

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum

Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
5. Juli 2012 (05.07.2012)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2012/089581 A2

(51) Internationale Patentklassifikation:

G02B 21/00 (2006.01) G02B 27/00 (2006.01)
G02B 21/22 (2006.01) G02B 21/36 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2011/073584

(22) Internationales Anmeldedatum:
21. Dezember 2011 (21.12.2011)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2010 064 387.4
30. Dezember 2010 (30.12.2010) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **CARL ZEISS AG** [DE/DE]; Carl-Zeiss-Straße 22, 73447 Oberkochen (DE). **CARL ZEISS MEDITEC AG** [DE/DE]; Göschwitzer Strasse 51-52, 07745 Jena (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **PRETORIUS, Marco** [DE/DE]; Katzenbachstraße 60a, 73447 Oberkochen (DE). **SEESSELBERG, Markus** [DE/DE]; Droste-Hülshoff-

Weg 11, 73431 Aalen (DE). **HOEGELE, Artur** [DE/DE]; Meisengasse 6, 73447 Oberkochen (DE). **NIETEN, Christoph** [DE/DE]; Lutherstraße 166, 07743 Jena (DE). **GEISLER, Enrico** [DE/DE]; Wöllnitzer Straße 35, 07749 Jena (DE).

(74) Anwalt: **GEYER, FEHNER & PARTNER**; Perhamerstraße 31, 80687 München (DE).

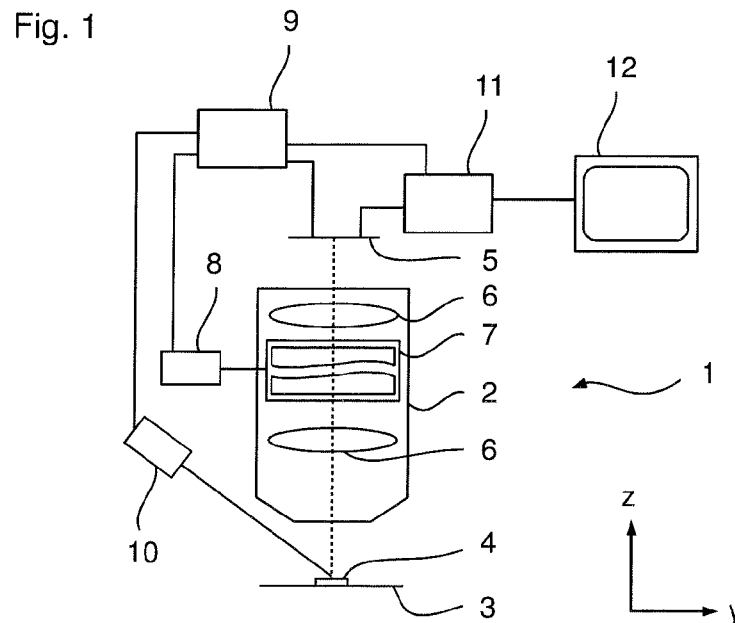
(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG,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

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: IMAGING SYSTEM AND IMAGING METHOD

(54) Bezeichnung : ABBILDUNGSSYSTEM UND ABBILDUNGSVERFAHREN



(57) Abstract: Disclosed is an imaging system comprising an imaging lens arrangement (2) for representing an object (4) on an image plane. In order to increase the depth of field, said imaging lens arrangement (2) includes an optical component (7), the refractive power of which can be modified and the optical effect of which remains rotationally symmetrical.

(57) Zusammenfassung: Es wird bereitgestellt ein Abbildungssystem

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2012/089581 A2



TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— *ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe g)*

Abbildungssystem und Abbildungsverfahren

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Abbildungssystem und ein Abbildungsverfahren, wie z.B.
5 ein Mikroskop und ein Mikroskopierverfahren.

Bei einem solchen Abbildungssystem und einem solchen Abbildungsverfahren besteht der Bedarf nach einer Erhöhung der Schärfentiefe.

10 Es ist seit langem bekannt, daß eine komplette Digitalisierung der Abbildungskette in der Mikroskopie eine ganze Reihe von grundlegenden Vorteilen ermöglichen würde. So könnten beispielsweise sehr lichtempfindliche Kameras helfen, die benötigte Beleuchtungsstärke auf dem Beobachtungsobjekt herabzusetzen und damit die Wärmebelastung zu reduzieren. Sehr schnelle Kameras können Bewegungen oder veränderliche Prozesse aufzeichnen, die bei
15 direkter visueller Betrachtung nicht aufgelöst werden können. Spektralbreitbandige Kameras können den wahrnehmbaren Wellenlängenbereich ins Infrarote oder Nah-Ultraviolette erweitern, um beispielsweise Fluoreszenz von Farbstoffen oder Lumineszenz bestimmter Marker-Substanzen sichtbar zu machen. Ferner könnte die Anzahl der Mitbeobachter prinzipiell beliebig groß gemacht werden.

20

Gleichzeitig besteht seitens der Anwender zunehmend die Erwartung, daß Bilddaten einfach archiviert werden können. Im Falle von Operationsmikroskopen etwa auch zur Erfüllung von Qualitätsnachweispflichten und zu Lehrzwecken. Hinsichtlich der Bilddarstellung selbst erwarten Anwender verstärkt, daß ihnen ergonomisch optimal an die
25 Wahrnehmungsphysiologie angepaßte Bilder dargestellt werden, etwa durch gezielte Anpassung von Kontrast oder Farbraum oder durch Anwendung geeigneter Rauschunterdrückungs- oder Bildschärfungsalgorithmen, etc., wie dies in digitalen Konsumerprodukten (etwa HDTV-Fernseher, Digitalphotographie, etc.) bereits allgemein üblich ist.

30

Ein bis heute unzureichend gelöstes Problem, das verschärft bei digitalen Bildaufnahmevorrichtungen auftritt, besteht darin, daß die Tiefenschärfe im Objektraum grundsätzlich mit der lateralen Auflösung gekoppelt und für viele Anwendungsbereiche tendenziell zu gering ist. Im zumindest näherungsweise beugungsbegrenzten Fall ist die
5 objektseitige laterale Auflösung (kleinste auflösbare Strukturbreite) proportional zu λ/NA und ist die objektseitige longitudinale Auflösung (= Schärfentiefe) proportional zu λ/NA^2 , wobei λ die Wellenlänge des zur Betrachtung genutzten Lichtes und NA die objektseitige numerische Apertur des optischen Systemes sind.

10 Während also die Auflösung kleinerer Strukturen eine Vergrößerung der objektseitigen numerischen Apertur erfordert, fällt andererseits dadurch der Schärfentiefebereich im Objektbereich stark überproportional ab, und zwar nach einem quadratischen Gesetz. In Geräten zur direkten visuellen Beobachtung ist dies dadurch abgemildert, daß das Auge eines Beobachters beim Anvisieren bestimmter Objekte als Träger von Bildinformationen unbewußt
15 (reflexgesteuert) eine Akkomodation auf die betrachtete Tiefenebene durchführt, in der der höchste Objektcontrast vorliegt. Diese Akkomodation findet bei der digitalen Aufnahme und Darstellung von Bildinformationen so nicht mehr statt, weshalb die auf einem Display dargestellten Bilder für viele Anwendungen eine zu geringe Schärfentiefe aufweisen.

20 Dieser grundlegende Nachteil hat bislang einen flächendeckenden Siegeszug digitaler Mikroskopsysteme in bestimmten Einsatzbereichen verhindert, in denen eine ausreichende Tiefenschärfe zwingend notwendig ist. Dies ist beispielsweise beim Manipulieren kleiner Objekte unter ständiger mikroskopischer Beobachtung der Fall. Ein wichtiges Beispiel hierfür stellt die mikroskopisch unterstützte Chirurgie dar, beispielsweise die Ophthalmo-, Dental,
25 Neuro- oder Spinal-Chirurgie, bei denen eine ausreichende Schärfentiefe absolut essentiell ist.

Zur Erhöhung der Schärfentiefe in digitalen Bildaufnahmevorrichtungen sind verschiedene Verfahren bereits bekannt, die grob nach statischen und dynamischen Verfahren unterschieden werden können.

30

Aus der DE 1 803 964 ist eine Vorrichtung zur Erhöhung der Schärfentiefe bekannt, bei der ein rotierendes optisches Element in Sektoren unterteilt ist, die eine unterschiedliche optische Brechkraftwirkung aufweisen sollen. Diese werden durch Drehung des Elementes periodisch in den Strahlengang eingebracht.

35

Nachteilig an diesem Funktionsprinzip ist jedoch, daß eine rotatorische Vorrichtung zur Refokussierung nur für diskrete z-Positionen und damit korrespondierende diskrete Winkelstellungen des drehbaren Elementes funktioniert. Eine kontinuierliche Bewegung des

Elementes würde stets zu einer Unschärfe bei der Abbildung führen, denn ein rotationssymmetrischer Pupilleneingriff ist nur möglich, wenn sich die optische Achse des Mikroskops und des optischen Elementes auf der drehbaren Vorrichtung in einer Fluchtlinie befinden. In allen anderen Winkelpositionen wird das drehbare Element dagegen nicht-rotationssymmetrische Abbildungsfehler induzieren, die für eine hochwertige Abbildung nicht tragbar sind. Es ist daher notwendig, die drehbare Scheibe jeweils um diskrete Winkelpositionen zu drehen, also zwischenzeitlich zu beschleunigen, wieder abzubremesen und dann ein Teilbild aufzunehmen. Dies begrenzt die nutzbare Videobildrate in der Praxis erheblich.

10

Außerdem ist der Durchmesser der Scheibe notwendiger Weise um ein Mehrfaches größer als der Durchmesser der Mikroskopoptik, wodurch ein sperriges Bauteil entsteht, das zudem, durch das notwendige Beschleunigen und wieder Abbremsen, einen relativ hohen Level an störenden mechanischen Vibrationen erzeugen würde. Des Weiteren sind mit einem derartigen Element nur relativ wenige diskrete z-Positionen der Fokusslage zu realisieren, die zudem nicht frei einjustierbar sind.

20

In der DE 10 2006 025 129 A1 ist eine Anordnung beschrieben, in der ein Mikrospiegel-Array mit individuell ansteuerbaren und in ihrer räumlichen Orientierung einstellbaren Mikrospiegeln zur Änderung der Schärfenebene benutzt werden soll. In der Druckschrift fehlen jedoch konkrete Ausführungsbeispiele.

25

Ein variabler Spiegel mit optischer Brechkraft, der den Strahlengang um 45° ablenkt, würde starke nicht-rotationssymmetrische Bildfehler erzeugen, die mit dem Schaltzustand des Spiegels variieren und deshalb auch nicht durch statische optische Elemente korrigierbar sind. Zudem würde eine Segmentierung der Pupille, die durch die Spiegel-Mikrofacetten im Prinzip nicht vermeidbar sind, Störlicht erzeugen, das den Nutzlichtstrahlengang überlagert und von diesem nicht zu trennen ist. Weiterhin stellt die benötigte Mikrospiegelmatrix eine teure und komplexe Spezialkomponente dar, die bislang nicht als kommerzielles Produkt verfügbar ist. Schließlich ist bei diesem Funktionsprinzip mindestens eine Auffaltung des Strahlengangs nötig, die im allgemeinen aus konstruktiven Gründen bei Operationsmikroskopen unerwünscht ist. Hier soll die Sichtachse mit der mechanischen Achse des Gerätes möglichst zusammenfallen, damit eine exakte und für den Operateur möglichst intuitive Positionierung des Videokopfes leichter möglich ist.

35

Ferner kann man Linsen oder Linsengruppen zur Anpassung der Fokusslage in longitudinaler Richtung mechanisch verschieben, wie z.B. in der US 2006/0181767 A1 beschrieben ist. Nachteilig daran ist, daß zur Erzielung eines vorgegebenen Änderungsbereiches der

Fokusebene relativ große Verschiebewege notwendig sind, die sich mechanisch in der gewünschten Frequenz nicht oder nur schwer realisieren lassen. Außerdem werden relativ große Erschütterungen und Vibrationen induziert, die sowohl bezüglich der Lagetoleranzanforderungen der optischen Elemente als auch der rein akustischen Störwirkung als kritisch anzusehen sind.

