

(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
29. November 2012 (29.11.2012)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2012/159752 A2

- (51) Internationale Patentklassifikation:
A61B 3/13 (2006.01)
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2012/002204
- (22) Internationales Anmeldedatum:
23. Mai 2012 (23.05.2012)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität:
10 2011 102 256.6 23. Mai 2011 (23.05.2011) DE
- (71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **CARL ZEISS MEDITEC AG** [DE/DE];
Göschwitzer Strasse 51-52, 07745 Jena (DE).
- (72) Erfinder; und
- (75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **HAUGER, Christoph** [DE/DE]; Bertha-von-Suttner-Weg 46, 73431 Aalen (DE).
HÖGELE, Artur [DE/DE]; Meisengasse 6, 73447 Oberkochen (DE).
- (74) Anwalt: **DIEHL & PARTNER GBR**; Patent- und Rechtsanwälte, Augustenstrasse 46, 80333 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.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: MICROSCOPY SYSTEM FOR EYE EXAMINATION AND METHOD FOR OPERATING A MICROSCOPY SYSTEM

(54) Bezeichnung: MIKROSKOPIESYSTEM ZUR AUGENUNTERSUCHUNG UND VERFAHREN ZUM BETREIBEN EINES MIKROSKOPIESYSTEMS

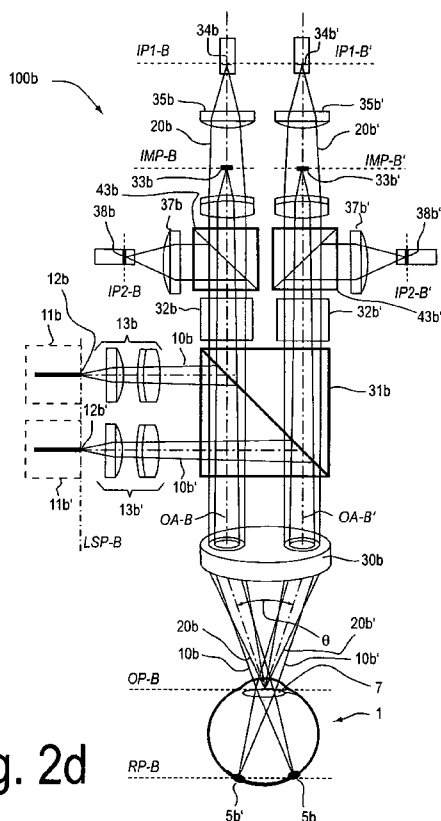


Fig. 2d

(57) Abstract: The invention relates to a microscopy system for eye examination, comprising an illumination optics that is designed to generate a first illuminating beam path of the illumination optics in order to direct a first part of the illuminating light onto the object plane and to generate a second illuminating beam path of the illumination optics in order to direct a second part of the illuminating light onto the object plane. The illumination optics is also designed such that, for the first and the second illuminating beam path, the following applies respectively: $D \cdot \sin(\alpha) < M$; wherein D is a diameter of a minimum cross-section of the respective illuminating beam path; and α is an aperture angle of the respective illuminating beam path on a position of the minimum cross-section; wherein for the first and/or the second illuminating beam path M has a value of 0.9 millimetres, or has a value of 0.5 millimetres, or has a value of 0.1 millimetres, or has a value of 20 micrometres, or has a value of 10 micrometres, or has a value of 5 micrometres, or has a value of 1 micrometre.

(57) Zusammenfassung: Mikroskopiesystem zur Augenuntersuchung, aufweisend: eine Beleuchtungsoptik,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2012/159752 A2



(84) **Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, 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).

Erklärungen gemäß Regel 4.17:

— *Erfindererklärung (Regel 4.17 Ziffer iv)*

Veröffentlicht:

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

die ausgebildet ist, einen ersten Beleuchtungsstrahlengang der Beleuchtungsoptik zu erzeugen, um einen ersten Teil des Beleuchtungslichts auf die Objektebene zu lenken, und einen zweiten Beleuchtungsstrahlengang der Beleuchtungsoptik zu erzeugen, um einen zweiten Teil des Beleuchtungslichts auf die Objektebene zu lenken; wobei die Beleuchtungsoptik ferner ausgebildet ist, dass für den ersten und den zweiten Beleuchtungsstrahlengang jeweils gilt: $D \cdot \sin(\alpha) < M$; wobei D ein Durchmesser eines minimalen Querschnitts des jeweiligen Beleuchtungsstrahlengangs ist; und α ein Öffnungswinkel des jeweiligen Beleuchtungsstrahlengangs an einer Position des minimalen Querschnitts ist; wobei für den ersten und/oder den zweiten Beleuchtungsstrahlengang M einen Wert von 0,9 Millimeter aufweist, oder einen Wert von 0,5 Millimeter aufweist, oder einen Wert von 0,1 Millimeter aufweist, oder einen Wert von 20 Mikrometer aufweist, oder einen Wert von 10 Mikrometer aufweist, oder einen Wert von 5 Mikrometer aufweist, oder einen Wert von 1 Mikrometer aufweist.

MIKROSKOPIESYSTEM ZUR AUGENUNTERSUCHUNG UND
VERFAHREN ZUM BETREIBEN EINES MIKROSKOPIESYSTEMS

5

Technisches Gebiet

Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf ein Mikroskopiesystem
zur Augenuntersuchung und auf ein Verfahren zum Betreiben eines
solchen Mikroskopiesystems. Insbesondere bezieht sich die
vorliegende Erfindung auf ein Mikroskopiesystem, durch das
Objekte im oder nahe dem vorderen Augenbereich aufgenommen
werden können.

15

Kurze Beschreibung des Standes der Technik

Bei Mikroskopen, die zur Augenuntersuchung oder zur
Augenchirurgie verwendet werden, wird häufig der sogenannte
Rotlichtreflex angewendet, um Objekte, die sich im vorderen
Augenbereich befinden, mit Durchlicht zu beleuchten. Der
Rotlichtreflex wird dadurch erzeugt, dass Beleuchtungslicht auf
das Auge gelenkt wird, das näherungsweise ebene Wellenfronten
aufweist. Durch die Hornhaut und durch die natürliche Linse des
Auges werden die ebenen Wellenfronten des Beleuchtungslichts zu
einem punktförmigen Beleuchtungsfleck auf der Retina fokussiert.
Das Beleuchtungslicht wird von diesem Punkt diffus gestreut,
sodass Licht, das von diesem Beleuchtungsfleck ausgeht,
näherungsweise sphärische Wellenfronten aufweist. Diese
näherungsweise sphärische Wellenfronten werden durch die
Augenlinse und die Hornhaut in Licht transformiert, das wiederum
als näherungsweise ebene Wellenfronten aufweist.

Bei einem Mikroskop kann die Beleuchtung so eingestellt werden,
dass Strahlenbündel des Beleuchtungsstrahlengangs koaxial oder
näherungsweise koaxial zu einer optischen Achse des
Beobachtungsstrahlengangs orientiert sind. Durch das von der
Retina reflektierte Licht des Beleuchtungsstrahlengangs werden
Objekte, die sich im Vorderbereich des Auges befinden,
rückseitig, d. h. im Durchlicht beleuchtet.

40

Beispielsweise können dadurch bei einer Kataraktoperation Gewebereste im Kapselsack abgebildet werden. Dabei sind jedoch Objekte, die nahezu transparent sind, schwer zu erkennen.

5

Es ist daher eine Aufgabe ein Mikroskopiesystem und ein Verfahren zum Betreiben eines Mikroskopiesystems bereitzustellen, das eine verbesserte Abbildung des Vorderbereiches des Auges erlaubt.

10

Diese Aufgabe wird durch den Gegenstand der unabhängigen Ansprüche gelöst. Weitere Ausführungsformen sind Gegenstand der Unteransprüche.

15 Ausführungsformen stellen ein Mikroskopiesystem zur Augenuntersuchung bereit, aufweisend: eine Abbildungsoptik zur Erzeugung eines ersten Bildes in einer ersten Bildebene der Abbildungsoptik von einem Bereich einer Objektebene der Abbildungsoptik durch einen ersten Beobachtungsstrahlengang der
20 Abbildungsoptik; und eines zweiten Bildes in einer zweiten Bildebene der Abbildungsoptik von dem Bereich durch einen zweiten Beobachtungsstrahlengang der Abbildungsoptik; wobei die Abbildungsoptik so ausgebildet ist, dass eine Achse des ersten Beobachtungsstrahlenganges und eine Achse des zweiten
25 Beobachtungsstrahlenganges in der Objektebene einen Stereowinkel bilden; wobei das Mikroskopiesystem ferner eine oder mehrere Lichtquellen zur Erzeugung von Beleuchtungslicht aufweist; und eine Beleuchtungsoptik, die ausgebildet ist, einen ersten Beleuchtungsstrahlengang der Beleuchtungsoptik zu erzeugen, um
30 einen ersten Teil des Beleuchtungslichts auf die Objektebene zu lenken, und einen zweiten Beleuchtungsstrahlengang der Beleuchtungsoptik zu erzeugen, um einen zweiten Teil des Beleuchtungslichts auf die Objektebene zu lenken; wobei die Beleuchtungsoptik ferner ausgebildet ist, dass für den ersten
35 und den zweiten Beleuchtungsstrahlengang jeweils gilt:

$$D \cdot \sin(\alpha) < M ;$$

wobei D ein Durchmesser eines minimalen Querschnitts des
40 jeweiligen Beleuchtungsstrahlengangs ist; und α ein

Öffnungswinkel des jeweiligen Beleuchtungsstrahlengangs an einer Position des minimalen Querschnitts ist; wobei für den ersten und/oder den zweiten Beleuchtungsstrahlengang M einen Wert von 0,9 Millimeter aufweist, oder einen Wert von 0,5 Millimeter aufweist, oder einen Wert von 0,1 Millimeter aufweist, oder einen Wert von 50 Mikrometer aufweist, oder einen Wert von 30 Mikrometer aufweist, oder einen Wert von 20 Mikrometer aufweist, oder einen Wert von 10 Mikrometer aufweist, oder einen Wert von 7 Mikrometer aufweist, oder einen Wert von 5 Mikrometer aufweist, oder einen Wert von 2 Mikrometer aufweist.

Dadurch ist es möglich, ein Mikroskopiesystem bereitzustellen, mit dem ein zu untersuchendes Auge so beleuchtbar ist, dass ein vergleichsweise kleiner Beleuchtungsfleck auf der Retina des zu untersuchenden Auges erzeugt wird. Beispielsweise kann ein Durchmesser des Beleuchtungsflecks auf der Retina geringer sein als 1 Millimeter, oder geringer sein als 0,1 Millimeter, oder geringer sein als 10 Mikrometer, oder geringer sein als 5 Mikrometer. Durch den Beleuchtungsfleck auf der Retina kann unter Ausnutzung des Rotlichtreflexes eine Durchlichtbeleuchtung von Objekten im Vorderbereich des zu untersuchenden Auges erhalten werden. Ferner wurde erkannt, dass durch den vergleichsweise kleinen Beleuchtungsfleck der Kontrast der stereoskopischen Bilder erhöht wird. Dadurch ist es möglich sehr schwach streuende Objekte oder nahezu transparente Objekte im Vorderbereich des Auges durch ein Stereomikroskop zu erkennen. Dadurch kann insbesondere eine Kataraktoperation mit sehr viel größerer Zuverlässigkeit durchgeführt werden, da Gewebereste im Kapselsack mit einer erhöhten Empfindlichkeit wahrgenommen werden können.

In der ersten und/oder zweiten Bildebene kann jeweils ein Bildsensor angeordnet sein. Abhängig von Sensordaten der Bildsensoren können beispielsweise durch eine Bildverarbeitungsvorrichtung digitale Bilder des Bereiches der Objektebene erzeugt werden. Zusätzlich oder alternativ kann die Abbildungsoptik ein oder zwei Okulare aufweisen, die ausgebildet sind, dass für einen Beobachter das Bild in der ersten und/oder zweiten Bildebene betrachtbar ist.

Das Mikroskopiesystem kann so ausgebildet sein, dass der Vorderbereich eines Auges in der Objektebene anordenbar ist. Der Vorderbereich des Auges kann die Hornhaut, die vordere Augenkammer, die Iris und die natürliche Linse umfassen.

5

Die Beleuchtungsoptik kann ausgebildet sein, dass der erste und/oder der zweite Beleuchtungsstrahlengang die jeweiligen Teile des Beleuchtungslichts als Auflicht auf die Objektebene lenken. Das Auflicht kann durch eine in der Objektebene angeordneten Pupille eines menschlichen Auges in das Augeninnere eintreten und auf der Retina einen Beleuchtungsfleck erzeugen.

Die Lichtquelle kann einen Laser aufweisen, eine Halogenlampe und/oder eine Xenonlampe. Ferner kann die Lichtquelle einen Lichtleiter aufweisen, durch den Licht vom Laser, von der Halogenlampe und/oder der Xenonlampe zu einer Austrittsfläche der Lichtquelle transportiert wird.

Die Lichtquelle kann eine Austrittsfläche aufweisen, an der Licht in den Beobachtungsstrahlengang eintritt. Die Beleuchtungsoptik kann als ein abbildendes System definiert werden. Daher kann die Austrittsfläche als die Grenze zwischen dem abbildenden System der Beleuchtungsoptik, welches das Beleuchtungslicht auf die Objektebene lenkt, und einem nichtabbildenden System sein, das stromaufwärts des Beleuchtungssystems angeordnet ist. In anderen Worten kann der erste und/oder zweite Beleuchtungsstrahlengang an der Austrittsfläche der Lichtquelle beginnen. Die Austrittsfläche kann eine Austrittsfläche eines Lasers sein. Die Austrittsfläche kann eine Fläche sein, aus der Licht aus einem Lichtleiter in Luft ausgekoppelt wird.

Das Mikroskopiesystem kann zwei Lichtquellen aufweisen. Die erste Lichtquelle kann den ersten Teil des Beleuchtungslichts erzeugen, der vom ersten Beleuchtungsstrahlengang auf die Oberfläche gelenkt wird. Die zweite Lichtquelle kann den zweiten Teil des Beleuchtungslichts erzeugen, der vom zweiten Beleuchtungsstrahlengang auf die Objektebene gelenkt wird. Es ist aber auch denkbar, dass die Lichtquelle eine erste und eine zweite Austrittsfläche aufweist, wobei der erste

Beleuchtungsstrahlengang das Beleuchtungslicht der ersten Austrittsfläche auf die Objektebene lenkt und der zweite Beleuchtungsstrahlengang das Beleuchtungslicht der zweiten Austrittsfläche auf die Objektebene lenkt. Die Lichtquelle kann eine gemeinsame Lichtquelle des ersten und des zweiten Beleuchtungsstrahlenganges sein. Die erste und die zweite Austrittsfläche können beispielsweise durch eine Doppelblende gebildet werden.

Der minimale Querschnitt kann eine minimale Fläche des Querschnitts des Beleuchtungsstrahlengangs sein. Der minimale Querschnitt kann die minimale Querschnittsfläche der Summe aller Strahlenbündel sein, die von der Austrittsfläche der Lichtquelle ausgehen und durch die Beleuchtungsoptik auf die Objektebene gelenkt werden. Daher kann der minimale Querschnitt ein minimaler Querschnitt einer Intensitätsverteilung auf einer Fläche senkrecht zur Achse des Beleuchtungsstrahlengangs sein.

