Linse **11** und der vierten Linse **14** sind jeweils sphärisch, wobei die zweite Linse **12** aus Flußspat (CaF_2 bzw. Flußspat) besteht, wobei die erste Linse **11**, die dritte Linse **13** und die vierte Linse **14** vorzugsweise jeweils aus einem der optischen Medien bestehen, deren Brechzahl sich in Abhängigkeit von der Wellenlänge so wie die Brechzahl der Medien verhält, die in Tabelle 1 mit den Konstanten angegeben sind, wobei sich die jeweilige Brechzahl nach der Dispersionsformel nach Sellmeier bestimmen lässt.

[0110] In einer weiteren Ausgestaltung der zuletzt genannten Ausführungsform ist die bildseitig zweite Fläche der Linse **14** asphärisch deformiert (H4, H6, d. h. Asphärenkoeffizienten 4. und 6. Ordnung) und die restlichen Flächen der ersten Linse **11** und der vierten Linse **14** sind jeweils sphärisch, wobei die zweite Linse **12** aus Flußspat (CaF_2 bzw. Flußspat) ist, wobei die erste Linse **11**, die dritte Linse **13** und die vierte Linse **14** vorzugsweise jeweils aus einem der optischen Medien bestehen, deren Brechzahl sich in Abhängigkeit von der Wellenlänge so wie die Brechzahl der Medien verhält, die in Tabelle 1 mit den Konstanten angegeben sind, wobei sich die jeweilige Brechzahl nach der Dispersionsformel nach Sellmeier bestimmen lässt.

[0111] Die Erfindung ist nicht auf eine der vorbeschriebenen Ausführungsformen beschränkt, sondern in vielfältiger Weise abwandbar.

[0112] Sämtliche aus den Ansprüchen, der Beschreibung und der Zeichnung hervorgehenden Merkmale und Vorteile, einschließlich konstruktiver Einzelheiten, räumlicher Anordnungen und Verfahrensschritten, können sowohl für sich als auch in den verschiedensten Kombinationen erfindungswesentlich sein.

Bezugszeichenliste

1	Polychromatisches Objektiv
2	Dreifachverbundgruppe
11	erste Linse
12	zweite Linse
13	dritte Linse
14	vierte Linse
21	erster Radius
22	zweiter Radius
23	dritter Radius
24	vierter Radius
25	fünfter Radius
26	sechster Radius
31	Abstand
51	erste Fläche der ersten Linse
52	zweite Fläche der ersten Linse
53	erste Fläche der zweiten Linse
54	zweite Fläche der zweiten Linse
55	erste Fläche der dritten Linse
56	zweite Fläche der dritten Linse
57	erste Fläche der vierten Linse
58	zweite Fläche der vierten Linse
61	Dicke 61 der ersten Linse 11

62 Dicke **62** der zweiten Linse **12**
63 Dicke **63** der dritten Linse **13**
64 Dicke **64** der vierten Linse **14**
OA optische Achse
OS Objektseite
BS Bildseite

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

- | | |
|------------------------------|------------------------------|
| - DE 102015015960 [0002] | - DD 266860 A1 [0005, 0010] |
| - DE 3120276 A1 [0005, 0006] | - DD 269692 A1 [0005, 0011] |
| - DD 292731 A5 [0005, 0007] | - DE 8902221 [0005, 0012] |
| - DD 241142 A1 [0005, 0008] | - DE 4109835 A1 [0005, 0013] |
| - DD 245499 A1 [0005, 0009] | - DE 4310660 A1 [0005, 0014] |

Zitierte Nicht-Patentliteratur

- DIN ISO 10110-5 [0019]