Zu den statischen Verfahren gehört die Verwendung spezieller phasen- und amplitudenmodellierender Masken im Bereich der Pupille eines optischen Systems (sogenannte EDOF-Masken). Mittels derartiger (unter dem Namen „PSF-Engineering“ bekannt) Methoden kann die Längenausdehnung des zentralen Beugungsmaximums der Punktbildfunktion des optischen Systems vergrößert und somit die optische Schärfentiefe erhöht werden. Andererseits kann bei bekannter PSF durch Entfaltungsoperationen in gewissen Grenzen eine Bildrekonstruktion in anderen z-Ebenen erfolgen, wie z.B. in der US 7,444,014 B2 beschrieben ist.

Nachteilig hieran ist jedoch, daß derartige Phasenmasken stets auch den Bildkontrast (der beispielsweise durch die Modulations-Transfer-Funktion genauer quantifiziert werden kann) gegenüber einem beugungsbegrenzten System gleicher Apertur aber ohne Phasenmaske herabsetzen. Insbesondere kann die beste erzielbare Auflösung innerhalb einer bestimmten Ebene signifikant verschlechtert sein, was für viele Anwendungen nicht akzeptabel ist.

Weiterhin absorbieren Amplitudenmasken einen gewissen Teil des zur Abbildung benutzten Lichtes. Dies ist ebenfalls in vielen Anwendungen kritisch, wobei ein Ausgleich der Transmissionsverluste durch eine höhere Beleuchtungsstärke wegen der damit verbundenen höheren Strahlen- und Wärmebelastung häufig nicht zulässig ist, wie z.B. bei ophthalmologischen Anwendungen. Ferner ist es nachteilig, daß mit wachsender Schärfentiefe das Rauschen des Bildsensors zu immer stärkerer Beeinträchtigung der Qualität des rekonstruierten Bildes führt.

Ausgehend hiervon ist es daher Aufgabe der Erfindung, ein Abbildungssystem mit erhöhter Schärfentiefe sowie ein entsprechendes Abbildungsverfahren bereitzustellen.

Die Aufgabe wird gelöst durch ein Abbildungssystem mit einer Abbildungsoptik zum Abbilden eines Objektes in eine Bildebene, wobei die Abbildungsoptik für eine höhere Schärfentiefe eine optische Komponente enthält, deren Brechkraft änderbar ist und deren optische Wirkung dabei rotationssymmetrisch bleibt.

Durch die änderbare Brechkraft kann die Brenn- und Schnittweite der Abbildungsoptik geändert und somit eine Änderung der Fokusposition in Richtung der optischen Achse durchgeführt werden. Da dabei die optische Wirkung der optischen Komponente rotationssymmetrisch bleibt, sind immer noch Abbildungen mit ausgezeichneter Bildqualität möglich, so daß Abbildungen mit
5 variierender Fokustiefe möglich sind. Insbesondere können diese Variationen sehr schnell und/oder kontinuierlich durchgeführt werden, so daß z.B. für einen Betrachter, der in der Bildebene die Abbildung wahrnehmen kann, ein Bildeindruck mit erhöhter Schärfentiefe vorliegt.

Das Abbildungssystem kann eine Bildaufnahmeeinheit, die die Abbildung des Objektes mit
10 unterschiedlichen Brechkraftwerten der optischen Komponente (und somit mit unterschiedlichen Fokuspositionen) in der Bildebene aufnimmt und an eine Bildverarbeitungseinheit weiterleitet, aufweisen, wobei die Bildverarbeitungseinheit anhand der Aufnahmen ein Gesamtbild des Objektes mit höherer Schärfentiefe im Vergleich zu einer der Aufnahmen erzeugt.

15 Das so erzeugte Gesamtbild kann dann z.B. über eine Anzeigeeinheit einem Benutzer dargeboten werden. Das Gesamtbild kann beispielsweise als Live-Bild dargeboten werden.

Das Abbildungssystem kann ein Steuerungsmodul für die optische Komponente aufweisen, das eine gewünschte Änderung der Brechkraft bewirkt. Das Steuerungsmodul kann Bestandteil
20 einer Steuerungseinheit des Abbildungssystems sein.

Die Anzeigeeinheit kann eine zweidimensionale oder auch bevorzugt eine dreidimensionale Darstellung bewirken. Dabei sind sämtliche bekannten Anzeigeverfahren und -vorrichtungen möglich. Insbesondere kann die Anzeigeeinheit eine autostereoskopische Anzeigeeinheit sein.
25 Es ist jedoch auch möglich, daß der Benutzer eine entsprechende Brille (beispielsweise eine Shutter-Brille) tragen muß, um den dreidimensionalen Bildeindruck zu erhalten. Ferner kann die Anzeigeeinheit auch als sogenannte HMD-Einheit ausgebildet sein. In diesem Fall trägt der Benutzer eine Brille und jedem Auge des Benutzers wird ein separates Bild dargeboten. Auch in dieser Art und Weise ist eine ausgezeichnete 3D-Darstellung mit erhöhter Schärfentiefe
30 möglich.

Bei dem Abbildungssystem kann die Brechkraft der optischen Komponente kontinuierlich änderbar sein. Insbesondere kann das Abbildungssystem noch einen Aktuator aufweisen, der die Brechkraftänderung bewirkt.
35

Bevorzugt kann die Brechkraftänderung eine periodische Brechkraftänderung sein.

Die optische Komponente kann beispielsweise eine formveränderbare Linse sein. Beispielsweise kann eine Elastopolymerlinse vorgesehen sein, bei der mittels Druckbeaufschlagung die Krümmung einer Außenfläche oder einer Grenzfläche zwischen zwei Kammern mit Medien unterschiedlicher Brechungsindizes geändert wird. Auch kann die
5 optische Komponente als Flüssiglinse ausgebildet sein, bei der mittels elektrischer Spannung ein Benetzungswinkel geändert und eine kugelförmige Begrenzungsfläche zwischen zwei Flüssigkeiten unterschiedlicher Brechungsindizes erzeugt wird.

Bevorzugt weist die optische Komponente zwei refraktive Elemente auf, die jeweils zumindest
10 eine Freiformfläche aufweisen, wobei die beiden Elemente relativ zueinander quer zur optischen Achse der Abbildungsoptik verschiebbar sind, um dadurch die gewünschte Brechkraftänderung zu bewirken. Die optische Komponente kann auch mehr als zwei refraktive Elemente aufweisen.

15 Die beiden Freiformflächen können insbesondere so ausgebildet sein, daß sie sich in einer Nullposition exakt spiegelsymmetrisch zueinander verhalten. Wenn die anderen Seiten der Elemente jeweils als plane Seiten ausgebildet sind, sind die beiden Elemente in der Nullposition quasi eine planparallele Platte.

20 Die Freiformflächen sind insbesondere Flächen, die durch folgendes Polynom dritter Ordnung beschrieben werden können:

$$z(x, y) = k_1 \cdot (x^2 \cdot y + \frac{y^3}{3}) + k_2 \cdot y$$

25 wobei hier angenommen ist, daß die laterale Verschiebung der Elemente entlang der y-Achse erfolgt. Das die Freiformfläche beschreibende Polynom kann auch noch höhere Ordnungen enthalten, die dann zur Fehlerkorrektur der Abbildungsoptik genutzt werden können.

Durch Variation von k_1 wird allgemein die Brechkraftänderung pro Verschiebeweg vorgegeben.
30 Durch Variation von k_2 wird zusätzlich eine Kippung (Drehung um die x-Achse) der Freiformfläche eingestellt, die dazu benutzt werden kann, bei gegebener Profilform die mittlere Dicke des Elements (die aus der Forderung folgt, daß die Glasdicke zur Sicherstellung einer ausreichenden Stabilität an keiner Stelle des optisch genutzten Bereiches einen bestimmten Minimalwert unterschreiten darf) und damit die Masse des Elements zu minimieren.

35

Man kann zur Vereinfachung $k_2 = 0$ setzen, so daß sich folgende Formel ergibt:

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

Es hat sich aber gezeigt, daß der Zusatzterm mit $k_2 \neq 0$ häufig vorteilhaft ist.

- 5 Ferner wird unter Freiformfläche hier insbesondere verstanden, daß es eine gekrümmte Fläche ist, die jedoch weder sphärisch gekrümmt noch rotationssymmetrisch ausgebildet ist. Insbesondere weist sie keine oder maximal eine Spiegelsymmetrieebene auf.

10 Unter der rotationssymmetrischen optischen Wirkung der optischen Komponente wird hier insbesondere verstanden, daß die optische Komponente so ausgebildet ist, daß ihre optische Wirkung möglichst exakt rotationssymmetrisch ist. Bei der Ausbildung der optischen Komponente z. B. aus den zwei refraktiven Elementen können selbst bei ideal genauer Herstellung nicht rotationssymmetrische Restfehler auftreten, die jedoch so gering sind, daß die optische Wirkung noch als rotationssymmetrisch bezeichnet werden kann.

15

Die refraktiven Elemente können eine Dicke von 0,5 bis 2 mm und eine Masse von kleiner als 2 g, insbesondere kleiner als 1 g aufweisen.

20 Eine periodische Verschiebung der beiden refraktiven Elemente zueinander von ca. 50-100 Hz ist problemlos möglich.

Im Falle der lateral gegeneinander bewegten Freiformelemente (refraktives Element mit Freiformfläche) kann die Aktorik zur Verschiebung der Freiformelemente beispielsweise Piezo-Elemente und eine mechanische Hebelvorrichtung zur Übersetzung des Hubweges der Piezo-Elemente umfassen. Die Elemente können beispielsweise eine resonante harmonische Schwingung ausführen. In diesem Falle kann die periodische Kraft des Aktuators lediglich zum Ausgleich der Dämpfungsverluste dienen, so daß nur sehr geringe Kräfte erforderlich sind, so daß Erschütterungen weitestgehend vermieden werden können. Die Ansteuerung der Z-Positionen erfolgt in diesem Fall über das Timing der Beleuchtungspulse.

30

Alternativ können die Elemente von der Aktorik aber auch auf eine Menge diskreter Positionen eingestellt werden, wo sie jeweils für ein kurzes Aufnahmezeitintervall T ortsfest stehenbleiben. Dadurch könnte auch bei Verwendung kontinuierlicher (ungepulster) Beleuchtung Bewegungsunschärfe vermieden werden, und es können beliebige, z. B. äquidistante, Positionen, die mit äquidistanten Z-Schnitten im Objektraum korrespondieren, eingestellt werden. Allerdings erfordert dieser Modus je eine Beschleunigung und eine Abbremsung pro

35

Position, so daß deutlich größere Kräfte wirken müssen, die bei höheren Frequenzen wiederum Erschütterungen hervorrufen können.

5 Bei dem erfindungsgemäßen Abbildungssystem kann die optische Komponente in einem Bereich der Abbildungsoptik angeordnet sein, in dem sich die von unterschiedlichen Feldpunkten ausgehenden Strahlbündel weitgehend überlappen. Insbesondere kann die optische Komponente nahe der Aperturblende der Abbildungsoptik oder nah an einem Bild der Aperturblende der Abbildungsoptik positioniert sein. Dies ist dahingehend vorteilhaft, daß dann die optische Komponente im wesentlichen nur eine Änderung der Fokusslage bewirkt.

10

Ferner kann die Abbildungsoptik im Strahlengang einen kollimierten Abschnitt aufweisen und kann die optische Komponente im kollimierten Abschnitt angeordnet sein.