Der minimale Querschnitt kann eine Fläche sein, die durch eine Umfangsfläche in einer Ebene des minimalen Querschnitts begrenzt ist, auf der die maximale auf die Querschnittsfläche eintreffende Intensität auf 20 % oder 10 % abgefallen ist. Die Position des minimalen Querschnitts kann zwischen der Austrittsfläche und der Objektebene liegen. Die Position des minimalen Querschnitts kann zwischen der Austrittsfläche und der Objektivlinse liegen. Der minimale Querschnitt kann ein Fokuspunkt des Beleuchtungsstrahlengangs sein. Der minimale Querschnitt kann die Austrittsfläche der Lichtquelle oder eine Ebene sein, die optisch konjugiert zur Austrittsfläche der Lichtquelle ist. Der minimale Querschnitt kann eine Strahltaile eines Laserstrahls sein oder ein Querschnitt des Laserstrahls sein beim Verlassen des Lasers. Der minimale Querschnitt kann senkrecht zu einer Achse des Beleuchtungsstrahlengangs gemessen werden. Der Durchmesser des minimalen Querschnitts kann ein Durchmesser einer Leuchtfeldblende der Beleuchtungsoptik sein. Die Beleuchtungsoptik kann so ausgebildet sein, dass die Leuchtfeldblende auf die Retina eines zu untersuchendes rechtsichtigen Auges in abgebildet wird. Ist kein Auge in der Objektebene angeordnet, kann die Beleuchtungsoptik ausgebildet sein, dass die Leuchtfeldblende nach Unendlich abgebildet wird.

Nach Unendlich abgebildet kann bedeuten, dass auf eine Ebene abgebildet wird, deren Entfernung von der Leuchtfeldblende entlang der Achse mindestens 10mal größer ist, oder mindestens 50mal größer ist als die Entfernung der Objektebene von der Leuchtfeldblende. Die Achse des Beleuchtungsstrahlengangs kann dabei durch den abgebildeten Bereich der Objektebene gehen.

Gemäß einer Ausführungsform wird der minimale Querschnitt und der Öffnungswinkel aus den Lichtstrahlen bestimmt, die von der Austrittsfläche der Lichtquelle ausgehen und auf einen kreisförmigen Bereich der Objektebene auftreffen, der einen Durchmesser von 8 Millimeter um die Achse des Beleuchtungsstrahlengangs aufweist.

Gemäß einer Ausführungsform ist der erste und/oder ist der zweite Beleuchtungsstrahlengang konfiguriert, im abgebildeten Bereich der Objektebene eine Fläche mit einem Durchmesser von mehr als 1 Millimeter, oder mehr als 2 Millimeter, oder mehr als 4 Millimeter, oder mehr als 6 Millimeter, oder mehr als 7 Millimeter zu beleuchten. Diese Fläche in der Objektebene kann simultan beleuchtet werden. In anderen Worten kann diese Fläche beleuchtet werden, ohne einen Scanvorgang auszuführen.

Die Beleuchtungsoptik kann ein abbildendes System sein. Ein abbildendes System kann ein System sein, dass aus Linsen, Kittgliedern, Spiegeln, Strahlteilern, und/oder Blenden besteht. Die Beleuchtungsoptik kann so ausgebildet sein, dass der Lichtleitwert eine Erhaltungsgröße ist. Gemäß einer Ausführungsform kann die Beleuchtungsoptik so ausgebildet sein, dass die Ebene des minimalen Querschnitts des Beleuchtungsstrahlengangs auf die Retina eines rechtsichtigen zu untersuchenden Auges abgebildet wird. In anderen Worten kann die Beleuchtungsoptik so ausgebildet sein, dass die Ebene des minimalen Querschnitts nach Unendlich abgebildet wird. Die Achse des jeweiligen Beleuchtungsstrahlengangs kann dabei durch den abgebildeten Bereich der Objektebene gehen. Nach Unendlich abgebildet kann bedeuten, dass auf eine Ebene abgebildet wird, deren Entfernung vom minimalen Querschnitt entlang der Achse mindestens 10mal größer ist, oder mindestens 50mal größer ist als die Entfernung der Objektebene von der Ebene des minimalen

Querschnitts. Die Lichtstrahlen aller Strahlenbündel können dann in der Objektebene parallel oder im Wesentlichen parallel zur Achse des Beleuchtungsstrahlengangs verlaufen.

5 Der Öffnungswinkel kann definiert werden als der maximale Winkel, den Lichtstrahlen des Strahlengangs bilden, die von einem Punkt in einer Ebene des minimalen Querschnitts ausgehen oder zu ihm konvergieren, wobei der Punkt auf der Achse des Beleuchtungsstrahlenganges liegt. Die Lichtstrahlen durchlaufen
10 dabei die Beleuchtungsoptik von der Austrittsfläche bis zur Objektebene. Der Öffnungswinkel kann auch ein Öffnungswinkel eines Laserstrahls sein. Der Öffnungswinkel kann im Fernfeld gemessen werden. Weist der Strahlengang beispielsweise eine Taille oder Strahltaille im minimalen Querschnitt auf, so kann
15 der Öffnungswinkel abhängig von einem Verlauf der Lichtstrahlen im Fernfeld bestimmt werden. Das Fernfeld ist in einem Abstand von der Strahltaille angeordnet, der beispielsweise größer ist als ein 5faches oder ein 10faches der Rayleighlänge.

20 Der Öffnungswinkel kann größer als Null sein. Der Öffnungswinkel des ersten und/oder zweiten Beleuchtungsstrahlengangs kann mindestens so groß sein, dass in der Objektebene eine Kreisfläche mit einem Durchmesser von 8 Millimeter um die Achse des jeweiligen Beleuchtungsstrahlengangs ausgeleuchtet ist. Der
25 Öffnungswinkel kann stromabwärts oder stromaufwärts gemessen werden. Der Öffnungswinkel kann von einem Durchmesser einer Aperturblende der Beleuchtungsoptik abhängen. Der Öffnungswinkel des Strahlengangs, der auf die Retina eintrifft kann ebenfalls vom Durchmesser der Aperturblende abhängen. Der Öffnungswinkel
30 kann der Winkel sein, den ein Punkt des minimalen Querschnitts mit einem Durchmesser einer Eintritts- oder Austrittspupille des Beleuchtungsstrahlengangs bildet, wobei der Punkt auf der Achse des Beleuchtungsstrahlengangs liegt.

35 Die Größe M kann für den ersten und den zweiten Beobachtungsstrahlengang unterschiedliche oder gleiche Werte annehmen.

Das Mikroskopiesystem kann ein Stereo-Mikroskopiesystem vom
40 Teleskop-Typ sein. Ferner kann die Objektivlinse vom ersten und

zweiten Beleuchtungsstrahlengang durchsetzt werden. Daher kann die Objektivlinse Teil der Abbildungsoptik und der Beleuchtungsoptik sein. Alternativ kann das Mikroskopiesystem ein Stereo-Mikroskopiesystem vom Greenough-Typ sein. Der Stereowinkel kann beispielsweise zwischen 5 Grad und 20 Grad oder zwischen 10 Grad und 16 Grad betragen.

Gemäß einer Ausführungsform weist das Mikroskopiesystem ein erstes Kontrastelement auf, das im ersten Beobachtungsstrahlengang angeordnet ist und ein zweites Kontrastelement, das im zweiten Beobachtungsstrahlengang angeordnet ist, wobei die Abbildungsoptik ausgebildet ist, dass Objekte in der Objektebene, die mit Durchlicht parallel zur Achse des ersten und/oder zweiten Beobachtungsstrahlengangs beleuchtet werden, mit Phasenkontrast oder im Dunkelfeld abbildbar sind. Das Kontrastelement kann eine Phasenplatte und/oder eine Blende aufweisen.

Gemäß einer Ausführungsform weist die Abbildungsoptik auf: ein erstes Kontrastelement, das in einer ersten Zwischenebene der Abbildungsoptik angeordnet ist, wobei die erste Zwischenebene zwischen der Objektebene und der ersten Bildebene angeordnet ist; ein zweites Kontrastelement, das in der zweiten Zwischenebene der Abbildungsoptik angeordnet ist, wobei die zweite Zwischenebene zwischen der Objektebene und der zweiten Bildebene angeordnet ist; wobei das erste und das zweite Kontrastelement so ausgebildet sind, dass Licht, eines ersten zentralen Bereiches eines Querschnitts des ersten Beobachtungsstrahlengangs in der ersten Zwischenebene, und/oder Licht eines zweiten zentralen Bereiches eines Querschnitts des zweiten Beobachtungsstrahlengangs in der zweiten Zwischenebene

- a) stärker absorbiert wird als außerhalb des jeweiligen zentralen Bereiches in der jeweiligen Zwischenebene; und/oder
- b) eine Phasenverschiebung erfährt, die unterschiedlich ist zu einer Phasenverschiebung in der jeweiligen Zwischenebene außerhalb des jeweiligen zentralen Bereiches.

Dadurch ist es möglich, ein Stereo-Mikroskopiesystem zu erhalten, das eine Phasenkontrast- oder Dunkelfeldabbildung von Strukturen im Vorderbereich des Auges ermöglicht. Insbesondere können dadurch Strukturen beobachtet werden, die Lichtstrahlen nur in kleinen Winkeln streuen oder die auf das eintreffende Licht nur eine geringe Phasenverschiebung verursachen.

Die erste Zwischenebene kann zwischen einer Objektivlinse und der ersten Bildebene oder einem ersten Zoomsystem angeordnet sein. Entsprechendes kann für die zweite Zwischenebene gelten. Die Abbildungsoptik kann so konfiguriert sein, dass Strahlenbündel, welche die Objektebene als ebene Wellenfronten in Richtung der Achse des ersten Beobachtungsstrahlengangs verlassen, durch die Abbildungsoptik in einen Punkt der ersten Zwischenebene fokussiert werden. Entsprechend kann die Abbildungsoptik so konfiguriert sein, dass Strahlenbündel, welche die Objektebene als ebene Wellenfront in Richtung der Achse der des zweiten Beobachtungsstrahlengangs verlassen, durch die Abbildungsoptik in einen Punkt der zweiten Zwischenebene fokussiert werden. Die Zwischenebenen können Ebenen sein, die optisch konjugiert zur Retina des Auges sind, oder optisch konjugiert zu einem Bereich der Retina, in dem sich einer oder mehrere durch die Beleuchtungsoptik erzeugte Beleuchtungsflecke befinden. Der erste und der zweite zentrale Bereich können die Bilder, die von den Beleuchtungsflecke auf der Retina in den Zwischenebenen erzeugt werden, zumindest teilweise abdecken.

In anderen Worten können die zentralen Bereiche in der ersten und der zweiten Zwischenebene so angeordnet sein, dass auf sie Strahlenbündel fokussiert werden, welche die Objektebene in Richtung der Achse des jeweiligen Beobachtungsstrahlengangs als ebene Wellenfront verlassen ohne am Objekt gestreut zu werden. Infolge der Absorption in den Bereichen innerhalb der ersten und der zweiten Zwischenebene werden dann nur diejenigen Lichtstrahlen in die erste und zweite Bildebene abgebildet, die am Objekt gestreut werden. Dadurch kann eine Dunkelfeldabbildung erreicht werden.

Die Phasenverschiebung, die das Licht in den zentralen Bereichen innerhalb der ersten und der zweiten Zwischenebene erfährt, kann abhängig von einer Phasenverschiebung eingestellt sein oder einstellbar sein, welche die zu beobachtenden Objekte im Objektbereich erzeugen. Insbesondere kann die Phasenverschiebung so eingestellt sein, dass die Phasenverschiebung des gestreuten Lichts relativ zur Phasenverschiebung des ungestreuten Lichts so ist, dass das gestreute Licht durch Interferenz mit dem ungestreuten Licht möglichst stark geschwächt wird. Dadurch können im Bild, das in der Bildebene erzeugt wird, die zu beobachtenden Objekte dunkel vor einem hellen Hintergrund erscheinen.

Beispielsweise kann eine Phasenverschiebung von Licht, in den zentralen Bereichen, ± 90 Grad oder ± 45 Grad oder $\pm 22,5$ Grad betragen, relativ zu Licht das außerhalb der zentralen Bereiche, oder in einem Umgebungsbereich um die zentralen Bereiche.

Das Kontrastelement kann so ausgebildet sein, dass es für Lichtstrahlen, die auf die erste oder zweite Zwischenebene außerhalb des ersten und des zweiten Bereiches auftreten, transparent oder im Wesentlichen transparent ist und/oder keine oder im Wesentlichen keine Phasenverschiebung erzeugt.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform deckt der erste und/oder zweite zentrale Bereiche einen Durchstoßpunkt der Achse des ersten und/oder zweiten Beleuchtungsstrahlenganges in der ersten und/oder zweiten Zwischenebene ab.

Der erste zentrale Bereich und/oder der zweite zentrale Bereich können Bereiche des Strahlquerschnitts des jeweiligen Beobachtungsstrahlenganges umfassen, die innerhalb eines Kreises um den Durchstoßpunkt liegen, wobei der Durchmesser des Kreises geringer ist als 50 % oder geringer ist als 30 % des Durchmessers des jeweiligen Querschnitts des Beobachtungsstrahlenganges.

Der erste zentrale Bereich und der zweite zentrale Bereich können insbesondere kreisförmige Bereiche sein. Das erste

und/oder das zweite Kontrastelement können so ausgebildet sein, dass Lichtstrahlen, welche die Objektebene in einem kleineren Winkel als einen Mindeststreuwinkel relativ zur Achse des ersten oder zweiten Beobachtungsstrahlengangs verlassen, auf den ersten oder den zweiten zentralen Bereich auftreffen. Die Abbildungsoptik so ausgebildet sein, dass Lichtstrahlen, welche die Objektebene der Abbildungsoptik in einem größeren Winkel als den Mindeststreuwinkel relativ zur Achse des ersten und zur Achse des zweiten Beobachtungsstrahlenganges verlassen, auf keinen der zentralen Bereiche auftreffen.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform weist die Achse des ersten Beobachtungsstrahlengangs zu einer Achse des ersten Beleuchtungsstrahlengangs einen Winkel in der Objektebene auf, der geringer ist als 6 Grad; und/oder die Achse des zweiten Beobachtungsstrahlengangs weist zu einer Achse des zweiten Beleuchtungsstrahlengangs einen Winkel in der Objektebene auf, der geringer ist als 6 Grad.

Durch den vergleichsweise geringen Winkel zwischen der Achse des Beleuchtungsstrahlenganges und der Achse des Beobachtungsstrahlenganges wird der durch die Beleuchtungsoptik erzeugte Rotlichtreflex durch den Beobachter homogen über die gesamte Pupille wahrgenommen, selbst wenn die Retina nur in einem Beleuchtungsfleck mit einem geringen Durchmesser beleuchtet wird. Dies ermöglicht eine zuverlässige Erkennung von Objekten in einem großen Bereich der Objektebene.

Der erste, der zweite Beleuchtungsstrahlengang, der erste Beobachtungsstrahlengang und/oder der zweite Beobachtungsstrahlengang können jeweils die Objektivlinse außeraxial durchsetzen. Die Achse des jeweiligen Strahlengangs kann entlang eines Lichtstrahls verlaufen, der entlang der optische Achse von optischen Elementen verläuft, die zwischen der Objektivlinse und der Lichtquelle oder zwischen der Objektivlinse und der ersten oder zweiten Bildebene angeordnet sind. Dadurch kann die Achse des jeweiligen Strahlenganges nach dem Durchsetzen der Objektivlinse abgewinkelt weiterlaufen. Es ist aber auch denkbar, dass der erste und/oder zweite

Beleuchtungsstrahlengang frei von einem Durchsetzen der Objektivlinse sind.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform weist die Achse des ersten Beobachtungsstrahlengangs zur Achse des ersten Beleuchtungsstrahlengangs einen Winkel in der Objektebene auf, der geringer ist als 4 Grad, oder geringer ist als 2 Grad, oder geringer ist als 1 Grad, oder geringer ist als 0,5 Grad. Gemäß einer weiteren Ausführungsform weist die Achse des zweiten Beobachtungsstrahlengangs zur Achse des zweiten Beleuchtungsstrahlengangs einen Winkel in der Objektebene auf, der geringer ist als 4 Grad, oder geringer ist als 2 Grad, oder geringer ist als 1 Grad, oder geringer ist als 0,5 Grad.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform ist die Achse des ersten Beobachtungsstrahlengangs koaxial zur Achse des ersten Beleuchtungsstrahlengangs ausgerichtet und/oder ist die Achse des zweiten Beobachtungsstrahlengangs koaxial zur Achse des zweiten Beleuchtungsstrahlengangs ausgerichtet.