Patentansprüche

1. Polychromatisches Objektiv (1), aufweisend vier Linsen (11, 12, 13, 14), die jeweils durch einen zwischen zwei Linsen befindlichen Luftspalt oder jeweils durch ein zwischen zwei Linsen befindliches, optisch transparentes Medium entlang einer optischen Achse (OA) angeordnet sind, wobei die erste Linse (11) eine negative Brechkraft aufweist und die dritte Linse (13) entweder eine positive oder negative Brechkraft aufweist, und wobei zwischen der ersten Linse (11) und der dritten Linse (13) eine zweite Linse (12) mit einer positiven Brechkraft angeordnet ist und die vierte Linse (14) eine negative Brechkraft aufweist, wobei die erste Linse (11), die dritte Linse (13) und die vierte Linse (14) jeweils aus einem optischen Medium besteht, **dadurch gekennzeichnet**, dass die zweite Linse (12) ein auf einem Erdalkalifluorid oder einem Alkalifluorid basierendes optisches Medium aufweist.
2. Polychromatisches Objektiv (1) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass sich zwischen der dritten Linse (13) und der vierten Linse (14) ein Abstand (31) befindet, der durch einen Luftspalt gebildet ist.
3. Polychromatisches Objektiv (1) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass zwischen der dritten Linse (13) und der vierten Linse (14) ein fluides, optisch transparentes Medium angeordnet ist.
4. Polychromatisches Objektiv (1) nach einem der vorgehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das optische Medium der ersten Linse (11), der dritten Linse (13) und der vierten Linse (14) jeweils ein Kronglas, ein Flintglas, ein Bariumkronglas, ein leichtes Flintglas oder ein Bariumflintglas ist.
5. Polychromatisches Objektiv (1) nach einem der vorgehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das optische Medium der zweiten Linse (12) ein Erdalkalifluorid aus der Gruppe CaF_2 , SrF_2 , BaF_2 oder LiF ist.
6. Polychromatisches Objektiv (1) nach einem der vorgehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass dieses im Wellenlängenbereich zwischen 365 nm und 1014 nm beugungsbegrenzt ist.
7. Polychromatisches Objektiv (1) nach einem der vorgehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass dieses einen Strehlwert für einen Subwellenlängenbereich zwischen 436 nm und 707 nm oder von 404 nm bis 852 nm von besser als 0,9 aufweist.
8. Polychromatisches Objektiv (1) nach einem der vorgehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die erste Linse (11), die zweite Linse (12) und die dritte Linse (13) eine Dreifachverbundgruppe (2) bilden und die vierte Linse (14) eine freistehende Einzellinse ist.
9. Polychromatisches Objektiv (1) nach einem der vorgehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass entlang der optischen Achse (OA) vier Linsen (11, 12, 13, 14) mit fünf optisch wirksamen Radien angeordnet sind, von denen zwei Radien Glas-Luft-Flächen bilden.
10. Polychromatisches Objektiv (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass entlang der optischen Achse (OA) vier Linsen (11, 12, 13, 14) mit acht optisch wirksamen Radien angeordnet sind, von denen alle acht Radien Glas-Luft-Flächen bilden.
11. Verfahren zum Entwurf eines polychromatischen Objektivs (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
 - wobei die Definition eines Spektralbereichs mittels einer Stützwellenlängen- und Wichtungstabelle eine primäre Bezugsgröße für die Berechnung der polychromatischen Bildgüte ist, und
 - die Berechnung der Wellenfront für 9 bis 12 Stützwellenlängen innerhalb des Spektralbereichs unter Berücksichtigung von Schmelzen messprotokollen und daraus die Berechnung der Strehl-Definitionsichtigkeit bezogen auf eine gemeinsame Fokalebene erfolgt, und
 - durch eine besondere Auswahl der Materialien der optischen Medien der ersten, zweiten, dritten und vierten Linse (11, 12, 13, 14) und durch die Berechnung der Wellenfront für 9 bis 12 Stützwellenlängen in dem Spektralbereich eine beugungsbegrenzte Abbildungsleistung des polychromatischen Objektivs erreicht wird, und wobei
 - die Beugungsbegrenzung in einem Spektralbereich zwischen Wellenlängen von 365 nm bis 1014 nm.