15 Das Abbildungssystem weist ferner noch bevorzugt eine Beleuchtungseinheit auf. Insbesondere kann die Beleuchtungseinheit eine gepulste Beleuchtung bewirken. Durch eine gepulste Beleuchtung sind sehr kurze Bildaufnahmezeiten möglich. Insbesondere ist man dann nicht auf etwaige mechanische Blenden für einen Bildaufnahmesensor angewiesen, um kurze Aufnahmezeiten zu realisieren. Mittels der gepulsten Beleuchtung kann die Aufnahmezeit im wesentlichen durch die Pulsdauer eingestellt werden.

20

Ferner kann die Beleuchtungseinheit das Objekt in verschiedenen Farben zeitsequentiell beleuchten.

25 Insbesondere kann die zeitsequentielle Beleuchtung der Beleuchtungseinheit so gewählt sein, daß unter Berücksichtigung eines Farblängsfehlers der Abbildungsoptik und der gerade eingestellten Brechkraft der optischen Komponente das Objekt in derselben Tiefe mit den verschiedenen Farben aufnehmbar ist. Damit kann die Abbildungsoptik selbst ohne korrigierten Farblängsfehler ausgebildet werden, wodurch beispielsweise Linsen eingespart werden können. Dies verringert die Kosten für die Abbildungsoptik und macht sie darüber hinaus auch
30 noch leichter.

Unter derselben Tiefe wird hier insbesondere eine Tiefe verstanden, bei der einzelne Strukturen in den Aufnahmen aus derselben Tiefe selbst dann noch identifiziert werden können, wenn sie unscharf sind. Insbesondere liegt dieselbe Tiefe dann vor, wenn der Abstand nicht größer als
35 eine Rayleigh-Einheit (was λ/NA^2 entspricht) ist.

Ferner kann das erfindungsgemäße Abbildungssystem zwei aufeinanderfolgende Aufnahmen so durchführen, daß aufgrund der unterschiedlichen optischen Brechkraftwerte der optischen

Komponente beide Aufnahmen innerhalb von zwei Rayleigh-Einheiten, insbesondere innerhalb einer Rayleigh-Einheit liegen.

5 Ferner kann das Abbildungssystem z. B. als Mikroskop, Fernrohr, Fernglas, etc. ausgebildet sein. Ferner kann das Abbildungssystem als Stereoabbildungssystem (insbesondere Stereomikroskop) ausgebildet sein.

10 Für den Fall der Ausbildung als Stereoabbildungssystem kann die optische Komponente bevorzugt in dem für beide Stereokanäle gemeinsamen Strahlengang angeordnet sein.

Die Aufgabe wird ferner gelöst durch ein Abbildungsverfahren, bei dem eine Abbildungsoptik ein Objekt in eine Bildebene abbildet, wobei die Abbildungsoptik für eine höhere Schärfentiefe eine optische Komponente enthält, deren Brechkraft geändert wird und deren optische Wirkung dabei rotationssymmetrisch bleibt.

15 Weiterbildungen des erfindungsgemäßen Abbildungsverfahrens sind in den abhängigen Verfahrensansprüchen angegeben.

20 Insbesondere kann das Abbildungsverfahren als Mikroskopierverfahren und ferner als Stereo-Mikroskopierverfahren ausgebildet sein.

Es versteht sich, daß die vorstehend genannten und die nachstehend noch zu erläuternden Merkmale nicht nur in den angegebenen Kombinationen, sondern auch in anderen Kombinationen oder in Alleinstellung einsetzbar sind, ohne den Rahmen der vorliegenden
25 Erfindung zu verlassen.

Das erfindungsgemäße Abbildungssystem kann insbesondere so weitergebildet werden, daß das erfindungsgemäße Abbildungsverfahren (gemäß der beschriebenen Weiterbildungen und auch gemäß aller beschriebenen Ausführungsformen) ausgeführt werden kann. In gleicher
30 Weise kann das erfindungsgemäße Abbildungsverfahren so weitergebildet werden, daß die in Verbindung mit dem erfindungsgemäßen Abbildungssystem (einschließlich seiner Weiterbildungen und der beschriebenen Ausführungsformen) beschriebenen Abbildungsverfahren realisiert werden können.

35 Nachfolgend wird die Erfindung beispielsweise anhand der beigefügten Zeichnungen, die auch erfindungswesentliche Merkmale offenbaren, noch näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 eine schematische Ansicht einer Ausführungsform des erfindungsgemäßen Abbildungssystems;

Fig. 2 eine vergrößerte Ansicht der optischen Komponente von Fig. 1;

5

Fig. 3 ein Schnittbild der Abbildungsoptik für den Fall der Ausbildung des erfindungsgemäßen Abbildungssystems als Stereomikroskop durch eine der beiden Stereo-Teilpupillen, wobei sich das System in der Stellung befindet, in der die optische Komponente den Schärfenebenenabstand um 10 mm vergrößert;

10

Fig. 4 ein Schnittbild gemäß Fig. 3, wobei die optische Komponente 7 den Schärfenebenenabstand um 10 mm verringert;

Fig. 5 eine schematische räumliche Ansicht der gesamten Abbildungsoptik sowie der Schärfenebene und des Aufnahmesensors;

15

Fig. 6 eine Ausschnittsvergrößerung von Fig. 5;

Fig. 7 eine weitere Ausführungsform der Abbildungsoptik für den Fall der Ausbildung des Abbildungssystems als Stereomikroskop, wobei das Stereomikroskop jedoch kein Umschalelement aufweist und der Strahlengang durch eine erste Teilpupille gezeigt ist;

20

Fig. 8 eine Ansicht gemäß Fig. 7, wobei der Strahlengang durch eine zweite Teilpupille gezeigt ist;

25

Fig. 9 eine vergrößerte Ausschnittsdarstellung von Fig. 7, und

Fig. 10 eine Darstellung gemäß Fig. 7, wobei mittels der optischen Komponente 7 die Schärfenebene in Luft um 20 mm in Richtung des Hauptobjektivs 20 verlagert wurde.

30

Bei der in Figur 1 gezeigten Ausführungsform ist das erfindungsgemäße Abbildungssystem 1 als Mikroskop ausgebildet und weist eine schematisch dargestellte Abbildungsoptik 2 auf, mit welcher ein auf einem Probentisch 3 des Mikroskopes angeordnetes Objekt 4 in eine Bildebene abgebildet werden kann, in der ein Bildaufnahmesensor 5 positioniert ist.

35

Die Abbildungsoptik 2 umfaßt eine in Figur 1 schematisch durch zwei Linsen dargestellte Bildoptik 6, die die gewünschte Abbildung bewirkt, und eine optische Komponente 7, deren Brechkraft veränderbar ist, aber dabei die optische Wirkung der optischen Komponente rotationssymmetrisch bleibt.

Ferner umfaßt das Abbildungssystem 1 einen Aktuator 8 für die optische Komponente 7, eine Steuereinheit 9, eine Beleuchtungseinheit 10, eine Bildverarbeitungseinheit 11 und eine Anzeigeeinheit 12.

5

Wie bereits eingangs beschrieben wurde, ist die Tiefenschärfe im Objektraum grundsätzlich mit der lateralen Auflösung gekoppelt und für viele Anwendungsbereiche tendenziell zu gering. Im zumindest näherungsweise beugungsbegrenzten Fall ist die objektseitige laterale Auflösung (kleinste auflösbare Strukturweite) proportional zu λ/NA und ist die objektseitige longitudinale Auflösung (= Schärfentiefe) proportional zu λ/NA^2 , wobei λ die Wellenlänge des verwendeten Lichtes und NA die objektseitige numerische Apertur der Abbildungsoptik 2 ist. Somit erfordert die Auflösung kleinerer Strukturen eine Vergrößerung der objektseitigen NA, was dann nachteilig zu einem überproportionalen Abfall des Schärfetiefebereichs im Objektraum (und zwar nach einem quadratischen Gesetz) führt.

15

Um nun selbst bei hoher objektseitiger numerischer Apertur (für eine Auflösung kleiner Strukturen) einen größeren Schärfetiefebereich im Objektraum zu erhalten, ist die optische Komponente 7 so ausgebildet, daß ihre Brechkraft variiert werden kann, wobei für unterschiedliche Brechkraftwerte mittels der Abbildungsoptik 2 und dem Bildaufnahmesensor 5 Aufnahmen des Objektes 4 gemacht werden. Die Variation der Brechkraft der optischen Komponente 7 führt nun dazu, daß diesen Aufnahmen Bilder aus verschiedenen z-Ebenen des Objektes 4 entsprechen. Anders gesagt, führt eine Variation der Brechkraft der optischen Komponente 7 zu einer Bewegung der z-Fokuslage während der Bildaufnahme. Die verschiedenen Aufnahmen werden der Bildverarbeitungseinheit 11 zugeführt. Die Bildverarbeitungseinheit 11 wertet alle Aufnahmen abschnittsweise hinsichtlich der vorliegenden Schärfe der Aufnahme auf und setzt daraus ein Gesamtbild mit höherer Schärfentiefe (im Vergleich zur Schärfentiefe einer einzelnen Aufnahme) zusammen. Das Gesamtbild kann dann mittels der Anzeigeeinheit 12 dargestellt werden.

30

Damit ausreichend gute Aufnahmen erzielt werden können, ist die optische Komponente 7 so ausgebildet, daß sie stets näherungsweise eine rotationssymmetrische optische Wirkung aufweist. Somit kann eine ausgezeichnete Abbildung gewährleistet werden, selbst wenn die Brechkraft mittels der optischen Komponente 7 verändert wird.

35

Die Änderung der Brechkraft der optischen Komponente führt somit zu einer Änderung der Brennweite und Schnittweite der Abbildungsoptik, was zu der gewünschten Bewegung der z-Fokuslage führt.

Die optische Komponente mit variabel einstellbarer Brechkraft weist hier zwei refraktive Elemente 13, 14 auf (Figur 2), die jeweils mindestens eine Freiformfläche umfassen und relativ zueinander lateral (hier z.B. in y-Richtung und somit senkrecht zur optischen Achse) verschiebbar sind. Die optische Komponente 7 kann z.B. so ausgebildet sein, wie es in der US 3,305,294 beschrieben ist. Dort ist gezeigt, daß durch laterale Verschiebung zweier Elemente, die jeweils eine Planfläche und eine Freiformfläche aufweisen, wobei die Freiformfläche durch ein Taylor-Polynom in zwei Variablen beschreibbar ist, eine rotationssymmetrische optische Wirkung erzielbar ist, die sich zur Bereitstellung einer Linse variabler Brechkraft nutzen läßt.

Bei der hier beschriebenen Ausführungsform weisen beide refraktiven Elemente 13 und 14 jeweils eine plane Seite 15, 17 und jeweils eine Freiformfläche 16, 18 auf, die sich in einer Nullposition exakt spiegelsymmetrisch zueinander verhalten, so daß die beiden Elemente 13 und 14 in der Nullposition quasi eine planparallele Platte bilden. Eine reine Defokussierungswirkung läßt sich z.B. dann bewirken, wenn die Freiformflächen durch folgendes Polynom dritter Ordnung beschrieben werden können:

$$z(x, y) = k \cdot \left(x^2 \cdot y + \frac{y^3}{3} \right) \quad (1)$$

Hierbei ist angenommen, daß die laterale Verschiebung der Elemente 13, 14 entlang der y-Achse erfolgt (falls die Verschiebung entlang der x-Achse erfolgen soll, ist in obiger Gleichung 1 entsprechend die Rolle von x und y zu tauschen). Ferner ist angenommen, daß zur Beschreibung des Polynoms der vereinfachte Fall mit $k_2 = 0$ der nachfolgenden Formel (1') verwendet wird:

$$z(x, y) = k_1 \cdot \left(x^2 \cdot y + \frac{y^3}{3} \right) + k_2 \cdot y \quad (1')$$

Für parallel zur Achse einfallende Strahlenbündel bewirkt die laterale Verschiebung der beiden Elemente 13, 14 um eine Strecke s damit eine Änderung der Wellenfront gemäß der nachfolgenden Gleichung

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

also eine Änderung der Fokusslage plus ein konstanter Term (der häufig auch als Piston-Term bezeichnet wird). Dieser Piston-Term wirkt sich genau dann nicht auf die

Abbildungseigenschaften aus, wenn sich die optische Komponente 7 im Unendlichstrahlengang befindet. Eine Positionierung der optischen Komponente 7 in einem Bereich der Abbildungsoptik mit (zumindest näherungsweise) kollimiertem Strahlengang ist daher bevorzugt.