Ausführungsformen stellen ein Mikroskopiesystem zur Augenuntersuchung bereit, aufweisend: eine Abbildungsoptik, die ausgebildet ist, einen ersten Beobachtungsstrahlengang der Abbildungsoptik zu erzeugen, um ein erstes Bild eines Bereiches einer Objektebene der Abbildungsoptik in einer ersten Bildebene der Abbildungsoptik zu erzeugen, wobei die Abbildungsoptik ein erstes Kontrastelement aufweist, das in einer ersten Zwischenebene der Abbildungsoptik angeordnet ist, wobei die erste Zwischenebene zwischen der Objektebene und der ersten Bildebene angeordnet ist; wobei das erste Kontrastelement so ausgebildet ist, dass Licht, welches auf einen ersten zentralen Bereich eines Querschnitts des ersten Beobachtungsstrahlengangs innerhalb der ersten Zwischenebene auftrifft

a) stärker absorbiert wird als in der ersten Zwischenebene außerhalb des ersten zentralen Bereiches; und/oder

b) eine Phasenverschiebung erfährt, die unterschiedlich ist zu einer Phasenverschiebung in der ersten Zwischenebene außerhalb des ersten zentralen Bereiches;

wobei das Mikroskopiesystem ferner aufweist: eine Lichtquelle zur Erzeugung von Beleuchtungslicht; eine erste Beleuchtungsoptik, die ausgebildet ist, einen ersten Beleuchtungsstrahlengang der Beleuchtungsoptik zu erzeugen, der zumindest einen Teil des Beleuchtungslichts auf die Objektebene lenkt; wobei die Beleuchtungsoptik ausgebildet ist, dass für den ersten Beleuchtungsstrahlengang gilt:

$$D \cdot \sin(\alpha) < M ;$$

wobei D ein Durchmesser eines minimalen Querschnitts des ersten Beleuchtungsstrahlengangs ist und α ein Öffnungswinkel des ersten Beleuchtungsstrahlenganges an einer Position des minimalen Querschnitts ist; wobei M einen Wert von 0,9 Millimeter aufweist, oder einen Wert von 0,5 Millimeter aufweist, oder einen Wert von 0,1 Millimeter aufweist oder einen Wert von 50 Mikrometer aufweist, oder einen Wert von 20 Mikrometer aufweist, oder einen Wert von 10 Mikrometer aufweist, oder einen Wert von 7 Mikrometer aufweist, oder einen Wert von 5 Mikrometer aufweist, oder einen Wert von 2 Mikrometer aufweist.

Gemäß einer Ausführungsform weist die Abbildungsoptik des Mikroskopiesystems ferner ausgebildet, einen zweiten Beobachtungsstrahlengang zu erzeugen, wobei eine Achse des ersten Beobachtungsstrahlengangs und eine Achse des zweiten Beobachtungsstrahlengangs einen Stereowinkel in der Objektebene bilden.

Gemäß einer Ausführungsform ist das Mikroskopiesystem ausgebildet ist, dass eine Achse des ersten Beobachtungsstrahlengangs, zu einer Achse des ersten Beleuchtungsstrahlengangs einen Winkel in der Objektebene aufweist, der geringer ist als 6 Grad.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform weist die Achse des ersten Beobachtungsstrahlengangs zur Achse des ersten Beleuchtungsstrahlengangs einen Winkel in der Objektebene auf, der geringer ist als 4 Grad, oder geringer ist als 2 Grad, oder

geringer ist als 1 Grad, oder geringer ist als 0,5 Grad. Gemäß einer weiteren Ausführungsform ist die Achse des ersten Beobachtungsstrahlengangs koaxial zur Achse des ersten Beleuchtungsstrahlengangs ausgerichtet.

5

Gemäß einer weiteren Ausführungsform gilt ferner:

$$D \leq L;$$

10 wobei L einen Wert von 1,5 Millimeter aufweist, oder einen Wert von 1 Millimeter aufweist, oder einen Wert von 0,5 Millimeter aufweist, oder einen Wert von 0,1 Millimeter aufweist, oder einen Wert von 50 Mikrometer aufweist, oder einen Wert von 30 Mikrometer aufweist, oder einen Wert von 20 Mikrometer aufweist,
15 oder einen Wert von 15 Mikrometer aufweist, oder einen Wert von 10 Mikrometer aufweist, oder einen Wert von 5 Mikrometer aufweist.

Die Größe L kann für beide Beleuchtungsstrahlengänge gleiche
20 oder unterschiedliche Werte aufweisen.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform gilt ferner:

$$\alpha \leq p;$$

25

wobei p einen Wert von 45 Grad aufweist, oder einen Wert von 30 Grad aufweist oder einen Wert von 20 Grad aufweist, oder einen Wert von 15 Grad aufweist, oder einen Wert von 10 Grad aufweist, oder einen Wert von 5 Grad aufweist, oder einen Wert
30 von 2 Grad aufweist, oder einen Wert von 1 Grad aufweist, oder einen Wert von 0,5 Grad aufweist, oder einen Grad von 0,2 Grad aufweist, oder einen Wert von 0,15 Grad aufweist.

Die Größe p kann für beide Beleuchtungsstrahlengänge gleiche
35 oder unterschiedliche Werte aufweisen. Ein kleiner Querschnitt des Beleuchtungsstrahlengangs und ein kleiner Öffnungswinkel kann beispielsweise dadurch erreicht werden, dass die Lichtquelle einen Lichtwellenleiter; beispielsweise einen Multimode-Lichtwellenleiter und/oder einen Singlemode-
40 Lichtwellenleiter aufweist.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform weist die Lichtquelle ferner einen Lichtleiter, einen Multimode-Lichtwellenleiter und/oder einen Monomode-Lichtwellenleiter auf.

5 Der Lichtleiter kann zwischen einer Lampe oder einem Laser und der Beleuchtungsoptik angeordnet sein. Der Lichtleiter kann zumindest einen Teil der Austrittsfläche der Lichtquelle aufweisen. Beispielsweise kann die Austrittsfläche oder ein Teil
10 der Austrittsfläche ein Faserende des Lichtwellenleiters sein. Der Lichtleiter kann einen Kern und einen Mantel aufweisen. Der Durchmesser des Kerns kann der Durchmesser des minimalen Querschnitts sein. Der Lichtleiter kann eine numerische Apertur aufweisen. Die numerische Apertur kann dem Wert von

15

$$\sin(\alpha/2)$$

entsprechen.

20 Der Lichtwellenleiter und die Beleuchtungsoptik können so ausgebildet sein, dass das Beleuchtungslicht in der Objektebene eine Leistung von mehr als 100 μW , oder mehr als 200 μW , oder mehr als 500 μW aufweist.

25 Ein Monomode-Lichtwellenleiter wird auch als Singlemode-Lichtwellenleiter bezeichnet. Ein Monomode-Lichtwellenleiter kann beispielsweise einen Kern aufweisen, der einen Durchmesser von weniger als 15 Mikrometer oder weniger als 10 Mikrometer hat. Beispielsweise kann ein Monomode-Lichtwellenleiter einen
30 Kerndurchmesser zwischen 3 Mikrometer und 9 Mikrometer aufweisen.

Durch die Verwendung eines Monomode-Lichtwellenleiters ist es möglich, dass der Beleuchtungsfleck auf der Retina einen
35 kleineren Durchmesser aufweist, als bei der Verwendung von Multimode-Lichtwellenleitern. Dadurch kann eine besonders große Kontrasterhöhung erreicht werden.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform ist die Beleuchtungsoptik
40 ausgebildet, dass mehr als 50 %, insbesondere mehr als 80 %

einer spektralen Intensitätsverteilung des Beleuchtungslichts, die von dem ersten und/oder dem zweiten Beleuchtungsstrahlengang auf die Objektebene gelenkt werden, in der Objektebene in einem Wellenlängenbereich zwischen 580 nm und 1400 nm liegt; oder in einem Wellenlängenbereich zwischen 650 nm und 1400 nm liegt, oder in einem Wellenlängenbereich zwischen 700 nm und 1400 nm liegt, oder in einem Wellenlängenbereich zwischen 580 nm und 900 nm liegt.

Die spektrale Intensitätsverteilung des Beleuchtungslichts kann als eine Funktion definiert werden, die von der Wellenlänge abhängt, wobei ein Funktionswert zu einer Wellenlänge den Intensitätsanteil des Lichts in einem infinitesimalen Bereich um diese Wellenlänge angibt. Das Integral der spektralen Intensitätsverteilung über alle Wellenlängen ergibt somit die Gesamtintensität des Lichts. Gemäß der Ausführungsform liegen mehr als 50 % der spektralen Intensitätsverteilung des auf die Objektebene eintreffenden Beleuchtungslichts in einem Wellenbereich zwischen 580 nm und 1400 nm. In anderen Worten ergibt das Integral der spektralen Intensitätsverteilung von 580 nm bis 1400 nm einen Wert, der mehr als 50 % der Gesamtintensität des Beleuchtungslichts ist.

Dadurch ist es möglich, dass das Beleuchtungslicht in einem Wellenlängenbereich liegt, in dem die Retina eine hohe Reflektivität aufweist. Dadurch ist es insbesondere möglich, durch die Beleuchtungsoptik einen vergleichsweise kleinen Beleuchtungsfleck über lange Belichtungszeiten zu erzeugen, ohne die Retina durch die Lichtintensität des Beleuchtungslichts zu schädigen.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform weist die Abbildungsoptik ferner auf: eine Objektivlinse die im ersten Beobachtungsstrahlengang zwischen der Objektebene und der ersten Zwischenebene angeordnet ist; und ein erstes Zoomsystem, das im ersten Beobachtungsstrahlengang zwischen der Objektivlinse und der ersten Zwischenebene angeordnet ist; und eine Steuereinheit, die ausgebildet ist, eine Änderung einer Position des ersten Kontrastelements entlang der Achse des ersten

Beobachtungsstrahlengangs synchron mit einer Änderung einer Vergrößerung des ersten Zoomsystems zu steuern.

5 Gemäß einer weiteren Ausführungsform ist die Objektivlinse oder eine zweite Objektivlinse des Mikroskopiesystems im zweiten Beobachtungsstrahlengang zwischen der Objektebene und der zweiten Zwischenebene angeordnet, und das Mikroskopiesystem weist ferner ein zweites Zoomsystem auf, das im zweiten Beobachtungsstrahlengang zwischen der Objektivlinse oder der
10 zweiten Objektivlinse und der zweiten Zwischenebene angeordnet ist; wobei die Steuereinheit ferner ausgebildet ist, eine Änderung einer Position des zweiten Kontrastelements entlang der Achse des zweiten Beobachtungsstrahlengangs synchron mit einer Änderung einer Vergrößerung des zweiten Zoomsystems zu steuern.

15 Die Steuereinheit kann ausgebildet sein, Signale vom ersten und/oder zweiten Zoomsystem zu empfangen, wobei die Signale eine eingestellte Vergrößerung des jeweiligen Zoomsystems wiedergeben. Die Steuereinheit kann ferner konfiguriert sein,
20 dass abhängig von den empfangenen Signalen wiederum Signale an Aktuatoren gesendet werden, die am ersten und/oder zweiten Kontrastelement befestigt sind, wobei die Aktuatoren ausgebildet sind, die Position des ersten und/oder zweiten Kontrastelements entlang der jeweiligen Achse des Beobachtungsstrahlengangs in
25 Abhängigkeit von den Signalen der Steuereinheit zu verändern.

Ausführungsformen stellen ein Mikroskopiesystem zur Augenuntersuchung bereit, aufweisend: eine Abbildungsoptik, die ausgebildet ist, zumindest ein Bild eines Bereiches einer
30 Objektebene der Abbildungsoptik auf zumindest einer Bildebene der Abbildungsoptik zu erzeugen; eine Beleuchtungsoptik, welche ausgebildet ist, Beleuchtungslicht auf die Objektebene zu lenken; eine Bildverarbeitungseinrichtung, welche dazu konfiguriert ist: zumindest zwei digitale Bilder eines Objektes
35 im Bereich der Objektebene abhängig vom zumindest einen Bild zu erzeugen; das erste und das zweite digitale Bild jeweils in zumindest ein erstes Teilbild und ein zweites Teilbild zu trennen; wobei das Trennen in Abhängigkeit von Pixeldatenwerten des ersten und/oder des zweiten digitalen Bildes erfolgt; wobei
40 das erste Teilbild des ersten digitalen Bildes und das erste

Teilbild des zweiten digitalen Bildes einen gleichen Objektbereich des Objektes wiedergeben; und ein zusammengesetztes digitales Bild zu erzeugen abhängig vom ersten Teilbild des ersten digitalen Bildes und vom zweiten Teilbild des zweiten digitalen Bildes.

Die Bildverarbeitungseinrichtung kann ferner so ausgebildet sein, jedes der digitalen Bilder in eine Vielzahl von Teilbilder, zum Beispiel mehr als 10 Teilbilder oder mehr als 100 Teilbilder getrennt wird. Das Trennen kann so erfolgen, dass Gruppen an Teilbilder erzeugt werden, wobei die Teilbilder einer Gruppe aus verschiedenen digitalen Bildern erzeugt wurden und ferner alle Teilbilder einer Gruppe einen gleichen Objektbereich wiedergeben. Ferner kann das Trennen so erfolgen, dass jedes Paar an Teilbildern, die verschiedenen Gruppen angehören, verschiedene oder nicht überlappende Objektbereiche wiedergeben. Die Bildverarbeitungseinrichtung kann einen Computer aufweisen, der mit dem ersten und/oder zweiten Bildsensor in Signalverbindung steht und der ausgebildet ist, vom ersten und/oder zweiten Bildsensor Sensordaten zu empfangen und die empfangenen Sensordaten in Pixeldatenwerte des ersten und/oder zweiten digitalen Bildes umzuwandeln und zu speichern. Ein digitales Bild kann eine vergrößerte Abbildung der Objektebene sein. Die Bildverarbeitungseinrichtung ist konfiguriert, für jedes digitale Bild ein Trennen in ein erstes Teilbild und ein zweites Teilbild durchzuführen, wobei das Trennen in Abhängigkeit von Pixeldatenwerten des jeweiligen digitalen Bildes erfolgt. Ein Teilbild kann ein räumlicher Bereich eines digitalen Bildes sein. In anderen Worten kann ein Teilbild eine Gruppe von Pixeln sein. Das erste Teilbild und das zweite Teilbild eines digitalen Bildes können komplementäre Teilbilder sein. Beispielsweise kann das erste Teilbild des ersten digitalen Bildes und das zweite Teilbild des ersten digitalen Bildes zusammen das erste digitale Bild ergeben.

Ein Pixel kann beispielsweise für jede der Farben rot, blau und gelb einen Pixeldatenwert aufweisen. Jeder der Pixeldatenwerte kann eine Farbintensität der jeweiligen Farbe repräsentieren. Es sind jedoch auch andere Farbkodierungen denkbar. Beispielsweise kann ein Pixel einen Pixeldatenwert aufweisen, der einen

Graustufenwert repräsentiert. Das Trennen der Bilder kann daher beispielsweise abhängig von Pixeldatenwerten einer oder mehrerer der Farben Rot, Blau und/oder Gelb; und/oder abhängig von Pixeldatenwerten erfolgen, die Graustufenwerten repräsentieren.