Es folgt eine Seite Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

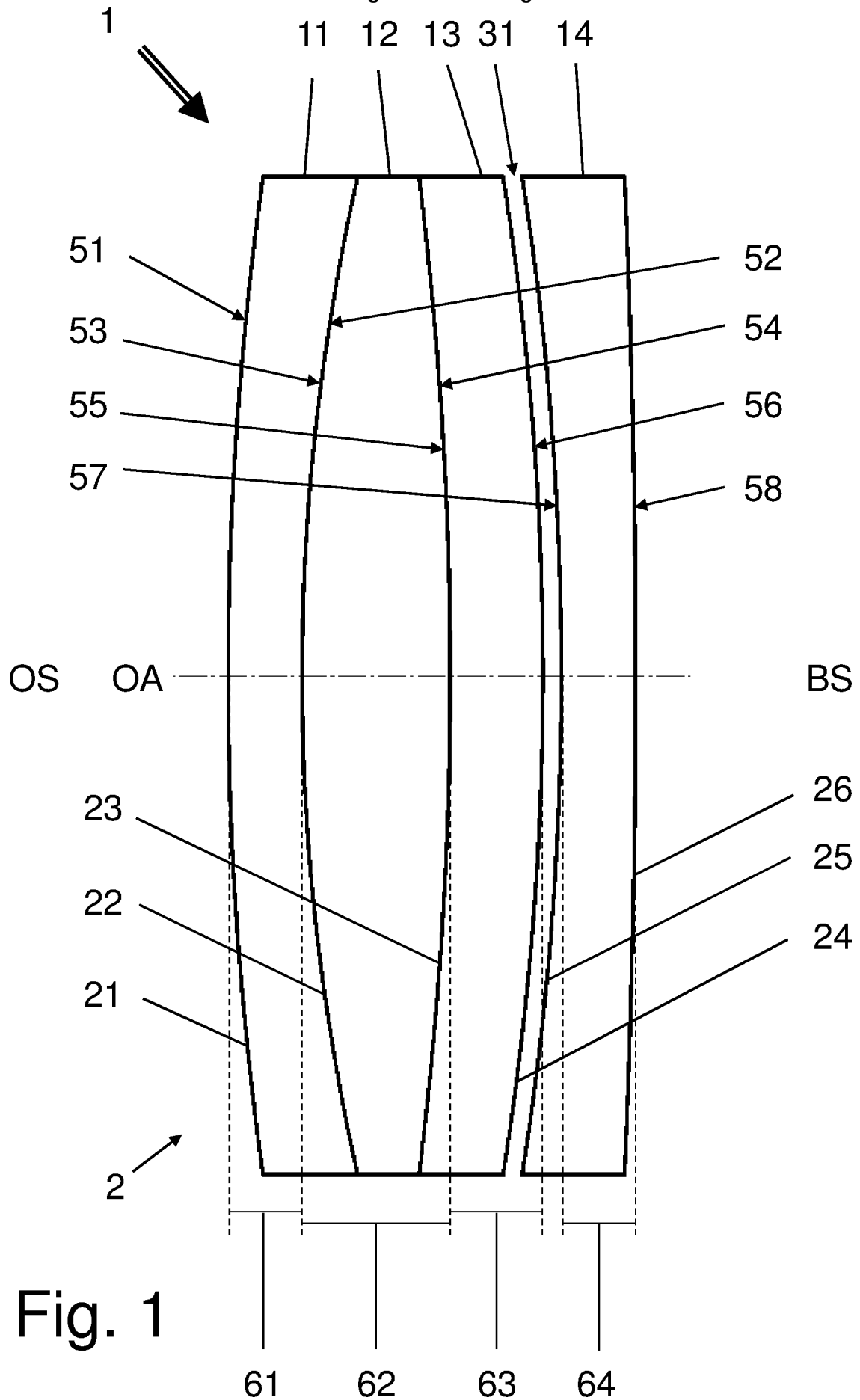


Fig. 1