5

Wie in der schematischen vergrößerten Darstellung von Figur 2 ersichtlich ist, können die beiden relativ zueinander bewegbaren Elemente 13 und 14 so orientiert sein, daß ihre Freiformflächen 16, 18 einander zugewandt sind. In diesem Fall ist es besonders einfach, die Justierung der Nullage vorzunehmen. Dazu muß lediglich der Abstand zwischen den beiden
10 Elementen 13 und 14 so lange verringert werden, bis sich die beiden Elemente 13, 14 berühren. In dieser Position findet dann automatisch eine Zentrierung statt.

Anschließend kann der Abstand der beiden Elemente 13, 14 in axialer Richtung gerade so weit wieder vergrößert werden, daß sich die beiden Elemente 13, 14 bei der lateralen Bewegung (in
15 y-Richtung) während des funktionsgemäßen Betriebes gerade nicht berühren.

Es ist aber auch möglich, die beiden Elemente 13, 14 derart zu orientieren, daß ihre Freiformflächen 16, 18 voneinander abgewandt sind. Auf diese Weise kann der Abstand zwischen den beiden Elementen 13, 14, die sich dann an den planen Seiten 15, 17
20 gegenüberstehen, minimal gehalten werden. Dies hat sich insbesondere bei größeren Feld- und Aperturwinkeln an der Übergangsfläche zwischen den beiden Elementen 13, 14 als vorteilhaft für die Abbildungsgüte herausgestellt.

Es ist ferner möglich, daß die Freiformflächen 16, 18 zusätzlich Terme höherer Ordnung zur
25 Beeinflussung höherer Bildfehler aufweisen können. Beispielsweise würde ein Term der Form

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

vorwiegend die sphärische Aberration beeinflussen und könnte somit beispielsweise bei
30 Fokussierung in eine andere Probentiefe in einem eingebetteten Objekt (z.B. in Wasser oder Emulsionshüllen) die auftretende sphärische Aberration korrigieren helfen.

Weiter ist es auch möglich, daß die planen Seiten 15, 17 der beiden Elemente 13, 14 nicht exakt plan ausgebildet sind, sondern ebenfalls eine Wirkform aufweisen. Beispielsweise könnte
35 eine symmetrische Aufteilung des Flächenprofils für die Freiformfläche gemäß der obigen Formel 1 auf Vorder- und Rückfläche des Elementes 13, 14 bewirken, daß die Profiltiefen auf jeder der Flächen sehr gering bleiben, so daß beispielsweise eine photolithographische

Herstellung der Elemente 13, 14, bei der typischer Weise nur maximale Profiltiefen im Bereich von < 10 bis 30 µm möglich sind, erleichtert ist.

Zur Verhinderung oder Verringerung von unerwünschten Reflexen oder zur erleichterten Herstellbarkeit kann außerdem auch eine brechkraftlose Meniskuswirkung überlagert sein, d.h. auf der Vorder- und Rückseite jedes Elementes 13, 14 sind gleiche sphärische Krümmungen der Fläche dem entsprechenden Wirkprofil der jeweiligen Fläche überlagert.

Erfindungsgemäß wird die optische Komponente 7 mit variabler Brechkraft bevorzugt an einer Stelle im Strahlengang der Abbildungsoptik 2 angeordnet, an der sich die von unterschiedlichen Feldpunkten des Objekts 4 ausgehenden Strahlbündel weitgehend überlappen, wie beispielsweise in der Nähe einer Aperturblende oder dem Bild einer Aperturblende, also einer System Pupille. Dadurch wird bewirkt, daß die variable Brechkraftwirkung in erster Näherung eine reine Fokussierung und keine feldabhängigen Bildfehler erzeugt. Eine bevorzugte Position der optischen Komponente 7 erfüllt die folgende Bedingung

$$\left| \frac{y_H}{y_R} \right| \leq 0.5 \quad (4)$$

und noch bevorzugter die Bedingung

$$\left| \frac{y_H}{y_R} \right| \leq 0.2 \quad (5)$$

Hierbei ist y_H die Einfallshöhe eines Hauptstrahles (also eines Strahles durch die Mitte der Aperturblende) eines radial maximal von der optischen Achse der Abbildungsoptik 2 entfernten Feldpunktes und y_R die Einfallshöhe eines von einem Objektpunkt auf der optischen Achse ausgehenden Randstrahls (also eines Strahls durch den Rand der Aperturblende). Besonders vorteilhaft ist es, wenn diese Bedingung (gemäß einer der beiden angegebenen Ungleichungen 4, 5) gleichzeitig mit der bereits genannten Bedingung der bevorzugten Positionierung im kollimierten Strahlengang realisiert ist, d.h. wenn die optische Komponente 7 nahe einer System Pupille der Abbildungsoptik 2 und gleichzeitig im kollimierten Strahlengang positioniert ist. Dies ist in den nachfolgend in Verbindung mit Figuren 3 bis 10 noch zu beschreibenden Ausführungsformen der Fall.

Wenn das Abbildungssystem 1 als Stereo-Abbildungssystem (beispielsweise Stereo-Mikroskop) ausgebildet ist, kann die optische Komponente 7 mit variabler Brechkraft bevorzugt im Bereich

eines gemeinsamen Hauptobjektives liegen, also des Teilsystems der Abbildungsoptik, das den die Teilbündel definierenden Systemblenden vorausgeht und von allen Teilbündeln gemeinsam durchlaufen wird. In diesem Fall ändert sich der stereoskopische Betrachtungswinkel (also der Winkel zwischen den Hauptstrahlen eines betrachteten Objektpunktes) als Funktion der
5 jeweiligen z-Position dieses Objektpunktes nach der gleichen Gesetzmäßigkeit wie bei der direkten visuellen Betrachtung eines Objektes bei entsprechender Nachakkomodation der Augen. Dadurch gelingt es, zwei spezifische Tiefeninformationsreize des natürlichen Sehprozesses im Einklang miteinander zu halten, nämlich Akkomodations- und Divergenzreiz.

10 Dies ist insbesondere auch vorteilhaft, wenn das stereoskopische Abbildungssystem 1 so ausgebildet ist, daß auch eine direkte visuelle Beobachtung möglich ist. Aber auch im Fall mit einer digitalen Bildaufnahme (beispielsweise durch zwei Kameras oder auch zeitlich sequentiell mittels einer einzigen Kamera) und anschließender Darstellung der stereoskopischen Bilder auf einem geeigneten Anzeigemittel, wie z.B. einem autostereoskopischen Display, ist dies von
15 Vorteil.

Die stereoskopischen Bilder können dann im visuellen Cortex des Betrachters einfacher interpretiert werden und es tritt keine vorzeitige Ermüdung beim Betrachter auf.

20 Natürlich ist es möglich, daß diese bevorzugt genannte Positionierung im Bereich des gemeinsamen Hauptobjektives gleichzeitig mit der vorteilhaften Positionierung im kollimierten Strahlengang und/oder nahe einer Systempupille gemäß den obigen Ungleichungen vorliegt.

Der Bildaufnahmesensor kann z.B. ein CCD- oder ein CMOS-Sensor sein. Falls nötig, kann
25 diesem Sensor eine Farbfiltermaske vorgeschaltet sein, wie z.B. eine Bayer-Maske. Natürlich ist es auch möglich, mehrere Sensoren für unterschiedliche Farbkanäle vorzusehen, so daß die einzelnen Farbkanäle gleichzeitig aufgenommen werden können. Ferner kann vor dem Bildaufnahmesensor 5 noch eine spezielle Zwischen- oder Adapteroptik vorgesehen sein.

30 Das Objekt 4 wird mit dem (beispielsweise mehrfarbigen) Licht der Beleuchtungseinheit 10 beaufschlagt, wobei die Beleuchtungseinheit 10 bevorzugt als gepulste Lichtquelle (wie z.B. eine Halbleiterlichtquelle) ausgebildet ist. Dadurch ist es möglich, die zur Erzeugung rauscharmer Bilder gewünschte Lichtmenge (Lumen*Sekunde) pro Pixel innerhalb eines sehr kurzen Zeitfensters von z.B. weniger als einer Millisekunde zur Verfügung zu stellen. Je kürzer
35 die Aufnahmedauer ist, desto geringer ist die Bewegungsunschärfe bzw. desto exakter repräsentiert eine Aufnahme jeweils eine bestimmte z-Position innerhalb des Objektvolumens, wenn die optische Komponente 7 ihre Brechkraft kontinuierlich ändert, was bevorzugt ist.

Bei dem erfindungsgemäßen Abbildungssystem 1 kann auf der Anzeigeeinheit 12 ein Echtzeit-Bild dargestellt werden, also ein Bild mit ausreichender Framerate, so daß für einen Betrachter Bewegungen als natürlich fließend erscheinen und das Bild nicht flackert. Dazu ist eine Bildwiederholrate von größer als 50 Hz und bevorzugt von größer als 75 Hz gewünscht.

5 Nachfolgend werden die Framerate der Anzeigeeinheit 12 mit F_A und die entsprechende Periode mit T_A bezeichnet.

Damit innerhalb eines Anzeigeframes bzw. Anzeige eines Einzelbildes Bildinformationen aus mehreren unterschiedlichen z-Ebenen zur Verfügung stehen, arbeitet der Bildaufnahmesensor

10 5 mit einer n-fach höheren Bildaufnahmeframerate, die nachfolgend mit F_K bezeichnet wird. Die zugehörige Periode wird mit T_K bezeichnet. Durch eine exakte Synchronisation von F_K auf ein halb- oder ganzzahliges Vielfaches der Verstellfrequenz der optischen Komponente 7 läßt sich erreichen, daß der Bildaufnahmesensor 5 jeweils Teilbilder aus exakt gleichen z-Ebenen bereitstellt, die die Bildeinheit 11 zur Erzeugung des Gesamtbildes mit höherer Schärfentiefe

15 auswertet.

Bei einem halbzahligem Vielfachen der Verstellfrequenz der optischen Komponente 7 mit variabler Brechkraft ist es möglich, daß der Bildaufnahmesensor 5 auf dem Hin- und Rückweg der Verstellung der Brechkraft der optischen Komponente 7 jeweils alle für ein vollständiges

20 Anzeigebild benötigten z-Teilbilder aufnimmt, etwa analog dem Zeilensprung- oder Interlacing-Verfahren aus der Fernsehtechnik. Der Vorteil ist, daß dadurch bei begrenzter Framerate des Bildaufnahmesensors 5 dennoch ausreichend viele Zwischenpositionen in z-Richtung aufgenommen werden können.

Bevorzugt wird die Einstellung so gewählt, daß zwei aufeinanderfolgende Aufnahmen um nicht mehr als eine Rayleigh-Länge ($= \lambda/NA^2$) in z-Richtung voneinander beabstandet sind. Damit wird sichergestellt, daß die selben Abschnitte des Objektes 4 in den beiden Aufnahmen, auch wenn sie etwas unscharf dargestellt werden, noch als solche durch die Bildverarbeitungseinheit

25 11 identifiziert werden können.

Es ist auch möglich, daß die Zeitfenster der Integrationszeiten des Bildaufnahmesensors nicht äquidistant auf der Zeitachse angeordnet sind. So ist es z.B. vorteilhaft, wenn die laterale Verschiebung der beiden Elemente 13 und 14 der optischen Komponente 7 eine kontinuierliche Bewegung und (näherungsweise) möglichst sogar eine harmonische Schwingung darstellt. Auf

30 diese Weise sind die auftretenden Beschleunigungs- und Bremskräfte an den Elementen 13 und 14 selbst und an den die Kräfte aufnehmenden mechanischen Komponenten (wie z.B. dem Aktuator 8) minimiert, so daß unerwünschte Verschlechterungen der Bildgüte in Folge von Flächenverformungen oder ungewollten Lageabweichungen minimiert sind.