5 Zusätzlich oder alternativ kann das Trennen anhand der zu erwarteten Form des ersten und/oder zweiten Teilbildes erfolgen. Beispielsweise kann eine Form des ersten Teilbildes ein Kreis sein, wobei der Kreis einen Durchmesser aufweist, der innerhalb eines zu erwarteten Wertebereichs liegt. Der Wertebereich kann

10 beispielsweise ein Wertebereich sein, der einem Bereich zwischen 1,5 und 8 Millimeter in der Objektebene entspricht. Dieser Wertebereich entspricht dem Durchmesser einer Pupille des menschlichen Auges. Das Trennen kann ein Segmentieren des ersten und/oder zweiten digitalen Bildes umfassen. Beispiele für

15 Verfahren zum Segmentieren des digitalen Bildes sind: ein pixelorientiertes Segmentierungsverfahren, ein kantenorientiertes Segmentierungsverfahren, ein regionenorientiertes Segmentierungsverfahren, ein modellorientiertes Segmentierungsverfahren und/oder ein

20 texturorientiertes Segmentierungsverfahren. Zusätzlich oder alternativ kann das Trennen Bildverarbeitungsrountinen umfassen, wie Mustererkennung, Hochpass, Tiefpass und/oder Kantendetektion.

25 Das Trennen kann abhängig von anatomischen Parametern erfolgen. Ein anatomischer Parameter kann beispielsweise ein Pupillendurchmesser eines menschlichen Auges sein. Die Pupille kann als die Öffnung definiert werden, die von der Iris des Auges freigelassen wird. Die Pupille eines menschlichen Auges

30 hat die Form eines Kreises mit einem Durchmesser zwischen 1,5 Millimeter und 8 Millimeter, oder bei Verabreichung entsprechender Medikamente zwischen 6 und 8 Millimeter. Bei Abbildung eines Auges im Durchlicht des Rotlichtreflexes kann die Pupille in rotem Durchlicht erscheinen. Die

35 Bildverarbeitungseinrichtung kann daher so konfiguriert sein, dass sie abhängig von den Pixeldatenwerten einen rot erscheinenden Kreis mit einem Durchmesser zwischen 6 und 8 Millimeter im ersten und/oder zweiten Bild identifiziert.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform ist das Mikroskopiesystem dazu konfiguriert, dass in der Objektebene eine spektrale Intensitätsverteilung des Beleuchtungslichts, das von der Beleuchtungsoptik zur Erzeugung des ersten digitalen Bildes auf die Objektebene gelenkt wird, unterschiedlich ist im Vergleich zur Erzeugung des zweiten digitalen Bildes.

Dadurch ist es möglich, dass das erste Bild und das zweite Bild bei verschiedenen spektralen Intensitätsverteilungen des Beleuchtungslichts erzeugt werden. Insbesondere ist es dadurch möglich, dass das erste Beleuchtungslicht für die Erzeugung eines Rotlichtreflexes optimiert wird und das zweite Beleuchtungslicht für die Abbildung der Umgebung der Pupille. Dadurch kann eine bessere Abbildung des gesamten Vorderbereiches des Auges erhalten werden.

Die unterschiedlichen spektralen Intensitätsverteilungen können beispielsweise erzeugt werden durch Filter, die in der Abbildungsoptik angeordnet sind, durch unterschiedliche Lichtquellen und/oder durch unterschiedliche Betriebsmodi einer Lichtquelle. Das Beleuchtungslicht, das zur Erzeugung des ersten digitalen Bildes von der Beleuchtungsoptik auf die Objektebene gelenkt wird, kann von der ersten Lichtquelle erzeugt werden. Das Beleuchtungslicht, das zur Erzeugung des zweiten Bildes von der Beleuchtungsoptik auf die Objektebene gelenkt wird, kann von einer weiteren Lichtquelle erzeugt werden. Eine spektrale Intensitätsverteilung von Licht, das von der ersten Lichtquelle erzeugt wird, kann sich unterscheiden von einer spektralen Intensitätsverteilung von Licht, das von der weiteren Lichtquelle erzeugt wird.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform ist die Beleuchtungsoptik dazu konfiguriert, dass mehr als 50 % oder mehr als 80 % der spektralen Intensitätsverteilung des Beleuchtungslichts in der Objektebene zur Erzeugung des ersten digitalen Bildes in einem Wellenlängenbereich zwischen 580 nm und 1400 nm liegt, oder in einem Wellenlängenbereich zwischen 650 nm und 1400 nm liegt, oder in einem Wellenlängenbereich zwischen 700 nm und 1400 nm, oder in einem Wellenlängenbereich zwischen 580 nm und 900 nm liegt.

- Beispielsweise kann mehr als 50 % oder mehr als 80 % der spektralen Intensitätsverteilung zur Erzeugung des ersten digitalen Bildes im roten und/oder infraroten Wellenlängenbereich liegen, während die spektrale Intensitätsverteilung des Beleuchtungslichts zur Erzeugung des zweiten digitalen Bildes die spektrale Intensitätsverteilung von Weißlicht ist.
- 10 Gemäß einer weiteren Ausführungsform ist die Beleuchtungsoptik ferner ausgebildet, einen ersten und einen weiteren Beleuchtungsstrahlengang zu erzeugen, wobei sich der erste Beleuchtungsstrahlengang vom weiteren Beleuchtungsstrahlengang unterscheidet; wobei das Mikroskopiesystem ferner konfiguriert
- 15 ist, zur Erzeugung des ersten digitalen Bildes, die Objektebene durch den ersten Beleuchtungsstrahlengang zu beleuchten; und zur Erzeugung des zweiten digitalen Bildes die Objektebene durch den weiteren Beleuchtungsstrahlengang zu beleuchten.
- 20 Der weitere Beleuchtungsstrahlengang kann sich vom ersten Beleuchtungsstrahlengang beispielsweise dadurch unterscheiden, dass im weiteren Beleuchtungsstrahlengang eine Retinaschutzblende im Strahlengang angeordnet ist. Der weitere Strahlengang kann ein Strahlengang zur Umfeldbeleuchtung sein.
- 25 Die Retinaschutzblende kann ausgebildet sein, dass eine Intensität des Beleuchtungslichts des weiteren Beleuchtungsstrahlenganges, die unter einem Winkel von weniger als 6 Grad, oder weniger als 4 Grad, oder weniger als 2 Grad zur Achse des ersten Beobachtungsstrahlengangs auf die Objektebene
- 30 einfällt, nur ein geringer Anteil der Gesamtintensität des Beleuchtungslichts darstellt. Beispielsweise kann dieser Anteil weniger als 20 % der Gesamtintensität, oder weniger als 10 % der Gesamtintensität betragen.
- 35 Gemäß einer weiteren Ausführungsform ist die Abbildungsoptik ferner ausgebildet, einen ersten Beobachtungsstrahlengang zu erzeugen, der den Bereich der Objektebene in die Bildebene abbildet, wobei der erste und der weitere Beleuchtungsstrahlengang so konfiguriert sind, dass eine
- 40 Lichtintensität des ersten Beleuchtungsstrahlengangs, die unter

einem Winkel von weniger als 6 Grad zu einer Achse des ersten Beobachtungsstrahlengangs auf die Objektebene eingestrahlt wird, höher ist, als eine Lichtintensität des weiteren Beleuchtungsstrahlenganges, die unter einem Winkel von weniger als 6 Grad zur Achse des ersten Beobachtungsstrahlengangs auf die Objektebene eingestrahlt wird.

Der erste Beleuchtungsstrahlengang kann so konfiguriert sein, dass durch die Abbildungsoptik ein Rotlichtreflex beobachtbar ist. Ferner kann der weitere Beleuchtungsstrahlengang ausgelegt sein, dass eine Intensität in einem Beleuchtungsfleck auf der Retina, der von dem weiteren Beleuchtungsstrahlengang erzeugt wird, geringer ist als in einem Beleuchtungsfleck, der durch den ersten Beleuchtungsstrahlengang erzeugt wird. Ferner kann der weitere Beleuchtungsstrahlengang eine Retinaschutzblende aufweisen, während der Strahlengang des ersten Beleuchtungsstrahlengangs frei von einer Retinaschutzblende ist.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform weist das Mikroskopiesystem ferner auf: einen ersten und einen zweiten Bildsensor, wobei die Bildverarbeitungseinrichtung ausgebildet ist, das erste digitale Bild abhängig von Sensordaten des ersten Bildsensors zu erzeugen und das zweite digitale Bild abhängig von Sensordaten des zweiten Bildsensors zu erzeugen.

Der erste und der zweite Bildsensor können jeweils in einer Bildebene des Mikroskopiesystems angeordnet sein. Die Bildebenen können sich unterscheiden. Der zweite Bildsensor kann verschieden vom ersten Bildsensor ausgebildet sein. Beispielsweise kann eine spektrale Empfindlichkeit des zweiten Bildsensors unterschiedlich von einer spektralen Empfindlichkeit des ersten Bildsensors sein. Eine spektrale Empfindlichkeit kann definiert werden, als eine Funktion der Empfindlichkeit des Bildsensors in Abhängigkeit von der Wellenlänge des detektierten Lichts.

Beispielsweise kann für jede Wellenlänge in einem Wellenlängenbereich, der von einem Bereich von 580 Nanometer bis 1400 Nanometer, oder einem Bereich von 650 Nanometer bis 1400 Nanometer, oder einem Bereich von 700 Nanometer bis

1400 Nanometer, oder von einem Bereich von 580 Nanometer bis 900 Nanometer umfasst ist, eine Empfindlichkeit des ersten Bildsensors höher sein als eine Empfindlichkeit des zweiten Bildsensors.

5

Gemäß einer weiteren Ausführungsform ist die Bildverarbeitungseinrichtung ausgebildet ist, eine erste Bildverarbeitung auf das erste Teilbild des ersten und des zweiten digitalen Bildes anzuwenden und eine zweite
10 Bildverarbeitung auf das zweite Teilbild des ersten und des zweiten digitalen Bildes anzuwenden, wobei sich die erste Bildverarbeitung von der zweiten Bildverarbeitung unterscheidet.

Die Bildverarbeitung kann beispielsweise eines oder eine
15 Kombination der folgenden Bildverarbeitungsroutinen umfassen: Zuordnung von Echtfarben zu Graustufen; Intensitätsanpassung; Kontrasteinstellung; Kantendetektion; Bildsegmentierung und/oder Mustererkennung.

20 Ausführungsformen stellen ein Verfahren zum Betreiben eines Mikroskopiesystems; bereit, umfassend: Erzeugen zumindest eines Bildes eines Objektes in einem Bereich einer Objektebene des Mikroskopiesystems in zumindest einer Bildebene des Mikroskopiesystems; Erzeugen zumindest eines ersten und eines
25 zweiten digitalen Bildes abhängig vom zumindest einen Bild in der Bildebene; Trennen des ersten digitalen Bildes in zumindest ein erstes Teilbild des ersten digitalen Bildes und ein zweites Teilbild des ersten digitalen Bildes abhängig von Pixeldatenwerten des ersten digitalen Bildes; Trennen des
30 zweiten digitalen Bildes in zumindest ein erstes Teilbild des zweiten digitalen Bildes und ein zweites Teilbild des zweiten digitalen Bildes abhängig von Pixeldatenwerten des zweiten digitalen Bildes; wobei das Trennen des ersten digitalen Bildes und das Trennen des zweiten digitalen Bildes so erfolgt, dass
35 das erste Teilbild des ersten digitalen Bildes und das erste Teilbild des zweiten digitalen Bildes einen gleichen Objektbereich des Objektes wiedergeben; Erzeugen eines weiteres digitales Bildes, abhängig vom ersten Teilbild des ersten digitalen Bildes und vom zweiten Teilbild des zweiten digitalen
40 Bildes.

durch die Hornhaut 2 und die natürliche Linse 7 auf einen Beleuchtungsfleck 5 auf der Retina 6 gebündelt. An diesem Beleuchtungsfleck 5 wird das einfallende Licht diffus gestreut, sodass reflektiertes Licht den Beleuchtungsfleck 5 in Form sphärischer (oder näherungsweise sphärischer) Wellenfronten 8 verlässt. Die sphärischen Wellenfronten 8 werden durch die natürliche Linse 7 und die Hornhaut 2 in ausgehendes Licht 9 umgewandelt, das wiederum näherungsweise aus ebenen Wellenfronten besteht. Das ausgehende Licht 9 hat eine Ausgangsrichtung, die entgegengesetzt zur Einfallsrichtung des einfallenden Lichts 10 ist. Dies ist durch entsprechende Pfeile in der Figur 1 angedeutet.

Insbesondere durch eine Fehlsichtigkeit des Auges 1 kann der Beleuchtungsfleck 5 auf der Retina vergrößert werden. Ebenso tritt Beugung an einer Iris 4 des Auges 1 auf. Dies kann zu Abweichungen der Wellenfronten des ausgehenden Lichts 9 von einer ebenen Wellenfront führen.

Der Rotlichtreflex kann bei einer mikroskopischen Untersuchung am Auge 1 dazu benutzt werden, um Objekte 13 im Vorderbereich des Auges 1 durch das an der Retina reflektierte Licht 8, 9 im Durchlicht zu beleuchten. Der Vorderbereich kann die Hornhaut 2, die vordere Augenkammer 11, die Linse 7 und die hintere Augenkammer 12 umfassen. Wird die Objektebene eines Mikroskops im Vorderbereich des Auges 1 angeordnet und wird die Beleuchtung des Mikroskops so konfiguriert, dass ein Rotlichtreflex erzeugt wird, so erscheinen die Objekte 13 in rötlichem Durchlicht. Somit ist es beispielsweise möglich, dass bei einer Kataraktoperation kleine Gewebereste im Kapselsack beobachtbar sind.

Figur 2a illustriert schematisch ein Mikroskopiesystem 100a gemäß einem Ausführungsbeispiel. Das Mikroskopiesystem 100a weist eine Beleuchtungsoptik 60a auf. Die Beleuchtungsoptik 60a weist mehrere Linsen 13a auf, sowie eine Objektivlinse 30a. Das Mikroskopiesystem weist ferner eine erste Lichtquelle 11a auf. Die erste Lichtquelle 11a weist einen Laser 15a und einen Lichtleiter 14a auf. Der Laser 15a erzeugt Licht, das optische Filter 16a durchsetzt und durch den Lichtleiter 14a zu einer

Austrittsfläche 12a der Lichtquelle 11a geführt wird. Durch die Filter 16a und den Lichtleiter 14a kann sich eine spektrale Intensitätsverteilung des Beleuchtungslichts, das auf eine Objektebene OP-A des Mikroskopiesystems 100a einfällt, von einer
5 spektralen Intensitätsverteilung des von dem Laser 15a erzeugten Lichts unterscheiden.

Die spektrale Intensitätsverteilung des Beleuchtungslichts in der Objektebene OP-A kann insbesondere an die
10 wellenlängenabhängige Reflexion der Retina 6 des Auges 1 angepasst werden. Die Retina 6 weist eine höhere Reflektivität auf insbesondere für Licht, das aus Wellenlängen aus einem Bereich von 580 Nanometer bis 800 Nanometer besteht, im Vergleich zu Licht das aus Wellenlängen besteht, die kürzer sind
15 als 580 Nanometer. Ferner weist die Retina 6 bis Wellenlängen von 1400 Nanometer eine messbare Reflektivität auf. Daher ist es möglich, auch Licht im nahinfraroten Wellenlängenbereich zur Detektion des Rotlichtreflexes zu verwenden.

Die Beleuchtungsoptik 60a weist ferner einen Strahlteiler 31a auf. Der Strahlteiler 31a ist auf einer der Objektebene OP-A abgewandten Seite der Objektivlinse 30a angeordnet. Der Strahlteiler 31a ist ausgebildet und angeordnet, sodass Lichtstrahlen 10a des Beleuchtungslichts die Objektivlinse 30a
25 durchsetzen und auf die Objektebene OP-A gelenkt werden.

Die Beleuchtungsoptik 60a ist so konfiguriert, dass Strahlenbündel, die von der Austrittsfläche 12a der Lichtquelle 11a ausgehen, auf die Retina 6 des Auges fokussiert werden. In
30 anderen Worten bilden eine Austrittsebene LSP-A, in der die Austrittsfläche 12a angeordnet ist, und die Retina 6 optisch konjugierte Ebenen. Wiederum in anderen Worten ist die Beleuchtungsoptik 60a so konfiguriert, dass bei Beleuchtung eines rechtsichtigen Auges 1 mit Beleuchtungslicht der
35 Lichtquelle 11a, das Beleuchtungslicht in der Objektebene OP-A näherungsweise ebene Wellenfronten aufweist. Wiederum in anderen Worten bildet die Beleuchtungsoptik 60a die Austrittsfläche 12a nach Unendlich ab.

Die nichtakkommodierte Linse 7 des rechtsichtige Auges 1 fokussiert die Lichtstrahlen 10a des einfallenden Beleuchtungslichts auf einen Beleuchtungsfleck 5a auf der Retina 6 des Auges 1. Wie mit Bezug auf Figur 1 beschrieben, wird das einfallende Beleuchtungslicht am Beleuchtungsfleck 5a diffus gestreut und durch die Linse 7 und die Hornhaut 2 in ausgehendes Licht umgeformt, das näherungsweise ebene Wellenfronten aufweist.

Das Mikroskopiesystem 100a weist ferner eine Abbildungsoptik 50a auf. Die Abbildungsoptik 50a bildet die Objektebene OP-A in die Bildebenen IP1-A und IP2-A ab. In anderen Worten bilden die Objektebene OP-A und die Bildebene IP1-A optische konjugierte Ebenen. Ferner bilden die Objektebene OP-A und die Bildebene IP2-A optisch konjugierte Ebenen. In der Bildebene IP1-A ist ein Bildsensor 34a in einer Kamera 39a angeordnet und in der Bildebene IP2-A ist der Bildsensor 38a in einer Kamera 42a angeordnet. Die Bildsensoren 34a, 38a können beispielsweise CCD-Bildsensoren sein. Die Abbildungsoptik 50a weist ferner einen Strahlteiler 43a auf, der ausgebildet ist, dass Licht 23a aus dem Abbildungsstrahlengang durch Reflexion am Strahlteiler 43a auskoppelbar ist. Das am Strahlteiler 43a reflektierte Licht wird über eine zweite Bildebenen-Fokussierungsoptik 37a auf die zweite Bildebene IP2-A abgebildet. Das durch den Strahlteiler transmittierte Licht wird über eine erste Bildebenen-Fokussierungsoptik 35a auf die erste Bildebene IP1-A abgebildet.

Alternativ oder zusätzlich zu den Bildsensoren 37a, 38a kann die Abbildungsoptik 50a Okulare aufweisen (nicht in Figur 2a dargestellt). Die Okulare können ausgebildet sein, dass für einen Betrachter das Bild in der Bildebene IP1-A oder in der Bildebene IP2-A betrachtbar ist.

Die Abbildungsoptik 50a weist die Objektivlinse 30a und den Strahlteiler 31a auf. Ferner weist die Abbildungsoptik 50a ein Zoomsystem 32a auf, das im Abbildungsstrahlengang zwischen dem Strahlteiler 31a und der Bildebene IP1-A, sowie zwischen dem Strahlteiler 31a und der Bildebene IP2-A angeordnet ist. Ferner weist die Abbildungsoptik 50a eine Fokussierungsoptik 36a auf, die ausgebildet ist, dass Strahlenbündel, die von der

Objektebene OP-A als paralleles Strahlenbündel entlang einer Achse OA-A des Beobachtungsstrahlengangs ausgehen, in einer Zwischenebene IMP-A in einem Punkt fokussiert werden. Die Zwischenebene IMP-A kann definiert werden als eine zur Retina-Ebene RP-A optisch konjugierte Ebene. In anderen Worten wird durch die Linse 7, die Hornhaut 2 und die Abbildungsoptik 50a die Retina-Ebene RP-A in die Zwischenebene IMP-A abgebildet.

In der Zwischenebene IMP-A ist ein Kontrastelement 33a angeordnet. Das Kontrastelement ist ausgebildet, dass es (a) in einem zentralen Bereich eines Querschnitts des Beobachtungsstrahlengangs innerhalb der Zwischenebene IMP-A Licht stärker absorbiert, als außerhalb des zentralen Bereichs; und/oder dass (b) Licht im zentralen Bereich innerhalb der Zwischenebene IMP-A eine Phasenverschiebung erfährt, die unterschiedlich ist zu einer Phasenverschiebung außerhalb des zentralen Bereiches innerhalb der Zwischenebene IMP-A.

Das Zoomsystem 32a kann ausgebildet sein, dass eine Vergrößerung des Zoomsystems 32a insbesondere über Steuersignale einer Steuereinrichtung (nicht illustriert) des Mikroskopiesystems 100a einstellbar ist. Durch eine Änderung einer Vergrößerung des Zoomsystems 32a kann sich eine Position der Zwischenebene IMP-A entlang der Achse OA-A des Beobachtungsstrahlengangs ändern. Das Mikroskopiesystem 100a ist so ausgebildet, dass eine Position des Kontrastelements 33a entlang der Achse OA-A des Beobachtungsstrahlengangs synchron mit einer Einstellung der Vergrößerung verstellbar ist. Die Steuereinrichtung steht in Signalverbindung mit einem Aktuator (nicht in Figur 2a dargestellt), der am Kontrastelement 33a befestigt ist. Durch Steuersignale über die Signalverbindung ist die Position des Kontrastelements 33a entlang der Achse OA-A des Beobachtungsstrahlengangs einstellbar. Die Steuersignale können abhängig von der Einstellung der Vergrößerung des Zoomsystems 32a sein, sodass eine zeitlich synchrone Änderung der Position des Kontrastelements 33a mit der Änderung der Vergrößerung des Zoomsystems 32a vornehmbar ist. Das Zoomsystem 32a kann ausgebildet sein, dass diskrete Vergrößerungen einstellbar sind.

Der zentrale Bereich innerhalb der Zwischenebene IMP-A kann die Achse OA-A des Beobachtungsstrahlengangs abdecken. Der zentrale Bereich kann so angeordnet sein, dass Strahlenbündel 21A, welche die Objektebene OP-A in Form von ebenen Wellenfronten in einer Richtung verlassen, welche einen Winkel zur Achse OA-A aufweisen, der geringer als ein Mindeststreuwinkel ist, auf den zentralen Bereich abgebildet werden.

Durch die Verwendung eines Lichtwellenleiters wird ein kleiner Durchmesser der Austrittsfläche 12a und ein geringer Öffnungswinkel des Beleuchtungsstrahlengangs erreicht, wodurch ein kleiner Beleuchtungsfleck 5a auf der Retina 6 des Auges 1 bei genügend hoher Leistung der Beleuchtungslichts erreicht werden kann.

Die Beleuchtungsoptik 60a kann ausgebildet sein, dass in einer Zwischenebene des Beleuchtungsstrahlengangs ein verkleinertes Bild der Austrittsfläche 12a erzeugt wird. In diesem Fall ist das verkleinerte Bild der minimale Querschnitt des Beleuchtungsstrahlengangs.

Alternativ kann die Lichtquelle 11a so konfiguriert sein, dass Licht eines Lasers auf die Linsen 13a gelenkt wird, ohne dass das Licht des Lasers durch einen Lichtleiter oder Lichtwellenleiter geführt wird. An einer Austrittsfläche des Lasers kann der Laserlichtstrahl einen geringsten Strahldurchmesser aufweisen. In anderen Worten kann der Laserstrahl von der Austrittsfläche des Lasers bis zur Objektebene divergieren. In diesem Fall ist auf der Austrittsfläche des Lasers der minimale Querschnitt des Laserstrahls. Alternativ kann die Beleuchtungsoptik konfiguriert so sein, dass ein Fokuspunkt des Laserstrahls erzeugt wird, wobei der Fokus einen geringeren Strahldurchmesser aufweist. Die Strahltaile am Fokuspunkt des Lasers kann dann der minimale Querschnitt des Beleuchtungsstrahlengangs sein.

Durch den erzeugten Beleuchtungsfleck 5a auf der Retina 6 des Auges 1, der einen geringen Durchmesser aufweist, wird eine präzise Ausblendung oder Phasenverschiebung der ungestreuten Lichtstrahlen in der Zwischenebene IMP-A möglich. Dadurch ist

eine präzise Messung von Objekten möglich, selbst wenn diese Objekte die Lichtstrahlen nur in kleinen Winkeln streuen. In anderen Worten wird durch das Mikroskopsystem 100a eine Abbildung mit kleinen Mindeststreuwinkeln ermöglicht.

5

Die erste Lichtquelle 11a ist so konfiguriert, dass 80 % der spektralen Intensitätsverteilung von Licht, das von der Lichtquelle 11a emittiert wird, in einem Wellenlängenbereich zwischen 580 Nanometer und 1400 Nanometer oder zwischen 650 Nanometer und 1400 Nanometer liegt oder zwischen 700 Nanometer und 1400 Nanometer liegt, oder zwischen 580 Nanometer und 900 Nanometer liegt.

Insbesondere im Wellenlängenbereich zwischen 580 und 800 Nanometer hat die Retina 6 eine höhere Reflektivität als bei Wellenlängen, die kürzer als 580 Nanometer sind. Daher kann insbesondere mit Wellenlängen im Bereich zwischen 580 Nanometer und 800 Nanometer ein Rotlichtreflex genügender Stärke mit vergleichsweise geringer Intensität des Beleuchtungslichts erreicht werden. Dadurch kann insbesondere bei der Erzeugung eines vergleichsweise kleinen Beleuchtungsflecks 5a auf der Retina 6 eine Schädigung der Retina 6 durch die eingestrahelte Lichtintensität vermieden werden.

Ferner weist die Beleuchtungsoptik 60a eine Umgebungs-Beleuchtungsoptik auf. Die Umgebungs-Beleuchtungsoptik weist eine weitere Lichtquelle 17a, zumindest eine Linse 18a, einen Reflektor 19a und eine Retina-Schutzblende 40a auf. Die Umgebungs-Beleuchtungsoptik ist ausgebildet, die Umgebung einer Pupille des Auges 1 zu beleuchten.

Die Retina-Schutzblende 40a kann so konfiguriert sein, dass kein oder nur ein geringer Anteil der Lichtintensität des Lichts, das von der Umgebungs-Beleuchtungsoptik auf das Auge 1 gelenkt wird, auf die Retina auftrifft. Der geringe Anteil kann beispielsweise weniger als 20 % oder weniger als 10 % betragen. Das Licht der Umgebungs-Beleuchtungsoptik erzeugt daher keinen oder nur einen schwachen Rotlichtreflex.

Bei Beleuchtung der Objektebene OP-A mit Beleuchtungslicht aus der ersten Lichtquelle 11a wird ein Bild mit dem ersten Bildsensor 34a aufgenommen. Zu diesem Zeitpunkt kann die weitere Lichtquelle 17a deaktiviert sein oder das Umgebungs-
5 Beleuchtungslicht durch eine nicht illustrierte Blende ausgeblendet sein.

Bei Beleuchtung der Objektebene OP-A mit dem Beleuchtungslicht der weiteren Lichtquelle 17a wird ein Bild mit dem zweiten
10 Bildsensor 38a aufgenommen. Zu diesem Zeitpunkt kann die erste Lichtquelle 11a deaktiviert sein oder das Beleuchtungslicht der ersten Lichtquelle 11a durch eine nicht illustrierte Blende ausgeblendet sein. Es ist aber auch denkbar, dass die Aufnahmen mit dem ersten Bildsensor 34a und mit dem zweiten Bildsensor 38a
15 bei simultaner Beleuchtung mit der ersten Lichtquelle 11a und der weiteren Lichtquelle 17a erfolgen.

Der erste Bildsensor 34a kann auf eine spektrale Intensitätsverteilung des von der ersten Lichtquelle 11a erzeugten und auf die Objektebene OP-A eintreffenden
20 Beleuchtungslichts optimiert sein. Entsprechend kann der zweite Bildsensor 38a auf eine spektrale Intensitätsverteilung des von der weiteren Lichtquelle 17a erzeugten und auf die Objektebene OP-A eintreffenden Beleuchtungslichts optimiert sein.

25
Dadurch ist es möglich, Sensordaten des ersten Bildsensors 34a mit Sensordaten des zweiten Bildsensors 38a zu kombinieren. Dadurch kann beispielsweise dem Betrachter ein genügend gutes Bild bereitgestellt werden, dass sowohl Objekte wiedergibt, die durch den Rotlichtreflex im Durchlicht beleuchtet werden, als
30 auch die Umgebung der Pupille, die durch die Umgebungsbeleuchtung im Auflicht beleuchtet wird.

Figur 2b zeigt schematisch den Lichtwellenleiter 14a des in
35 Figur 2a gezeigten Mikroskopiesystems 100a. Der Lichtwellenleiter 14a weist eine Austrittsfläche 12a, einen Kern 14a-2 und einen Mantel 14a-1 auf. Der Querschnitt des Kerns senkrecht zur Achse OA-I des Beleuchtungsstrahlengangs bildet die Austrittsfläche 12a. Die Austrittsfläche 12a weist einen
40 Durchmesser D auf. In dem in Figur Von einem Punkt P auf der

Achse OA-I des Beleuchtungsstrahlenganges gehen Lichtstrahlen aus, die einen maximalen Winkel α bilden. Der maximale Winkel α ist der Öffnungswinkel des Strahlengangs an der Austrittsfläche 12a. Der Wert

5

$$\sin(\alpha/2)$$

kann einer numerischen Apertur des Lichtwellenleiters 14a entsprechen. Alternativ oder zusätzlich kann der Öffnungswinkel α auch durch eine Eintrittspupille 62a der Beleuchtungsoptik begrenzt sein.

Figur 2c zeigt einen minimalen Querschnitt, der durch eine Taille eines Laserstrahls gebildet wird. Die Taille weist einen Durchmesser D auf, der den Durchmesser des minimalen Querschnitt repräsentiert. Der Öffnungswinkel α wird in diesem Fall durch Tangenten an den Strahlverlauf des Fernfeldes bestimmt.

Figur 2d ist eine schematische Darstellung eines Stereo-Mikroskopiesystems 100b, das - in analoger Weise, wie das in Figur 2A dargestellte Mikroskopiesystem 100a - ausgebildet ist, mikroskopische Aufnahmen vom Vorderbereich des Auges 1 zu erzeugen. Das Stereo-Mikroskopiesystem 100b weist Komponenten auf, die zu Komponenten des Mikroskopiesystems 100a analog sind. Daher sind diese Komponenten mit ähnlichen Bezugszeichen versehen, die jedoch das Begleitzeichen b für einen ersten Beleuchtungs- bzw. Abbildungsstrahlengang und das Begleitzeichen b' für einen zweiten Beleuchtungs- bzw. Abbildungsstrahlengang aufweisen. Das Stereo-Mikroskopiesystem 100b weist eine Umgebungs-Beleuchtungsoptik auf, die wie in dem Mikroskopiesystem 100a ausgebildet ist, die jedoch zur Vereinfachung der Darstellung in der Figur 2d nicht illustriert ist.