Bei einer harmonischen Schwingung sind die laterale Elongation der Elemente 13 und 14 und die Zeit durch ein Kosinusetz verknüpft. Die funktionale Abhängigkeit der z-Position des Fokus von der lateralen Elongation der Elemente 13 und 14 hängt im allgemeinen von der
5 genauen Form der Freiformflächen 16, 18 ab. Im einfachsten (und wohl auch häufigsten) Fall besteht hier ein lateraler Zusammenhang.

Zur Sicherstellung einer äquidistanten Aufnahmebildfolge des Objekts in der Tiefe (und somit in z-Richtung) werden die Anfangszeitpunkte für die Bildaufnahmezeitfenster des
10 Bildaufnahmesensors 5 respektive für die Beleuchtungspulse der Beleuchtungseinheit 10 invers zur z-Elongation der Fokusebene als Funktion der Zeit festgelegt, bei harmonischer z-Scanbewegung also gemäß einer Arcuskosinusfunktion. Die in den verschiedenen z-Positionen (aufgrund der variierenden Brechkraft der optischen Komponente 7) mittels des Bildaufnahmesensors 5 aufgenommenen Aufnahmen werden an die Bildverarbeitungseinheit
15 11 übertragen und dann jeweils zu einem tiefenscharfen Gesamtbild (dessen Tiefenschärfe größer ist als die Tiefenschärfe einer einzelnen Aufnahme) kombiniert, das ein Teilbild (Frame) auf der Anzeigeeinheit 12 darstellt.

Der dazu auszuübende Bildverarbeitungsalgorithmus kann z.B. in zwei Verarbeitungsschritte
20 aufgeteilt werden:

In einem ersten Schritt erfolgt eine Quantifizierung der lokalen Bildschärfe bzw. des lokalen Bildkontrastes in jeder einzelnen Aufnahme, die nachfolgend auch als z-Teilbilder bezeichnet werden. Entsprechende Basisalgorithmen sind aus dem Stand der Technik bekannt,
25 beispielsweise aus dem Bereich von Autofokuseinrichtungen.

So kann z.B. der Effekt genutzt werden, daß in einem scharfen Bildabschnitt eines z-Teilbildes die Fouriertransformierte der Autokorrelation deutlich höhere Ortsfrequenzkomponenten enthält als in einem defokussierten Bildabschnitt.
30

Ein solcher Algorithmus kann als Software und/oder Hardware implementiert werden.

Ein zweiter Schritt besteht darin, für jeden lokalen Bildausschnitt für das gewünschte Gesamtbild den jeweils schärfsten Bildausschnitt aus sämtlichen n z-Teilbildern auszuwählen
35 und zu einem Gesamtbild zu kombinieren. Auch dieser Schritt läßt sich als Software und/oder Hardware implementieren.

Zusätzlich kann noch, falls gewünscht und/oder nötig, ein sogenannter Registrierungsschritt durchgeführt werden, bei dem z.B. eine Anpassung der Abbildungsmaßstäbe, der Translation und/oder der Drehung der z-Teilbilder durchgeführt wird.

- 5 Eine solcher Schritt kann beispielsweise erforderlich sein, um die von der Fokusstellung des brechkraftvariablen Elements und somit von der Z-Position des Teilbildes im Objektraum abhängige Änderung des Abbildungsmaßstabs wieder auszugleichen. Die Z-Teilbilder werden vor der Verrechnung zu einem tiefenscharfen Gesamtbild auf den gleichen Maßstab skaliert.
- 10 Für die gepulste Beleuchtung des Objektes 4 mittels der Beleuchtungseinheit 10 kann diese z.B. mehrere Halbleiterlichtquellen unterschiedlicher Wellenlängenbereiche (beispielsweise getrennte LED mit den Farben rot, grün und blau) aufweisen. Die zeitsequentielle Beleuchtung mit den unterschiedlichen Farben wird insbesondere für eine direkte Wahrnehmung so schnell durchgeführt, daß sich für einen Betrachter die Farbkomponenten aufgrund der Trägheit des
- 15 Auges zu einer quasi weißen Beleuchtung mischen. Ein Vorteil der Verwendung bekannter Farbkanäle ist z.B., daß die Farbtemperatur genau abgestimmt werden kann.

Wenn die Wellenlängenbänder für die einzelnen farbigen Lichtquellen (farbigen LED- oder farbigen Laser) in sich spektral nicht zu breit sind, kann die Fokusablage der jeweiligen

20 Farbteilbilder (verursacht durch den Farblängsfehler der Abbildungsoptik 2) dadurch ausgeglichen werden, daß die Farbteilbilder zeitlich versetzt zueinander aufgenommen werden.

Mit einer zeitlichen Verschiebung zwischen den Aufnahmezeitpunkten der verschiedenen farbigen Teilbilder korrespondiert eine entsprechende Verschiebung der Fokuslage

25 entsprechend der Scanbewegung der optischen Komponente 7. Es ist daher möglich, die zeitliche Verschiebung zwischen den Belichtungszeitpunkten der verschiedenen farbigen Lichtquellen so einzustellen, daß sie von ein und derselben Objektstruktur (in z-Richtung gesehen) auf dem Bildaufnahmesensor 5 jeweils ein scharfes Farbteilbild ergibt. Unter ein und derselben Objektstruktur in z-Richtung gesehen wird insbesondere eine Objektstruktur

30 verstanden, die innerhalb einer Rayleigh-Einheit liegt.

Dadurch ist es möglich, Farblängsfehler der Abbildungsoptiken 2 zu verringern oder zu kompensieren. Insbesondere kann eine chromatisch unkorrigierte Abbildungsoptik 2

35 vorgesehen werden, deren Herstellungsaufwand stark vereinfacht ist und die trotzdem für polychromatische Abbildungszwecke eingesetzt werden kann.

Ein weiterer Vorteil der beschriebenen teilsequentiellen Belichtung mit unterschiedlichen Farben besteht darin, daß, wenn nur ein Bildaufnahmesensor 5 vorgesehen ist, keine Farbmaske mehr

erforderlich ist und dadurch mit dem Bildaufnahmesensor 5 eine bessere Ortsauflösung erzielt werden kann. Es kann dann nämlich für jedes Farbteilbild die gesamte Pixelanzahl für die Bildaufnahme verwendet werden.

- 5 Wie bereits erwähnt wurde, kann mit dem erfindungsgemäßen Abbildungssystem eine verbesserte Schärfentiefe dem Benutzer dargeboten werden, was bei stereoskopischen Abbildungen und/oder, wenn eine stereoskopische Beobachtung möglich ist, von Vorteil ist.

10 In Figuren 3 bis 6 ist der optische Aufbau der Abbildungsoptik 2 für den Fall der Ausbildung des erfindungsgemäßen Abbildungssystems 1 als Stereomikroskop gezeigt. Die optische Komponente 7 ist Teil einer optischen Grundanordnung der Abbildungsoptik 2, die ein Hauptobjektiv 20 (feste Brennweite oder Varioskop), eine Zwischenabbildungsoptik 21, ein Umschaltelement 22 (z.B. DMD) und einer Kameraadapteroptik 23 aufweist. Das Hauptobjektiv 20 bildet eine in der objektseitigen Brennebene des Hauptobjektivs 20 stehende Objektebene 4
15 nach Unendlich ab.

Im Bereich 24 hinter dem Hauptobjektiv 20, im kollimierten Strahlengang („Blendenebene“), befindet sich eine (nicht gezeigte) Aufteilverrichtung zur Definition der Teilpupillen, also der zwei oder mehr als zwei Teilpupillen, aus denen sich für einen Haupt- und ggf. ein oder mehrere
20 Nebenbeobachter die geeignete Stereobasis ableitet. Diese Aufteilverrichtung umfaßt ganz allgemein gesprochen ein beliebiges, die Lichttransmission beeinflussendes Element, das aus der gesamten Pupille des Hauptobjektivs 20 die zwei oder mehr Teilpupillen ausschneidet. Im einfachsten Fall umfaßt die Aufteilverrichtung ein Paar oder mehrere Paare von Lochblenden im jeweils festen Abstand zur Achse des Hauptobjektiv 20. Die Aufteilverrichtung kann dann um
25 die Objektivachse drehbar ausgebildet sein kann, um die Stereobasis entsprechend drehen zu können. Es ist aber auch möglich, daß die Aufteilverrichtung mehrere Blendenelemente, beispielsweise zwei gegeneinander verdrehbare Blendenträger, umfaßt, so daß sich zwei gegeneinander verdrehbare Stereoperspektiven bewirken lassen.

30 Alternativ zu den Lochblenden kann die Aufteilverrichtung zur Formung der Teilpupillen auch beliebige, die Lichttransmission ortsabhängig schaltende Elemente, wie z.B. LC-Shutter umfassen.

Hinter der Blendenebene befindet sich die Relay-Optik 21, die von den zur Abbildung benutzten
35 Lichtbündeln doppelt durchlaufen wird: Im ersten Durchtritt werden die in der Blendenebene geformten Lichtbündel auf das Umschaltelement 22 (im konkreten Fall eine Kippspiegelmatrix bzw. DMD) abgebildet.

Das am Umschaltelement 22 reflektierte Licht durchläuft dann die Relay-Optik 21 auf einem anderen Pfad (bevorzugt: einem symmetrisch zur Achse des Hauptobjektives 20 verlaufenden Lichtpfad) zurück in die Blendenebene und wird dort von einem ortsfesten Umlenkelement 25 (hier: einem Planspiegel) um einen festen Winkel (hier: 90°) abgelenkt.

5

Hinter dem ortsfesten Umlenkelement 25, aber noch in der Nähe desselben, befindet sich die optische Komponente 7 mit variabler Brechkraft.

Die Kameraadapteroptik 23 bildet die Strahlbündel anschließend auf den Bildaufnahmesensor 5 ab. Im hier beschriebenen Beispiel handelt es sich um einen Sensor mit einer Bayer-Maske zur Farbselektion. Selbstverständlich könnte es sich genauso gut aber um eine Kamera mit drei Bildsensoren und Farbteilerprismen o.ä. handeln.

Die Abbildungsoptik 2 weist hier folgende Spezifikationsdaten auf:

15	Objektfeldgröße	= 27mm x 48mm
	Durchmesser der Teilpupillen	= 7 mm
	Abstand der Teilpupillenmittelpunkte	= 20 mm
	Fläche auf der Kippspiegelmatrix 26	= 1.76mm x 1.00mm
	Abmessungen Kamera-Sensor 5	= 14.4mm x 8.1mm (2/3"-Sensor)
20	Einfallswinkel der Hauptstrahlen = Kippwinkel der Mikrospiegel der Kippspiegelmatrix	= 12°
	Wellenlängenbereich	= 400-700 nm (sichtbarer Spektralbereich)
	Brennweite Hauptobjektiv 20	= 336.88 mm
	Brennweite Zwischenabbildungsoptik 24	= 24.569 mm
	Brennweite Kameraadapteroptik 23	= 100.03 mm

25

Nachfolgend sind die konstruktiven Daten der drei optischen Teilsysteme 20, 21 und 23 der erfindungsgemäßen Abbildungsoptik 2 angegeben (alle Angaben in Millimeter). Aus Gründen der Klarheit sind die doppelt durchlaufenen Flächen auch doppelt aufgeführt, wobei zur Vereinfachung der Darstellung in Figuren 3-6 nicht für alle Flächen die entsprechenden Bezugszeichen angegeben und Blenden nicht eingezeichnet sind.