Das Stereo-Mikroskopiesystem 100b weist eine Abbildungsoptik auf, die eine erste und eine zweite optische Achse OA-B, OA-B' für einen ersten und einen zweiten Beobachtungsstrahlengang aufweist. In der Objektebene OP-B bilden die optischen Achsen OA-B und OA-B' der beiden Beobachtungsstrahlengänge einen Stereowinkel θ

40

Das Stereo-Mikroskopiesystem 100b weist eine Objektivlinse 30b auf, die von beiden Beobachtungsstrahlengängen durchsetzt wird. Des Weiteren weist das Stereo-Mikroskopiesystem 100b eine Beleuchtungsoptik auf, die ausgelegt ist, zwei Beleuchtungsstrahlengänge 10b, 10b' bereitzustellen. Die Beleuchtungsoptik ist so konfiguriert, dass Lichtstrahlen des Beleuchtungsstrahlenganges 10b in der Objektebene OP-B koaxial zu einer Achse OA-B des ersten Beobachtungsstrahlenganges ausgerichtet sind. Ferner ist die Beleuchtungsoptik so konfiguriert, dass Lichtstrahlen des Beleuchtungsstrahlenganges 10b' in der Objektebene OP-B koaxial zur Achse des zweiten Beobachtungsstrahlenganges OA-B' ausgerichtet sind. Die Strahlengänge 10b, 10b' bilden in der Objektebene OP-B jeweils parallele oder im Wesentlichen parallele Strahlenbündel, die aus ebenen Wellenfronten, oder näherungsweise ebenen Wellenfronten, bestehen. Die Strahlenbündel der Beleuchtungsstrahlengänge 10b und 10b' durchsetzen die Hornhaut 2 und die natürliche Linse 7 und werden auf die jeweiligen Beleuchtungsflecke 5b und 5b' auf der Retina fokussiert. An jedem der Beleuchtungsflecke 5b und 5b' wird das Beleuchtungslicht diffus reflektiert und geht von jedem der Beleuchtungsflecke 5b und 5b' als näherungsweise sphärische Wellenfunktion aus.

Sind ein erstes und ein zweites Kontrastelement 33b, 33b' außerhalb des ersten und zweiten Beobachtungsstrahlenganges angeordnet, so sind die Objekte in der Objektebene OP-B im Amplitudenkontrast im Durchlicht des Rotlichtreflexes beobachtbar. Daher ist das Mikroskopiesystem im Hellfeld-Betriebsmodus. Durch die geringen Durchmesser der Beleuchtungsflecke 5b, 5b' auf der Retina wird ein erhöhter Kontrast im Hellfeld-Betriebsmodus erhalten.

Sind das erste und das zweite Kontrastelement 33b, 33b' in der ersten und zweiten Zwischenebene angeordnet, so ist das Mikroskop im Dunkelfeld, oder im Phasenkontrastmodus. Durch die geringen Durchmesser der Beleuchtungsflecke 5b, 5b' auf der Retina ist es in diesen Abbildungsmodi möglich, auch Objekte zu detektieren, die nur in kleine Winkel streuen oder nur eine

geringe Phasenverschiebung am Durchlicht des Rotlichtreflexes erzeugen.

Strahlenbündel des am Beleuchtungsfleck 5b reflektierten Lichts, welche die Objektebene OP-B ungestreut in Form ebener Wellenfronten oder in Form näherungsweise ebener Wellenfronten verlassen, werden auf einen ersten zentralen Bereich abgebildet, der durch das erste Kontrastelement 33b im ersten Beobachtungsstrahlengang definiert wird. Entsprechend werden Strahlenbündel des am Beleuchtungsfleck 5b' gestreuten Lichts, welche die Objektebene OP-B ungestreut in Form ebener Wellenfronten oder in Form näherungsweise ebener Wellenfronten verlassen, auf einen zweiten zentralen Bereich abgebildet, der durch das zweite Kontrastelement 33b' im zweiten Beobachtungsstrahlengang definiert wird.

Für den ersten Abbildungsstrahlengang 20b des Stereo-Mikroskopiesystems 100b weist das Stereo-Mikroskopiesystem 100b einen ersten Bildsensor 34b und einen zweiten Bildsensor 38b auf. Entsprechend weist das Stereo-Mikroskopiesystem 100b für den zweiten Strahlengang 10b' einen dritten Bildsensor 34b' und einen vierten Bildsensor 38b' auf.

Das Stereo-Mikroskopiesystem 100b kann so ausgebildet sein, dass die Beleuchtungsstrahlengänge 10b und 10b' alternierend aktiviert werden. In diesem Fall kann Licht des ersten Abbildungsstrahlengangs 20b und des zweiten Abbildungsstrahlengangs 20b' nach dem Durchsetzen einer gemeinsamen Abbildungsoptik (nicht illustriert) auf einen gemeinsamen Bildsensor (nicht illustriert) gelenkt werden. Der gemeinsame Bildsensor erzeugt dann alternierend Bilder durch Lichtstrahlen des ersten Abbildungsstrahlengangs 20b und durch Lichtstrahlen des zweiten Abbildungsstrahlengangs 20b'.

Alternativ zu den Lichtquellen 11b und 11b' kann das Stereo-Mikroskopiesystem 100b eine gemeinsame Lichtquelle (nicht illustriert) aufweisen. Das von der gemeinsamen Lichtquelle emittierte Licht kann über Umlenkelemente in die Beleuchtungsstrahlengänge 10b und 10b' eingekoppelt werden. Die Lichtquellen 11b und 11b' können einen gemeinsamen Laser und

einen gemeinsamen faseroptischen Strahlkoppler aufweisen, wobei Licht des gemeinsamen Lasers oder einer gemeinsamen Halogenlampe oder einer gemeinsamen Xenonlampe in einen ersten Lichtleiter der Lichtquelle 11b und einen zweiten Lichtleiter der Lichtquelle 11b' eingekoppelt wird.

Figur 3 zeigt exemplarisch eine spektrale Intensitätsverteilung der Lichtquellen 11a, 11b und/oder 11b' wie sie in den in den Mikroskopiesystemen 100a bzw. 100b (Figuren 2a und 2d) verwendet werden. Die spektrale Intensitätsverteilung 310 weist eine Untergrenze bei einer Wellenlänge A und eine Obergrenze bei der Wellenlänge B auf. Ein Integral über die gesamte spektrale Intensitätsverteilung 310 ergibt die gesamte Lichtintensität der Lichtquelle. Ein Integral zwischen den Wellenlängen A und B ergibt denjenigen Intensitätsanteil, der aus Wellenlängen aus einem Bereich zwischen A und B besteht. Dieser Intensitätsanteil entspricht dem in der Figur 3 schraffierten Bereich 300 und ergibt sich durch ein Integral der spektralen Intensitätsverteilung 310 von A bis B. Die Werte A und B repräsentieren einen Wellenlängenbereich. Dieser Wellenlängenbereich kann beispielsweise von 580 Nanometer bis 1400 Nanometer reichen.

Figur 4 zeigt exemplarisch ein erstes Teilbild 41 eines ersten digitalen Bildes, das durch das Trennen eines ersten digitalen Bildes in ein erstes Teilbild 41 und ein zweites Teilbild erhalten wurde. Das erste digitale Bild wurde abhängig von Sensordaten des in der Figur 2a dargestellten Bildsensors 34a oder von einem oder beiden der in der Figur 2d dargestellten Bildsensoren 34b und 34b' erzeugt.

Durch das Trennen wurde der Bereich des ersten digitalen Bildes identifiziert, der die Pupille des Auges wiedergibt. Das erste Teilbild 41 des ersten digitalen Bildes gibt daher die Pupille des Auges wieder.

Beim Erzeugen der Sensordaten, aus denen das erste digitale Bild erzeugt wurde, wurde die Objektebene OP-A (gezeigt in der Figur 2a) mit der ersten Lichtquelle 11a beleuchtet. Der Beleuchtungsstrahlengang, der das Beleuchtungslicht der ersten

Lichtquelle 11a auf die Oberfläche lenkt, ist so ausgebildet, dass durch eine Reflexion an der Retina ein Rotlichtreflex entsteht, der den Vorderbereich des Auges 1 mit Durchlicht beleuchtet und der mit der Abbildungsoptik 50a beobachtbar ist.

5 Die erste Lichtquelle 11a beleuchtet die Objektebene OP-A mit Licht, das zumindest teilweise in einem Wellenlängenbereich von 700 Nanometer bis 1.400 Nanometer, also im nahinfraroten Wellenbereich liegt. Der Bildsensor 34a gibt von der detektierten Lichtintensität in diesem Wellenlängenbereich ein
10 Graustufenbild aus. Daher stellt das erste Teilbild 41 ein Graustufenbild dar. Das Graustufenbild 41 wird in ein Echtfarbenbild 42 umgewandelt, wobei die Grautöne in Rottöne umgewandelt werden, um einen realistischen Seheindruck zu erreichen.

15
Figur 4 zeigt ferner ein zweites Teilbild 43, das durch das Trennen eines zweiten digitalen Bildes in ein erstes Teilbild des zweiten digitalen Bildes und ein zweites Teilbild 43 des zweiten digitalen Bildes gewonnen wurde. Wie beim ersten Bild
20 erfolgte das Trennen dadurch, dass der Bereich der Pupille im zweiten digitalen Bild identifiziert wurde, wobei das erste Teilbild des zweiten Bildes die Pupille wiedergibt. Das zweite Teilbild 43 des zweiten Bildes gibt daher die Umgebung der Pupille wieder.

25
Beim Erzeugen der Sensordaten für das zweiten digitale Bild wurde die in der Figur 2a dargestellte Objektebene OP-A mit der weiteren Lichtquelle 17a beleuchtet, wobei die Retina-Schutzblende 40a im Strahlengang der Umgebungs-Beleuchtungsoptik
30 angeordnet wurde. Das zweite digitale Bild wurde mit dem Bildsensor 38a, wie in Figur 2a dargestellt, aufgenommen.

Das Trennen beim ersten digitalen Bild und beim zweiten digitalen Bild erfolgt dadurch, dass im jeweiligen digitalen
35 Bild der Rotlichtreflex lokalisiert wird, der den Bereich der Pupille mit Durchlicht beleuchtet. Um in den jeweiligen digitalen Bildern den Rotreflex zu lokalisieren kann folgendes Verfahren angewendet werden:

Zunächst werden die Pixel des digitalen Bildes markiert, welche eine geeignete Farbbedingung oder Graustufenbedingungen erfüllen. Beispielsweise kann sich im ersten digitalen Bild der Rotreflex von der Umgebung durch seine höhere Intensität abheben. Dies kann beispielsweise dadurch erfolgen, dass ein Bildsensor mit einer hohen Empfindlichkeit im roten und/oder infraroten Wellenlängenbereich verwendet wird. In diesen Wellenlängenbereichen weist der Rotlichtreflex eine höhere Intensität auf als die Umgebung.

Durch die Markierung werden auch Pixel markiert, welche nicht innerhalb der Pupille angeordnet sind und damit nicht zum Rotlichtreflex beitragen. Beispielsweise können außerhalb der Pupille angeordnete Blutgefäße und dergleichen ebenfalls die Farbbedingung oder Graustufenbedingung erfüllen. Andererseits kann es auch sein, dass innerhalb der Pupille angeordnete Pixel, welche in einem Bereich des Rotlichtreflexes liegen, die Farbbedingung nicht erfüllen. Es kann nun so vorgegangen werden, dass das Bild mit den darin vorgenommenen Markierungen einem Algorithmus unterzogen wird, welcher Bereiche mit markierten Pixel zusammenwachsen lässt, beispielsweise derart, dass ein unmarkiertes Pixel, welches zwischen zwei benachbarten markierten Pixel angeordnet ist, ebenfalls markiert wird. Genauso können unmarkierte Pixel, welche zwischen zwei mit Abstand von diesen angeordneten Pixel angeordnet sind, ebenfalls markiert werden. Dieser Vorgang kann gegebenenfalls mehrmals wiederholt werden. Es vergrößern sich durch diese Behandlung die zusammenhängenden markierten Bereiche in dem digitalen Bild.

Nachfolgend kann durch einen weiteren Algorithmus der größte zusammenhängende markierte Bereich in dem digitalen Bild ermittelt werden, und es können dann diejenigen zusammenhängenden Bereiche, welche nicht mit dem größten zusammenhängenden Bereich verbunden sind, gelöscht werden, das heißt die Markierungen dieser Pixel werden aufgehoben. Es verbleibt dann ein zusammenhängender markierter Bereich des digitalen Bildes, welcher mit einer ausgesprochen guten Wahrscheinlichkeit dem Rotlichtreflex zuordenbar ist. In anderen Worten repräsentiert der zusammenhängende markierte Bereich den

Bereich des Auges, der durch das an der Retina gestreute Licht in Durchlichtbeleuchtung erscheint.

Die Gestalt dieses zusammenhängenden Bereiches kann dann von der
5 Bildverarbeitungseinrichtung analysiert werden, und die
Bildverarbeitungseinrichtung kann dann weiterhin auf Parameter
der Hintergrund-Beleuchtungseinrichtung einwirken, um die
Gestalt des zusammenhängenden Bereiches hin zu einer Kreisfläche
ähnlichen Gestalt zu optimieren.

10 Das in Echtfarben umgewandelte erste Teilbild 42 und das zweite
Teilbild 43 werden zu einem zusammengesetzten digitalen Bild 47
zusammengefügt. Das zusammengesetzte digitale Bild 47 besteht
somit aus einem ersten Bereich 45, der vom ersten Teilbild 41
15 des ersten digitalen Bildes gewonnen wurde und von einem zweiten
Bereich 46, der vom zweiten Teilbild 43 des zweiten digitalen
Bildes gewonnen wurde. Auf das erste Teilbild 41 und auf das
zweite Teilbild 43 wurden unterschiedliche Prozesse der
Bildverarbeitung angewendet, wie Echtfarbenzuordnung,
20 Intensitätsverstärkung oder -schwächung.

Das zusammengesetzte digitale Bild 47 wird dem Betrachter auf
einem Monitor (nicht illustriert) angezeigt. Im Falle des in
Figur 2d dargestellten Stereo-Mikroskopiesystems 100b wird für
25 den ersten Abbildungsstrahlengang 20b und den zweiten
Abbildungsstrahlengang 20b' jeweils ein zusammengesetztes
digitales Bild erzeugt. Die beiden zusammengesetzten digitalen
Bilder können dem Betrachter in einem Head-Mounted Display
(nicht illustriert) angezeigt werden. Dadurch erhält der
30 Betrachter einen stereoskopischen Eindruck von dem Vorderbereich
des Auges.

Patentansprüche

5

1. Mikroskopiesystem (100b) zur Augenuntersuchung, aufweisend:

10 eine Abbildungsoptik zur Erzeugung eines ersten Bildes in einer ersten Bildebene (IP-1B) der Abbildungsoptik von einem Bereich einer Objektebene (OP-B) der Abbildungsoptik durch einen ersten Beobachtungsstrahlengang der Abbildungsoptik; und eines zweiten Bildes in einer zweiten Bildebene (IP1-B') der Abbildungsoptik von dem Bereich durch einen zweiten Beobachtungsstrahlengang der Abbildungsoptik;

15

wobei die Abbildungsoptik so ausgebildet ist, dass eine Achse (OA-B) des ersten Beobachtungsstrahlenganges und eine Achse (OA-B') des zweiten Beobachtungsstrahlenganges in der Objektebene (OP-B) einen Stereowinkel (θ) bilden;

20

eine oder mehrere Lichtquellen (11b, 11b') zur Erzeugung von Beleuchtungslicht;

25 eine Beleuchtungsoptik, die ausgebildet ist, einen ersten Beleuchtungsstrahlengang der Beleuchtungsoptik zu erzeugen, um einen ersten Teil des Beleuchtungslichts auf die Objektebene (OP-B) zu lenken, und einen zweiten Beleuchtungsstrahlengang der Beleuchtungsoptik zu erzeugen, um einen zweiten Teil des Beleuchtungslichts auf die

30 Objektebene (OP-B) zu lenken;

wobei die Beleuchtungsoptik ferner ausgebildet ist, dass für den ersten und den zweiten Beleuchtungsstrahlengang jeweils gilt:

35

$$D \cdot \sin(\alpha) < M ;$$

wobei D ein Durchmesser eines minimalen Querschnitts des jeweiligen Beleuchtungsstrahlengangs ist; und α ein Öffnungswinkel des jeweiligen Beleuchtungsstrahlengangs an einer Position des minimalen Querschnitts ist;

40

wobei für den ersten und/oder den zweiten Beleuchtungsstrahlengang M einen Wert von 0,9 Millimeter aufweist, oder einen Wert von 10 Mikrometer aufweist, oder einen Wert von 5 Mikrometer aufweist, oder einen Wert von 2 Mikrometer aufweist.

2. Mikroskopiesystem (100a; 100b) nach Anspruch 1, wobei ferner gilt:

$$D \leq L;$$

wobei L einen Wert von 1,5 Millimeter aufweist, oder einen Wert von 1 Millimeter aufweist, oder einen Wert von 0,5 Millimeter aufweist, oder einen Wert von 0,1 Millimeter aufweist.

3. Mikroskopiesystem (100a; 100b) nach Anspruch 1, wobei ferner gilt:

$$D \leq L;$$

wobei L einen Wert von 50 Mikrometer aufweist.

4. Mikroskopiesystem (100a; 100b) nach Anspruch 1, wobei ferner gilt:

$$D \leq L;$$

wobei L einen Wert von 10 Mikrometer aufweist, oder einen Wert von 5 Mikrometer aufweist.

5. Mikroskopiesystem (100a; 100b) nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei ferner gilt:

$$\alpha \leq p;$$

wobei p einen Wert von 45 Grad aufweist, oder einen Wert von 30 Grad aufweist.

6. Mikroskopiesystem (100a; 100b) nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei ferner gilt:

5
$$\alpha \leq p;$$

wobei p einen Wert von 20 Grad aufweist, oder einen Wert von 15 Grad aufweist.

- 10 7. Mikroskopiesystem (100a; 100b) nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Lichtquelle einen Monomode-Lichtwellenleiter aufweist.

- 15 8. Mikroskopiesystem nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Achse (OA-B) des ersten Beobachtungsstrahlengangs zu einer Achse des ersten Beleuchtungsstrahlengangs einen Winkel in der Objektebene aufweist, der geringer ist als 6 Grad; und/oder

20 wobei die Achse des zweiten Beobachtungsstrahlengangs (OA-B') zu einer Achse des zweiten Beleuchtungsstrahlengangs einen Winkel in der Objektebene aufweist, der geringer ist als 6 Grad.

- 25 9. Mikroskopiesystem nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Abbildungsoptik aufweist:

30 ein erstes Kontrastelement (33b), das in einer ersten Zwischenebene (IMP-B) der Abbildungsoptik angeordnet ist, wobei die erste Zwischenebene zwischen der Objektebene und der ersten Bildebene angeordnet ist;

35 ein zweites Kontrastelement (33b'), das in der zweiten Zwischenebene (IMP-B') der Abbildungsoptik angeordnet ist, wobei die zweite Zwischenebene (IMP-B') zwischen der Objektebene (IP-B) und der zweiten Bildebene (IMP-B') angeordnet ist,

40 wobei das erste und das zweite Kontrastelement (33b, 33b') so ausgebildet sind, dass Licht eines ersten zentralen

Bereiches eines Querschnitts des ersten Beobachtungsstrahlengangs in der ersten Zwischenebene (IMP-B), und/oder Licht eines zweiten zentralen Bereiches eines Querschnitts des zweiten Beobachtungsstrahlengangs in der zweiten Zwischenebene (IMP-B')

a) stärker absorbiert wird als außerhalb des jeweiligen zentralen Bereiches in der jeweiligen Zwischenebene; und/oder

b) eine Phasenverschiebung erfährt, die unterschiedlich ist zu einer Phasenverschiebung in der jeweiligen Zwischenebene außerhalb des jeweiligen zentralen Bereiches.

10. Mikroskopiesystem (100a; 100b) nach Anspruch 9, wobei die Abbildungsoptik ferner aufweist

eine Objektivlinse (30a, 30b) die im ersten Beobachtungsstrahlengang zwischen der Objektebene (OP-A; OP-B) und der ersten Zwischenebene (IP1-A; IP1-B) angeordnet ist, und

ein erstes Zoomsystem (32a; 32b), das im ersten Beobachtungsstrahlengang zwischen der Objektivlinse (30a, 30b) und der ersten Zwischenebene (IP1-A; IP1-B) angeordnet ist; und

eine Steuereinheit, die ausgebildet ist, eine Änderung einer Position des ersten Kontrastelements entlang der Achse (OA-A; OA-B) des ersten Beobachtungsstrahlengangs synchron mit einer Änderung einer Vergrößerung des ersten Zoomsystems (32a; 32b) zu steuern.

11. Mikroskopiesystem (100a) zur Augenuntersuchung, aufweisend:

eine Abbildungsoptik (50a), die ausgebildet ist, einen ersten Beobachtungsstrahlengang der Abbildungsoptik (50a) zu erzeugen, um ein erstes Bild eines Bereiches einer

Objektebene (OP-A) der Abbildungsoptik (50a) in einer ersten Bildebene der Abbildungsoptik (50a) zu erzeugen,

wobei die Abbildungsoptik (50a) ein erstes Kontrastelement (33a) aufweist, das in einer ersten Zwischenebene (IMP-A) der Abbildungsoptik (50a) angeordnet ist, wobei die erste Zwischenebene (IMP-A) zwischen der Objektebene (OP-A) und der ersten Bildebene (IP1-A) angeordnet ist;

wobei das erste Kontrastelement (33a) so ausgebildet ist, dass Licht, welches auf einen ersten zentralen Bereich eines Querschnitts des ersten Beobachtungsstrahlengangs innerhalb der ersten Zwischenebene (IMP-A) auftrifft

a) stärker absorbiert wird als in der ersten Zwischenebene (IMP-A) außerhalb des ersten zentralen Bereiches; und/oder

b) eine Phasenverschiebung erfährt, die unterschiedlich ist zu einer Phasenverschiebung in der ersten Zwischenebene (IMP-A) außerhalb des ersten zentralen Bereiches;

wobei das Mikroskopiesystem (100a) ferner aufweist:

eine Lichtquelle (11a) zur Erzeugung von Beleuchtungslicht;

eine erste Beleuchtungsoptik (60a), die ausgebildet ist, einen ersten Beleuchtungsstrahlengang der Beleuchtungsoptik zu erzeugen, der zumindest einen Teil des Beleuchtungslichts auf die Objektebene (OP-A) lenkt;

wobei die Beleuchtungsoptik (60a) ausgebildet ist, dass für den ersten Beleuchtungsstrahlengang gilt:

$$D \cdot \sin(\alpha) < M ;$$

wobei D ein Durchmesser eines minimalen Querschnitts des ersten Beleuchtungsstrahlengangs ist und α ein Öffnungswinkel des ersten Beleuchtungsstrahlenganges an einer Position des minimalen Querschnitts ist,

wobei M einen Wert von 0,9 Millimeter aufweist, oder einen Wert von 0,5 Millimeter aufweist, oder einen Wert von 0,1 Millimeter aufweist oder einen Wert von 50 Mikrometer aufweist.

12. Mikroskopiesystem nach Anspruch 11, wobei M einen Wert von 10 Mikrometer aufweist, oder einen Wert von 5 Mikrometer aufweist, oder einen Wert von 2 Mikrometer aufweist.

13. Mikroskopiesystem (100a; 100b) nach Anspruch 11 oder 12, wobei ferner gilt:

$$D \leq L;$$

wobei L einen Wert von 1,5 Millimeter aufweist, oder einen Wert von 1 Millimeter aufweist, oder einen Wert von 0,5 Millimeter aufweist, oder einen Wert von 0,1 Millimeter aufweist.

14. Mikroskopiesystem (100a; 100b) nach Anspruch 11 oder 12, wobei ferner gilt:

$$D \leq L;$$

wobei L einen Wert von 50 Mikrometer aufweist.

15. Mikroskopiesystem (100a; 100b) nach Anspruch 11 oder 12, wobei ferner gilt:

$$D \leq L;$$

wobei L einen Wert von 10 Mikrometer aufweist, oder einen Wert von 5 Mikrometer aufweist.

16. Mikroskopiesystem (100a; 100b) nach einem der Ansprüche 11 bis 15, wobei ferner gilt:

$$\alpha \leq p;$$

wobei p einen Wert von 45 Grad aufweist, oder einen Wert von 30 Grad aufweist.

17. Mikroskopiesystem (100a; 100b) nach einem der Ansprüche 11 bis 15, wobei ferner gilt:

$$\alpha \leq p;$$

wobei p einen Wert von 20 Grad aufweist, oder einen Wert von 15 Grad aufweist.

18. Mikroskopiesystem (100a; 100b) nach einem der Ansprüche 11 bis 17, wobei die Lichtquelle einen Monomode-Lichtwellenleiter aufweist.

19. Mikroskopiesystem (100a) nach einem der Ansprüche 11 bis 18, wobei das Mikroskopiesystem (100a) ausgebildet ist, dass eine Achse (OA-A) des ersten Beobachtungsstrahlengangs, zu einer Achse des ersten Beleuchtungsstrahlengangs einen Winkel in der Objektebene (OP-A) aufweist, der geringer ist als 6 Grad.

20. Mikroskopiesystem (100a; 100b) nach einem der Ansprüche 11 bis 19, wobei die Abbildungsoptik ferner aufweist

eine Objektivlinse (30a, 30b) die im ersten Beobachtungsstrahlengang zwischen der Objektebene (OP-A; OP-B) und der ersten Zwischenebene (IP1-A; IP1-B) angeordnet ist, und

ein erstes Zoomsystem (32a; 32b), das im ersten Beobachtungsstrahlengang zwischen der Objektivlinse (30a, 30b) und der ersten Zwischenebene (IP1-A; IP1-B) angeordnet ist; und

eine Steuereinheit, die ausgebildet ist, eine Änderung einer Position des ersten Kontrastelements entlang der Achse (OA-A; OA-B) des ersten Beobachtungsstrahlengangs synchron mit einer Änderung einer Vergrößerung des ersten Zoomsystems (32a; 32b) zu steuern.

21. Mikroskopiesystem (100a; 100b) nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Beleuchtungsoptik ausgebildet ist, dass
mehr als 50 %, insbesondere mehr als 80 % einer spektralen
5 Intensitätsverteilung des Beleuchtungslichts, die von dem
ersten und/oder dem zweiten Beleuchtungsstrahlengang auf die
Objektebene (OP-A; OP-B) gelenkt werden, in der Objektebene
(OP-A; OP-B) in einem Wellenlängenbereich zwischen 580 nm
und 1400 nm liegt; oder in einem Wellenlängenbereich
10 zwischen 650 nm und 1400 nm liegt, oder in einem
Wellenlängenbereich zwischen 700 nm und 1400 nm liegt, oder
in einem Wellenlängenbereich zwischen 580 nm und 900 nm
liegt.
22. Mikroskopiesystem (100a; 100b) nach einem der vorangehenden
15 Ansprüche, wobei die Lichtquelle ferner einen Lichtleiter
und/oder einen Multimode-Lichtwellenleiter aufweist.
23. Mikroskopiesystem (100a; 100b) nach einem der vorangehenden
20 Ansprüche, ferner aufweisend:
- eine Bildverarbeitungseinrichtung, welche dazu konfiguriert
ist:
- 25 zumindest zwei digitale Bilder eines Objektes im Bereich der
Objektebene (OP-A; OP-B) abhängig vom ersten Bild in der
ersten Bildebene (IP1-A; IP1-B) zu erzeugen;
- 30 das erste und das zweite digitale Bild jeweils in zumindest
ein erstes Teilbild (41) und ein zweites Teilbild (43) zu
trennen; wobei das Trennen in Abhängigkeit von
Pixeldatenwerten des ersten und/oder des zweiten digitalen
Bildes erfolgt, sodass das erste Teilbild des ersten
digitalen Bildes und das erste Teilbild des zweiten
35 digitalen Bildes einen gleichen Objektbereich des Objektes
wiedergeben; und
- ein zusammengesetztes digitales Bild (47) zu erzeugen,
abhängig vom ersten Teilbild (41) des ersten digitalen

Bildes und vom zweiten Teilbild (43) des zweiten digitalen Bildes.

24. Mikroskopiesystem (100a; 100b) zur Augenuntersuchung,
5 aufweisend:

eine Abbildungsoptik, die ausgebildet ist, zumindest ein
Bild eines Bereiches einer Objektebene (OP-A; OP-B) der
Abbildungsoptik auf zumindest einer Bildebene (IP-A; IP-B)
10 der Abbildungsoptik zu erzeugen;

eine Beleuchtungsoptik, welche ausgebildet ist,
Beleuchtungslicht auf die Objektebene zu lenken;

15 eine Bildverarbeitungseinrichtung, welche dazu konfiguriert
ist:

zumindest zwei digitale Bilder eines Objektes im Bereich der
Objektebene abhängig vom zumindest einen Bild zu erzeugen;

20 das erste und das zweite digitale Bild jeweils in zumindest
ein erstes Teilbild (41) und ein zweites Teilbild (43) zu
trennen; wobei das Trennen in Abhängigkeit von
Pixeldatenwerten des ersten und/oder des zweiten digitalen
25 Bildes erfolgt; wobei das erste Teilbild (41) des ersten
digitalen Bildes und das erste Teilbild (41) des zweiten
digitalen Bildes einen gleichen Objektbereich des Objektes
wiedergeben; und

30 ein zusammengesetztes digitales Bild (47) zu erzeugen,
abhängig vom ersten Teilbild (41) des ersten digitalen
Bildes und vom zweiten Teilbild (43) des zweiten digitalen
Bildes.

35 25. Mikroskopiesystem (100a; 100b) nach Anspruch 23 oder 24,
wobei der gleiche Objektbereich eine Pupille eines Auges
ist, das in der Objektebene (OP-A; OP-B) angeordnet ist.

26. Mikroskopiesystem (100a; 100b) nach einem der Ansprüche 23
40 bis 25, wobei das Mikroskopiesystem (100a; 100b) dazu

konfiguriert ist, dass in der Objektebene (OP-A; OP-B) eine spektrale Intensitätsverteilung des Beleuchtungslichts, das von der Beleuchtungsoptik zur Erzeugung des ersten digitalen Bildes auf die Objektebene (OP-A; OP-B) gelenkt wird, unterschiedlich ist im Vergleich zur Erzeugung des zweiten digitalen Bildes.

27. Mikroskopiesystem (100a; 100b) nach einem der Ansprüche 23 bis 26, wobei die Beleuchtungsoptik dazu konfiguriert ist, dass mehr als 50 % oder mehr als 80 % der spektralen Intensitätsverteilung des Beleuchtungslichts in der Objektebene (OP-A; OP-B) zur Erzeugung des ersten digitalen Bildes in einem Wellenlängenbereich zwischen 580 nm und 1400 nm liegt, oder in einem Wellenlängenbereich zwischen 650 nm und 1400 nm liegt, oder in einem Wellenlängenbereich zwischen 700 nm und 1400 nm, oder in einem Wellenlängenbereich zwischen 580 nm und 900 nm liegt.