Die Darstellung folgt den Konventionen, insbesondere den Vorzeichenkonventionen, des optischen Designprogramms CodeV, das von der Fa. Optical Research Associates, Pasadena, Kalifornien, USA, vertrieben wird. Das heißt insbesondere:

35

- Ein positiver / negativer Radius bedeutet, daß der Krümmungsmittelpunkt rechts / links vom Flächenscheitel liegt.
- Flächendenzentrierungen sind durch die drei Verschiebungen XDE, YDE und ZDE in den drei Richtungen x, y und z relativ zum Scheitelkoordinatensystem der zentrierten Fläche angegeben.
- Flächenkippungen sind durch drei Drehwinkel ADE, BDE und CDE um die lokale x-, y- und z-Achse im Scheitelkoordinatensystem angegeben, wobei die Drehungen allgemein in der angegebenen Reihenfolge auszuführen sind.
- Asphärische Flächen sind durch die Entwicklungskoeffizienten A, B, C und D, sowie die Kegelschnittkonstante k gemäß folgender Flächengleichung beschrieben:

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

- Freiformflächen sind durch folgende Flächengleichung definiert

$$z = \frac{(x^2 + y^2)/R}{1 + \sqrt{1 - (1+k) \cdot \frac{(x^2 + y^2)}{R^2}}} + \sum_{i,j} C_{ij} \cdot x^i y^j$$

Die optischen Daten sind auf 3 (Dicken, Abbezahlen), 5 (Radien) bzw. 6 Nachkommastellen (Brechzahlen, asphärische Konstanten) gerundet angegeben. Dadurch soll der Tatsache Rechnung getragen werden, daß beispielsweise weitere Nachkommastellen der Dicke als zufällig und unwesentlich anzusehen wären, während z.B. die Asphärenkoeffizienten genauer angegeben werden müssen, damit das Beispiel in einem Optikprogramm nachvollziehbar ist.

Die im Beispiel angegebenen Glasarten sind jeweils als Repräsentanten für einen weiten Äquivalenzbereich in Frage kommender Glasarten anzusehen.

Die Koeffizienten der Freiformelemente 13, 14 umfassen nur die niedrigsten Ordnungen, die zur Erzeugung einer Refokussierung benötigt werden. Dadurch soll vermieden werden, daß die eingesetzte brechkraftvariable optische Komponente 7 spezifische individuelle Abbildungsfehler des (hier nur beispielhaft benutzten) Hauptobjektivs 20 kompensiert und somit auf die Verwendung mit diesem speziellen Hauptobjektiv 20 festgelegt wird. Die Werte für die Koeffizienten selbst sind jedoch aus einer Optimierungsrechnung bestimmt worden und weichen daher minimal von der nach der Lehre der US 3,305,294 zu erwartenden Relation ab

(z.B. ist der Koeffizient von C(2,1) näherungsweise, aber nicht ganz exakt dreimal so groß wie C(0,3)).

	Flächen-Nr.	Radius	Dicke	Glasart
5	Objektebene	∞	variabel	
	F2	∞	2.000	NBK7
	F3	∞	4.400	
	F4	-61.748	4.200	NSF6
10	F5	-40.098000	2.600	NSSK8
	F6	∞	22.500	
	F7	-158.49000	3.600	NSF6
	F8	370.47000	7.000	NSK2_SCHOTT
	F9	82.93700	0.100	
15	F10	258.52000	5.000	NSK5_SCHOTT
	F11	-145.38000	3.000	
	F12		19.000	
	F13	∞	0.000	
	XDE: 0.000 YDE: 10.000 ZDE: 0.000			
20	Blende	∞	0.000	
	F15	∞	0.000	
	XDE: 0.000 YDE: -10.000 ZDE: 0.000			
	F16	∞	0.000	
	F17	∞	10.000	
25	F18	69.32807	4.800	SFPL53
	F19	-45.75941	0.100	
	Asphäre: K: 0.00000 A: 0.728465E-05 B: -.732705E-08 C: 0.274418E-10 D: -.624797E-13			
	F20	16.81987	9.500	SFPL53
	F21	-71.15723	9.000	SF1
30	F22	12.89428	8.160	
	F23	29.22417	8.500	SNPH2
	F24	-40.84553	0.100	
	F25	17.81600	9.500	SNPH2
	F26	11.36370	2.000	
35	F27	∞	0.000	
	Kippspiegel 22	∞		
	F29	∞	-2.000	
	F30	11.36370	-9.500	SNPH2

	F31	17.81600		-0.100	
	F32	-40.84553		-8.500	SNPH2
	F33	29.22417		-8.160	
	F34	12.89428		-9.000	SF1
5	F35	-71.15723		-9.500	SFPL53
	F36	16.81987		-0.100	
	F37	-45.75941		-4.800	SFPL53
	Asphäre: K: 0.00000 A: 0.728465E-05 B: -.732705E-08 C: 0.274418E-10 D: -.624797E-13				
	F38	69.32807		-10.000	
10	F39	∞		17.533614	REFL (Umlenkelement 25)
	ADE:	45.000	BDE: 0.000	CDE: 0.000	
	F40	47.93658		3.2000	NFK5
	F41	-1129.18109	1.0000		
	F42	∞		2.000	NFK5
15	F43	∞		0.140	
	Freiformfläche 18: C(2,1) = 0.0009804 C(0,3) = 0.0003041				
	F44	∞		2.000	NFK5
	Freiformfläche 16: C(2,1) = 0.0009804 C(0,3) = 0.0003041				
	F45	∞		21.000	
20	F46	27.46389		4.800	SFPL51
	F47	-42.51268		10.500	NKZFS4
	F48	20.49002		39.000	
	F49	∞		3.2000	NLASF43
	F50	-56.20738		20.300	
25	F51	∞		1.0000	NBK7
	F52	∞		0.5000	
	Bildebene	∞		0.000	

30 Brechzahlen der verwendeten Glasarten

		Brechzahl bei Wellenlänge (nm):			
Glasart	Hersteller	656.00	546.00	486.00	
	NBK7	SCHOTT	1.514331	1.518726	1.522386
35	NSF6	SCHOTT	1.796109	1.812674	1.827871
	NSSK8	SCHOTT	1.614023	1.620682	1.626423
	NSK2	SCHOTT	1.604146	1.609942	1.614870
	NSK5	SCHOTT	1.586203	1.591429	1.595820

	SNPH2	OHARA	1.909203	1.934313	1.958060
	SFPL53	OHARA	1.437338	1.439856	1.441960
	SF1	SCHOTT	1.710337	1.723116	1.734651
	SFPL51	OHARA	1.495143	1.498457	1.501238
5	NKZFS4	SCHOTT	1.609231	1.616645	1.623019
	NLASF43	SCHOTT	1.800221	1.810822	1.820076
	NFK5	SCHOTT	1.485353	1.489147	1.492278

10 Der Verfahrenweg der refraktiven Elemente 13 und 14 beträgt hier $\pm 50 \mu\text{m}$ bei einer Frequenz von ca. 60 Hz. Der genutzte Bereich zur Abbildung weist einen Durchmesser von ca. 10 mm auf.

Bei einer weiteren Ausführungsform gemäß Figuren 7 bis 10 ist kein Umschaltelement (z.B. 15 DMD) gemäß der Ausführungsform von Figuren 3 bis 6 nötig. Dafür werden zur stereoskopischen Bildaufnahme entweder ein Strahlteiler oder zwei Kameras benötigt.

Der Aufbau der Abbildungsoptik 2 umfaßt wieder eine gemeinsames Hauptobjektiv 20 (festbrennweitig oder als Varioskop), das die in der vorderen Brennebene des Hauptobjektivs 20 liegende Applikationsebene 4 und somit das Objekt 4 im wesentlichen nach Unendlich abbildet, eine dahinter befindlichen Blendenebene, sowie dahinter angeordneten Optiken, die die Lichtbündel jeweils einer Teilpupille auf je einen Kamerasensor abbilden.

Anders als in der Ausführungsform gemäß Figuren 3 bis 6 verzweigt der Strahlengang hierbei 25 also hinter der Blendenebene in je einen eigenen Abbildungspfad pro Teilpupille.

Die hier links vom Hauptobjektiv 20 gezeigte Kameraadapteroptik 23 und die Kamera bzw. der 30 Bildaufnahmesensor 5 selbst müssen also doppelt vorhanden sein, für jede Teilpupille eine. Dadurch ist kein Umschaltelement nötig und der Lichtleitwert der Anordnung kann entsprechend höher sein. Andererseits ist der Aufwand durch die Notwendigkeit der zwei Kameras erhöht und die Möglichkeit zu Anpassungen an der Stereobasis sind eingeschränkt.

Zur Verdeutlichung zeigt Figur 7 den Aufbau mit dem Strahlengang durch eine erste Teilpupille und Figur 8 den Strahlengang durch eine zweite Teilpupille.

35

Die optische Komponente 7 mit variabler Brechkraft, die auch als Nachfokussierelement bezeichnet werden kann, befindet sich hier ebenfalls in der Nähe der Blendenebene, wie in Figur 9 zu sehen ist, die einen vergrößerten Ausschnitt von Figur 7 zeigt.

Figur 10 zeigt den gleichen Ausschnitt wie Figur 7 in einer Einstellung, bei der die Schärfeebene in Luft um 20mm in Richtung des Hauptobjektivs 20 verlagert wurde. Die beiden Freiformelemente 13, 14 sind dabei lateral um 0.05mm gegeneinander verschoben.
 5 Entsprechend gibt es spiegelbildlich eine (nicht gezeigte) Stellung, bei der die Schärfeebene um den selben Betrag vom Hauptobjektiv weg verlagert ist, sowie entsprechende Zwischenstellungen.

Nachfolgend sind die optischen Daten der Ausführungsform gemäß Figuren 7 bis 10
 10 angegeben, wobei den gleichen Definitionen und Konventionen gefolgt wird wie oben. Auch sind wiederum nicht alle Flächen in Figuren 7 bis 10 mit den entsprechenden Bezugszeichen versehen und Blenden sind nicht eingezeichnet.

Die optischen Daten sind auf 3 (Dicken, Abbezahlen), 5 (Radien) bzw. 6 Nachkommastellen
 15 (Brechzahlen, Asphärische Konstanten) gerundet angegeben.

	Flächen-Nr.	Radius		Dicke	Glasart
20	Objektebene	∞		variabel	
	F1	∞		6.500	NSSK8
	F2	-79.945		3.500	NSF10
	F3	-154.877		10.000	
	F4	∞		48.500	
25	XDE:	0.000	YDE: 11.000	ZDE: 0.000	
	F5	∞		3.000	
	F6	∞		18.000	NBK7
	F7	∞		1.000	
	Blende	∞		0.000	
30	F9	∞		0.000	
	XDE:	0.000	YDE: 0.050	ZDE: 0.000	
	F10	∞		1.500	NLASF44
	F11	∞		0.000	
	Freiformfläche 18: $C(2,1) = 1.3425E-03$ $C(1,3) = 4.5295E-04$				
35	F12	∞		0.000	
	XDE:	0.000	YDE: -0.050	ZDE: 0.000	
	F13	∞		0.1400	
	F14	∞		0.000000	

	XDE:	0.000	YDE: -0.050	ZDE: 0.000
	F15	∞		1.500 NLASF44
	Freiformfläche 16: C(2,1) = 1.3425E-03 C(1,3) = 4.5295E-04			
	F16	∞		0.000
5	F17	∞		0.000
	XDE:	0.000	YDE: 0.050	ZDE: 0.000
	F18	∞		30.000
	F19	52.330		3.0000 SFPL51
	F20	-39.811		1.6000 NKZFS4
10	F21	260.390		0.100
	F22	25.483		2.500 SFPL51
	F23	84.140		39.097
	F24	-11.631		3.600 NSF6
	F25	-11.631		1.600 SFPL51
15	F26	∞		20.000
	F27	∞		3.5000 NBK7
	F28	∞		8.000
	F29	∞		0.000
	Bildebene	∞		0.000
20				

Brechzahlen der verwendeten Glasarten:

			Brechzahl bei Wellenlänge(nm)		
25	Glasart	Hersteller	656.00	546.00	486.00
	NBK7	SCHOTT	1.514331	1.518726	1.522386
	NSSK8	SCHOTT	1.614023	1.620682	1.626423
	NSF10	SCHOTT	1.720931	1.734311	1.746464
	NLASF44	SCHOTT	1.799026	1.808324	1.816324
30	SFPL51	OHARA	1.495143	1.498457	1.501238
	NKZFS4	SCHOTT	1.609231	1.616645	1.623019
	NSF6	SCHOTT	1.796109	1.812674	1.827871

Patentansprüche

1. Abbildungssystem mit
5 einer Abbildungsoptik (2) zum Abbilden eines Objektes (4) in eine Bildebene,
wobei die Abbildungsoptik (2) für eine höhere Schärfentiefe eine optische Komponente (7)
enthält, deren Brechkraft änderbar ist und deren optische Wirkung dabei rotationssymmetrisch
bleibt.
- 10 2. Abbildungssystem nach Anspruch 1, mit
einer Bildaufnahmeeinheit (5), die die Abbildungen des Objektes (4) mit unterschiedlichen
Brechkraftwerten der optischen Komponente (7) in der Bildebene aufnimmt und an eine
Bildverarbeitungseinheit (11) weiterleitet, die anhand der Aufnahmen ein Gesamtbild des
Objektes mit höherer Schärfentiefe im Vergleich zu einer der Aufnahmen erzeugt.
- 15 3. Abbildungssystem nach Anspruch 1 oder 2, bei dem die Brechkraft der optischen
Komponente (7) kontinuierlich änderbar ist.
- 20 4. Abbildungssystem nach einem der obigen Ansprüche, bei dem die optische Komponente
(7) zwei refraktive Elemente (13, 14), die jeweils zumindest eine Freiformfläche (16, 18)
aufweisen, umfaßt,
wobei die beiden Elemente (13, 14) relativ zueinander quer zur optischen Achse der
Abbildungsoptik (2) verschiebbar sind, um dadurch die gewünschte Brechkraftänderung zu
bewirken.
- 25 5. Abbildungssystem nach einem der obigen Ansprüche, bei dem die optische Komponente
(7) in einem Bereich der Abbildungsoptik (2) angeordnet ist, in dem sich die von
unterschiedlichen Feldpunkten ausgehenden Strahlbündel weitgehend überlappen.

6. Abbildungssystem nach einem der obigen Ansprüche, bei dem die optische Komponente (7) nah an der Aperturblende der Abbildungsoptik (2) oder nah an einem Bild der Aperturblende der Abbildungsoptik (2) positioniert ist.
- 5 7. Abbildungssystem nach einem der obigen Ansprüche, bei dem die Abbildungsoptik (2) im Strahlengang einen kollimierten Abschnitt aufweist und die optische Komponente im kollimierten Abschnitt angeordnet ist.
8. Abbildungssystem nach einem der obigen Ansprüche, mit einer Beleuchtungseinheit (10),
10 die das Objekt (4) beleuchtet, wobei bevorzugt eine gepulste Beleuchtung bewirkt ist.
9. Abbildungssystem nach Anspruch 8, bei dem die Beleuchtungseinheit (11) das Objekt (4) in verschiedenen Farben zeitsequentiell beleuchtet.
- 15 10. Abbildungssystem nach Anspruch 9, bei dem die zeitsequentielle Beleuchtung der Beleuchtungseinheit (10) so gewählt ist, daß unter Berücksichtigung eines Farblängsfehler der Abbildungsoptik (2) das Objekt (4) in derselben Tiefe mit den verschiedenen Farben aufnehmbar ist.
- 20 11. Abbildungssystem nach einem der obigen Ansprüche, bei dem zwei aufeinanderfolgende Aufnahmen so erfolgen, daß aufgrund der unterschiedlichen optischen Brechkraftwerte der optischen Komponente (7) beide Aufnahmen innerhalb von zwei Rayleigh-Einheiten, bevorzugt innerhalb einer Rayleigh-Einheit liegen.
- 25 12. Abbildungssystem nach einem der obigen Ansprüche, bei dem das Abbildungssystem als Stereoabbildungssystem ausgebildet ist.
13. Abbildungssystem nach Anspruch 12, bei dem die optische Komponente (7) im für beide Stereokanäle gemeinsamen Strahlengang angeordnet ist.
- 30 14. Abbildungsverfahren, bei dem mit einer Abbildungsoptik ein Objekt in eine Bildebene abgebildet wird, wobei die Abbildungsoptik für eine höhere Schärfentiefe eine optische Komponente enthält, deren Brechkraft geändert wird und deren optische Wirkung dabei rotationssymmetrisch bleibt.
- 35 15. Abbildungsverfahren nach Anspruch 14, bei dem die Abbildungen des Objektes mit unterschiedlichen Brechkraftwerten der optischen Komponente aufgenommen werden und

anhand der Aufnahmen ein Gesamtbild des Objektes mit höherer Schärfentiefe im Vergleich zu einer der Aufnahmen erzeugt wird.

5 16. Abbildungsverfahren nach Anspruch 14 oder 15, bei dem die Brechkraft der optischen Komponente kontinuierlich geändert wird.

17. Abbildungsverfahren nach einem der Ansprüche 14 bis 16, bei dem die optische Komponente zwei refraktive Elemente, die jeweils zumindest eine Freiformfläche aufweisen, umfaßt,
10 wobei die beiden Elemente relativ zueinander quer zur optischen Achse der Abbildungsoptik verschoben werden, um dadurch die gewünschte Brechkraftänderung zu bewirken.

18. Abbildungsverfahren nach einem der Ansprüche 14 bis 17, bei dem die optische Komponente in einem Bereich der Abbildungsoptik angeordnet ist, in dem sich die von
15 unterschiedlichen Feldpunkten ausgehenden Strahlbündel weitgehend überlappen.

19. Abbildungsverfahren nach einem der Ansprüche 14 bis 18, bei dem die optische Komponente nah an der Aperturblende der Abbildungsoptik oder nah an einem Bild der Aperturblende der Abbildungsoptik positioniert ist.
20

20. Abbildungsverfahren nach einem der Ansprüche 14 bis 19, bei dem die optische Komponente in einem kollimierten Abschnitt des Strahlenganges der Abbildungsoptik angeordnet ist.

25 21. Abbildungsverfahren nach einem der Ansprüche 14 bis 20, bei dem das Objekt gepulst beleuchtet wird.

22. Abbildungsverfahren nach Anspruch 21, bei dem das Objekt in verschiedenen Farben zeitsequentiell beleuchtet wird.
30

23. Abbildungsverfahren nach Anspruch 22, bei die zeitsequentielle Beleuchtung so gewählt ist, daß unter Berücksichtigung eines Farblängsfehlers der Abbildungsoptik das Objekt in derselben Tiefe mit den verschiedenen Farben aufgenommen wird.

35 24. Abbildungsverfahren nach einem der Ansprüche 14 bis 23, bei dem zwei aufeinanderfolgende Aufnahmen so durchgeführt werden, daß aufgrund der unterschiedlichen optischen Brechkraftwerte der optischen Komponente beide Aufnahmen innerhalb von zwei Rayleigh-Einheiten, bevorzugt innerhalb einer Rayleigh-Einheit liegen.

25. Abbildungsverfahren nach einem der Ansprüche 14 bis 24, bei dem das Abbildungsverfahren ein Stereoabbildungsverfahren ist.
- 5 26. Abbildungsverfahren nach Anspruch 25, bei dem die optische Komponente im für beide Stereokanäle gemeinsamen Strahlengang angeordnet ist.

Fig. 1

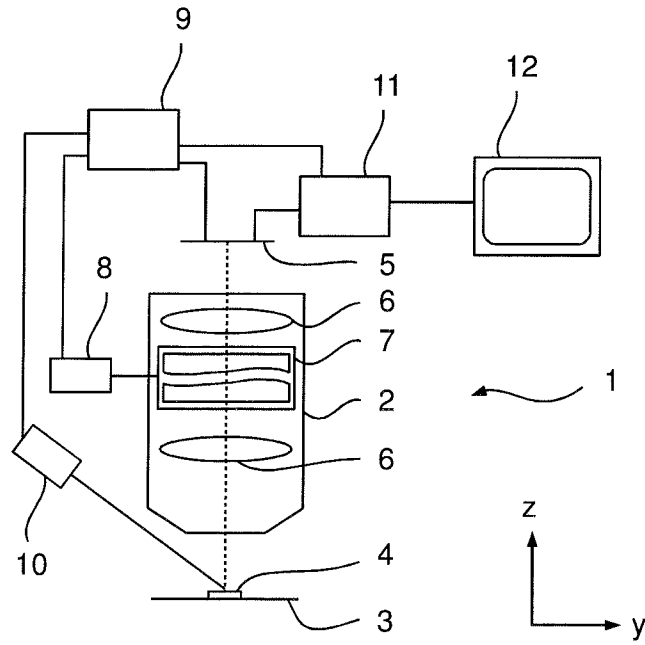
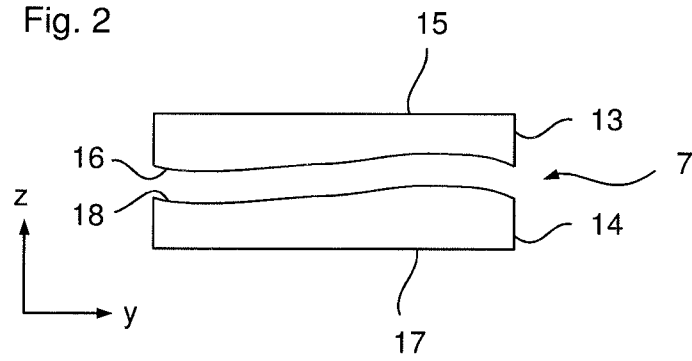


Fig. 2



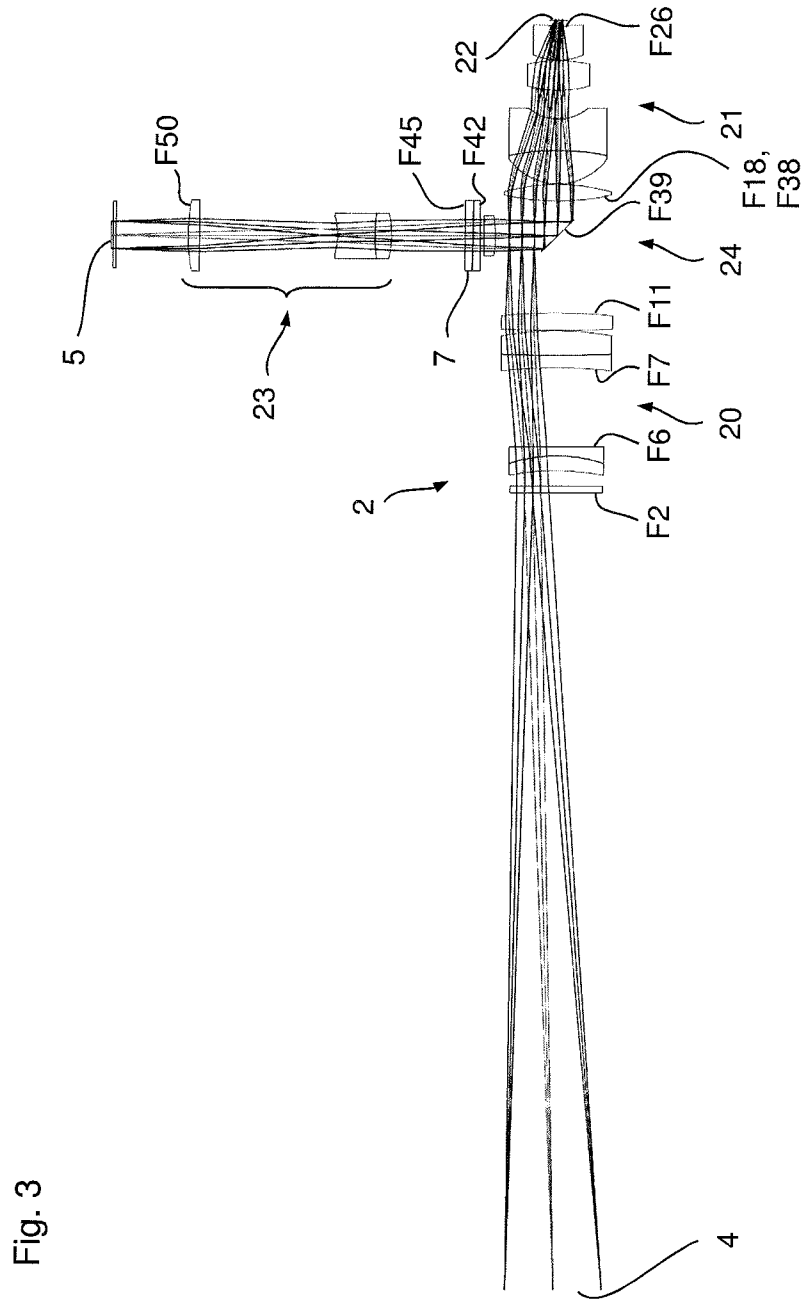


Fig. 3

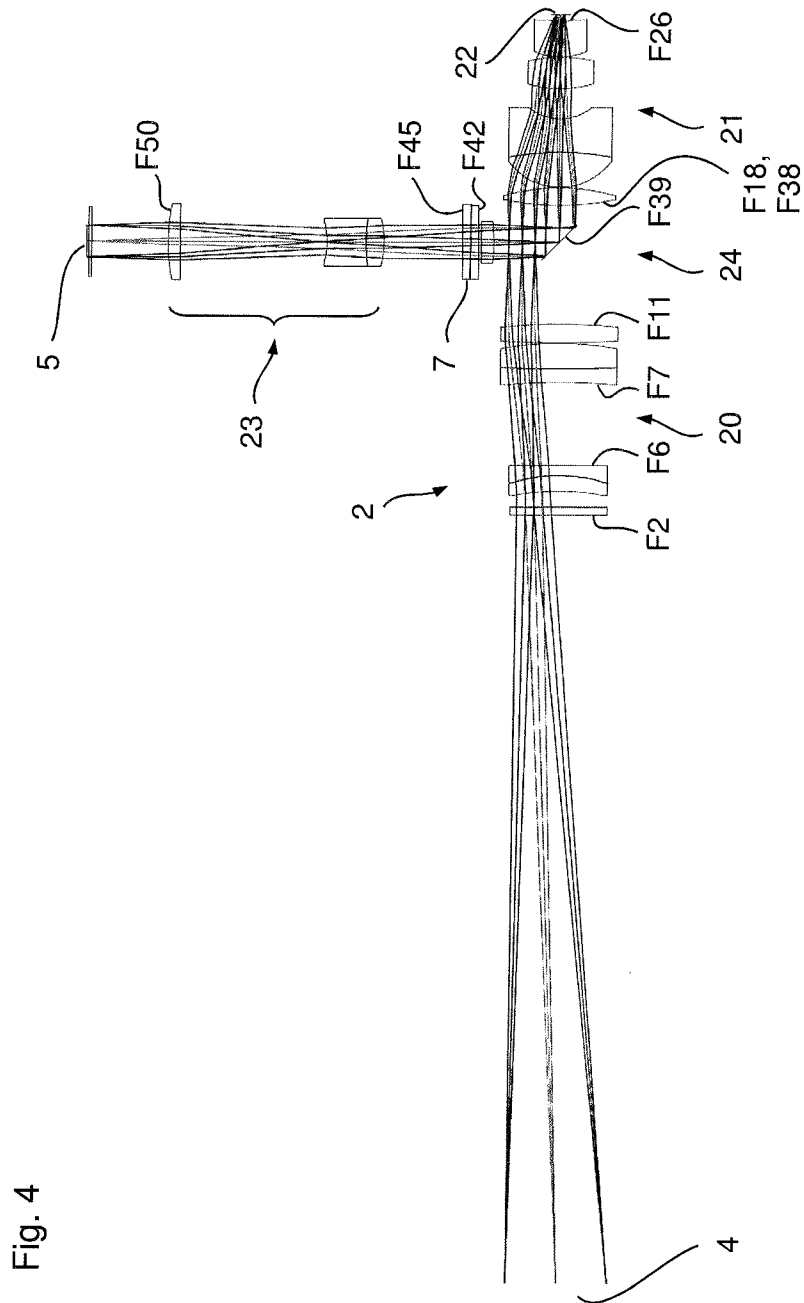


Fig. 4

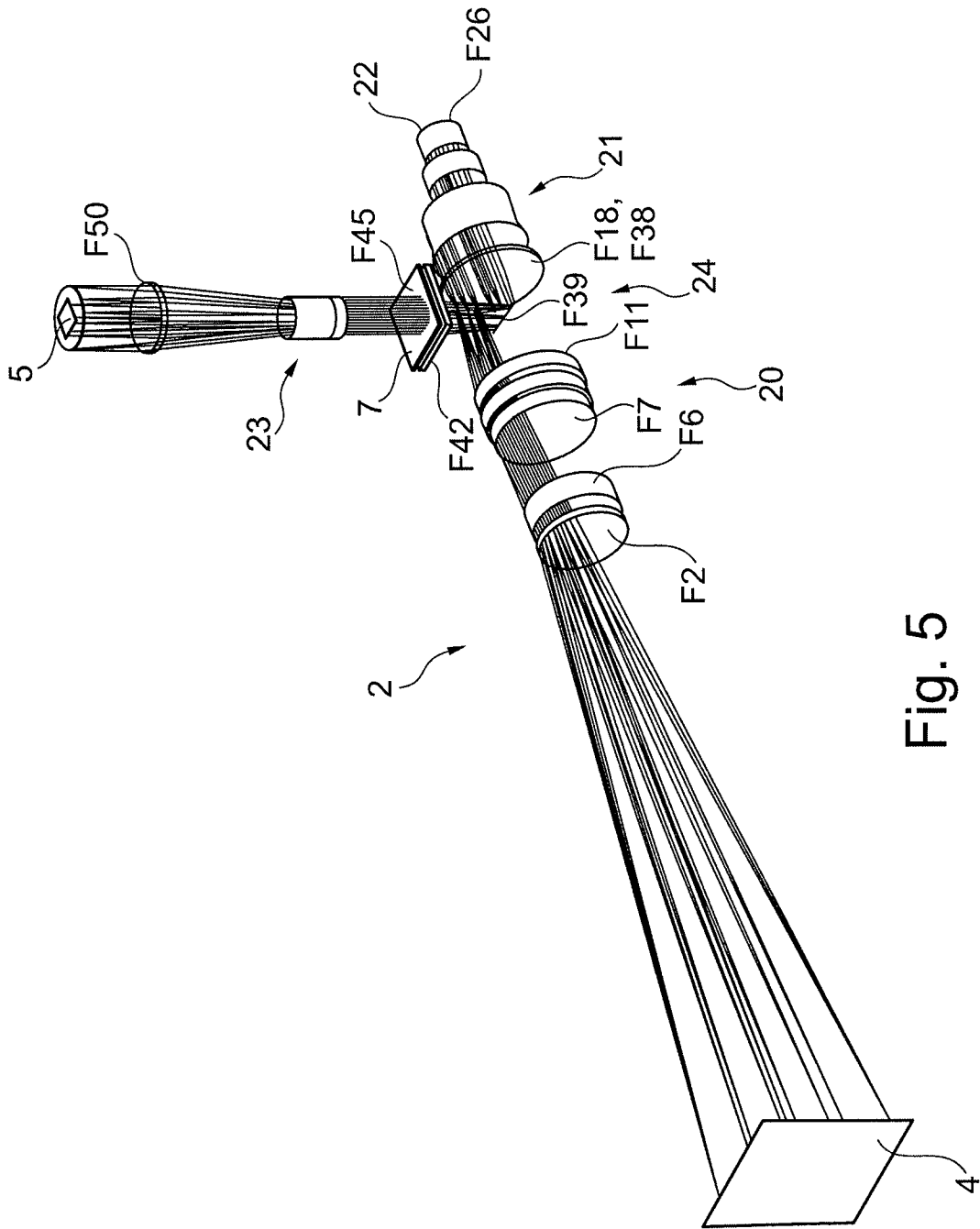


Fig. 5

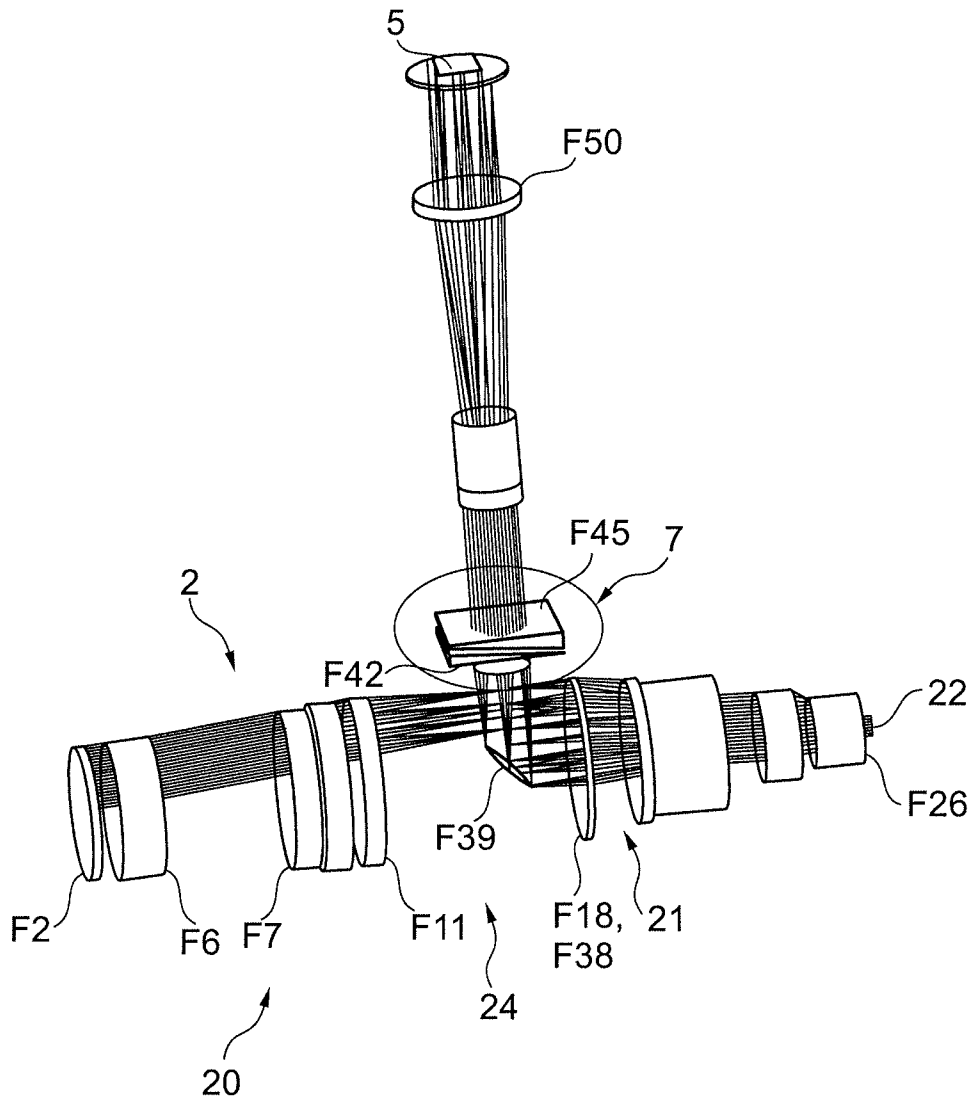


Fig. 6