28. Mikroskopiesystem (100a; 100b) nach einem der Ansprüche 23 bis 27,

wobei die Beleuchtungsoptik ferner ausgebildet ist, einen ersten und einen weiteren Beleuchtungsstrahlengang zu erzeugen, wobei sich der erste Beleuchtungsstrahlengang vom weiteren Beleuchtungsstrahlengang unterscheidet;

wobei das Mikroskopiesystem (100a; 100b) ferner konfiguriert ist,

zur Erzeugung des ersten digitalen Bildes, die Objektebene durch den ersten Beleuchtungsstrahlengang zu beleuchten; und

zur Erzeugung des zweiten digitalen Bildes die Objektebene durch den weiteren Beleuchtungsstrahlengang zu beleuchten.

29. Mikroskopiesystem (100a; 100b) nach einem der Ansprüche 23 bis 28, wobei die Abbildungsoptik ferner ausgebildet ist, einen ersten Beobachtungsstrahlengang zu erzeugen, der den Bereich der Objektebene (OP-A; OP-B) in die Bildebene abbildet,

wobei der erste und der weitere Beleuchtungsstrahlengang so konfiguriert sind, dass eine Lichtintensität des ersten Beleuchtungsstrahlengangs, die unter einem Winkel von weniger als 6 Grad zu einer Achse (OA-A; OA-B) des ersten Beobachtungsstrahlengangs auf die Objektebene (OP-A; OP-B) eingestrahlt wird, höher ist, als eine Lichtintensität des weiteren Beleuchtungsstrahlenganges, die unter einem Winkel von weniger als 6 Grad zur Achse des ersten Beobachtungsstrahlengangs auf die Objektebene eingestrahlt wird.

30. Mikroskopiesystem (100a; 100b) nach einem der Ansprüche 23 bis 29, ferner aufweisend:

einen ersten und einen zweiten Bildsensor,

wobei die Bildverarbeitungseinrichtung ausgebildet ist, das erste digitale Bild abhängig von Sensordaten des ersten Bildsensors zu erzeugen und das zweite digitale Bild abhängig von Sensordaten des zweiten Bildsensors zu erzeugen.

31. Mikroskopiesystem (100a; 100b) nach einem der Ansprüche 23 bis 30, wobei die Bildverarbeitungseinrichtung ausgebildet ist, eine erste Bildverarbeitung auf das erste Teilbild des ersten und des zweiten digitalen Bildes anzuwenden und eine zweite Bildverarbeitung auf das zweite Teilbild des ersten und des zweiten digitalen Bildes anzuwenden, wobei sich die erste Bildverarbeitung von der zweiten Bildverarbeitung unterscheidet.

32. Verfahren zum Betreiben eines Mikroskopiesystems (100a; 100b); umfassend:

Erzeugen zumindest eines Bildes eines Objektes in einem Bereich einer Objektebene (OP-A; OP-B) des Mikroskopiesystems (100a; 100b) in zumindest einer Bildebene (IP1-B; IP1-B) des Mikroskopiesystems (100a; 100b);

Erzeugen zumindest eines ersten und eines zweiten digitalen Bildes abhängig vom zumindest einen Bild in der Bildebene (IP1-B; IP1-B);

5 Trennen des ersten digitalen Bildes in zumindest ein erstes Teilbild (41) des ersten digitalen Bildes und ein zweites Teilbild des ersten digitalen Bildes abhängig von Pixeldatenwerten des ersten digitalen Bildes;

10 Trennen des zweiten digitalen Bildes in zumindest ein erstes Teilbild des zweiten digitalen Bildes und ein zweites Teilbild (43) des zweiten digitalen Bildes abhängig von Pixeldatenwerten des zweiten digitalen Bildes;

15 wobei das Trennen des ersten digitalen Bildes und das Trennen des zweiten digitalen Bildes so erfolgt, dass das erste Teilbild (41) des ersten digitalen Bildes und das erste Teilbild des zweiten digitalen Bildes einen gleichen Objektbereich des Objektes wiedergeben;

20 Erzeugen eines zusammengesetzten digitalen Bildes (47), abhängig vom ersten Teilbild (41) des ersten digitalen Bildes und vom zweiten Teilbild (43) des zweiten digitalen Bildes.

25 33. Mikroskopiesystem (100b) zur Augenuntersuchung, aufweisend:

eine Abbildungsoptik zur Erzeugung eines ersten Bildes in einer ersten Bildebene (IP-1B) der Abbildungsoptik von einem Bereich einer Objektebene (OP-B) der Abbildungsoptik durch einen ersten Beobachtungsstrahlengang der Abbildungsoptik; und eines zweiten Bildes in einer zweiten Bildebene (IP1-B') der Abbildungsoptik von dem Bereich durch einen zweiten Beobachtungsstrahlengang der Abbildungsoptik;

35 wobei die Abbildungsoptik so ausgebildet ist, dass eine Achse (OA-B) des ersten Beobachtungsstrahlenganges und eine Achse (OA-B') des zweiten Beobachtungsstrahlenganges in der Objektebene (OP-B) einen Stereowinkel (θ) bilden;

40

eine oder mehrere Lichtquellen (11b, 11b') zur Erzeugung von Beleuchtungslicht;

eine Beleuchtungsoptik, die ausgebildet ist, einen ersten Beleuchtungsstrahlengang der Beleuchtungsoptik zu erzeugen, um einen ersten Teil des Beleuchtungslichts auf die Objektebene (OP-B) zu lenken, und einen zweiten Beleuchtungsstrahlengang der Beleuchtungsoptik zu erzeugen, um einen zweiten Teil des Beleuchtungslichts auf die Objektebene (OP-B) zu lenken;

wobei die Beleuchtungsoptik ferner ausgebildet ist, dass für den ersten und den zweiten Beleuchtungsstrahlengang jeweils gilt:

$$D \cdot \sin(\alpha) < M ;$$

wobei D ein Durchmesser eines minimalen Querschnitts des jeweiligen Beleuchtungsstrahlengangs ist; und α ein Öffnungswinkel des jeweiligen Beleuchtungsstrahlengangs an einer Position des minimalen Querschnitts ist;

wobei für den ersten und/oder den zweiten Beleuchtungsstrahlengang M einen Wert von 0,9 Millimeter aufweist, oder einen Wert von 0,5 Millimeter aufweist, oder einen Wert von 0,1 Millimeter aufweist, oder einen Wert von 50 Mikrometer aufweist, oder einen Wert von 10 Mikrometer aufweist, oder einen Wert von 5 Mikrometer aufweist, oder einen Wert von 2 Mikrometer aufweist.

34. Mikroskopiesystem (100a; 100b) nach Anspruch 33, wobei ferner gilt:

$$D \leq L;$$

wobei L einen Wert von 1,5 Millimeter aufweist, oder einen Wert von 1 Millimeter aufweist, oder einen Wert von 0,5 Millimeter aufweist, oder einen Wert von 0,1 Millimeter aufweist, oder einen Wert von 50 Mikrometer aufweist, oder einen Wert von 10 Mikrometer aufweist, oder einen Wert von 5 Mikrometer aufweist.

35. Mikroskopiesystem (100a; 100b) nach Anspruch 33 oder 34, wobei ferner gilt:

$$\alpha \leq p;$$

wobei p einen Wert von 45 Grad aufweist, oder einen Wert von 30 Grad aufweist oder einen Wert von 20 Grad aufweist, oder einen Wert von 15 Grad aufweist.

36. Mikroskopiesystem (100a; 100b) nach einem der Ansprüche 33 bis 35, wobei die Lichtquelle ferner einen Lichtleiter, einen Multimode-Lichtwellenleiter und/oder einen Monomode-Lichtwellenleiter aufweist.

37. Mikroskopiesystem nach einem der Ansprüche 33 bis 36, wobei die Achse (OA-B) des ersten Beobachtungsstrahlengangs zu einer Achse des ersten Beleuchtungsstrahlengangs einen Winkel in der Objektebene aufweist, der geringer ist als 6 Grad; und/oder

wobei die Achse des zweiten Beobachtungsstrahlengangs (OA-B') zu einer Achse des zweiten Beleuchtungsstrahlengangs einen Winkel in der Objektebene aufweist, der geringer ist als 6 Grad.

38. Mikroskopiesystem nach einem der Ansprüche 33 bis 37, wobei die Abbildungsoptik aufweist:

ein erstes Kontrastelement (33b), das in einer ersten Zwischenebene (IMP-B) der Abbildungsoptik angeordnet ist, wobei die erste Zwischenebene zwischen der Objektebene und der ersten Bildebene angeordnet ist;

ein zweites Kontrastelement (33b'), das in der zweiten Zwischenebene (IMP-B') der Abbildungsoptik angeordnet ist, wobei die zweite Zwischenebene (IMP-B') zwischen der Objektebene (IP-B) und der zweiten Bildebene (IMP-B') angeordnet ist,

wobei das erste und das zweite Kontrastelement (33b, 33b')
so ausgebildet sind, dass Licht eines ersten zentralen
Bereiches eines Querschnitts des ersten
Beobachtungsstrahlengangs in der ersten Zwischenebene (IMP-
5 B), und/oder Licht eines zweiten zentralen Bereiches eines
Querschnitts des zweiten Beobachtungsstrahlengangs in der
zweiten Zwischenebene (IMP-B')

a) stärker absorbiert wird als außerhalb des jeweiligen
10 zentralen Bereiches in der jeweiligen Zwischenebene;
und/oder

b) eine Phasenverschiebung erfährt, die unterschiedlich ist
zu einer Phasenverschiebung in der jeweiligen
15 Zwischenebene außerhalb des jeweiligen zentralen
Bereiches.

39. Mikroskopiesystem (100a; 100b) nach Anspruch 38, wobei die
Abbildungsoptik ferner aufweist

20 eine Objektivlinse (30a, 30b) die im ersten
Beobachtungsstrahlengang zwischen der Objektebene (OP-A;
OP-B) und der ersten Zwischenebene (IP1-A; IP1-B) angeordnet
ist, und

25 ein erstes Zoomsystem (32a; 32b), das im ersten
Beobachtungsstrahlengang zwischen der Objektivlinse (30a,
30b) und der ersten Zwischenebene (IP1-A; IP1-B) angeordnet
ist; und

30 eine Steuereinheit, die ausgebildet ist, eine Änderung einer
Position des ersten Kontrastelements entlang der Achse (OA-
A; OA-B) des ersten Beobachtungsstrahlengangs synchron mit
einer Änderung einer Vergrößerung des ersten Zoomsystems
35 (32a; 32b) zu steuern.

40. Mikroskopiesystem (100a; 100b) nach einem der Ansprüche 33
bis 39, wobei die Beleuchtungsoptik ausgebildet ist, dass
mehr als 50 %, insbesondere mehr als 80 % einer spektralen
40 Intensitätsverteilung des Beleuchtungslichts, die von dem

ersten und/oder dem zweiten Beleuchtungsstrahlengang auf die
Objektebene (OP-A; OP-B) gelenkt werden, in der Objektebene
(OP-A; OP-B) in einem Wellenlängenbereich zwischen 580 nm
und 1400 nm liegt; oder in einem Wellenlängenbereich
5 zwischen 650 nm und 1400 nm liegt, oder in einem
Wellenlängenbereich zwischen 700 nm und 1400 nm liegt, oder
in einem Wellenlängenbereich zwischen 580 nm und 900 nm
liegt.

10 41. Mikroskopiesystem (100a; 100b) nach einem der Ansprüche 33
bis 40, ferner aufweisend:

eine Bildverarbeitungseinrichtung, welche dazu konfiguriert
ist:

15 zumindest zwei digitale Bilder eines Objektes im Bereich der
Objektebene (OP-A; OP-B) abhängig vom ersten Bild in der
ersten Bildebene (IP1-A; IP1-B) zu erzeugen;

20 das erste und das zweite digitale Bild jeweils in zumindest
ein erstes Teilbild (41) und ein zweites Teilbild (43) zu
trennen; wobei das Trennen in Abhängigkeit von
Pixeldatenwerten des ersten und/oder des zweiten digitalen
Bildes erfolgt, sodass das erste Teilbild des ersten
25 digitalen Bildes und das erste Teilbild des zweiten
digitalen Bildes einen gleichen Objektbereich des Objektes
wiedergeben; und

30 ein zusammengesetztes digitales Bild (47) zu erzeugen,
abhängig vom ersten Teilbild (41) des ersten digitalen
Bildes und vom zweiten Teilbild (43) des zweiten digitalen
Bildes.

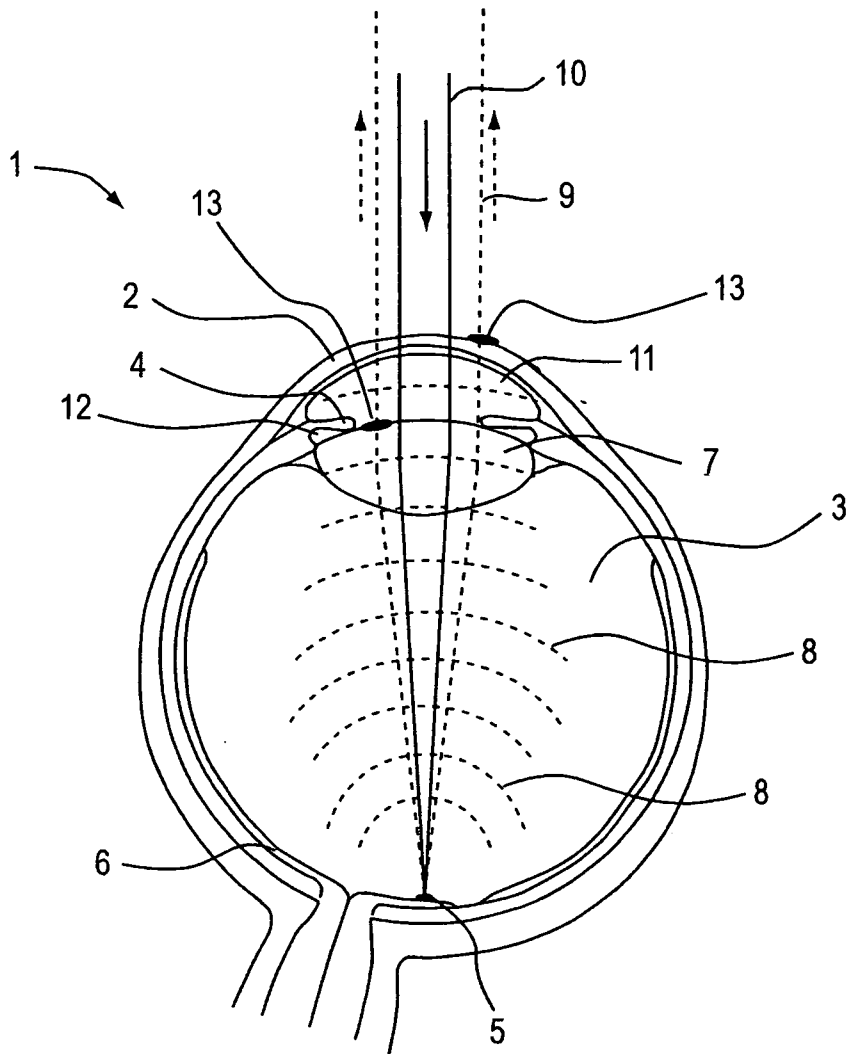


Fig. 1

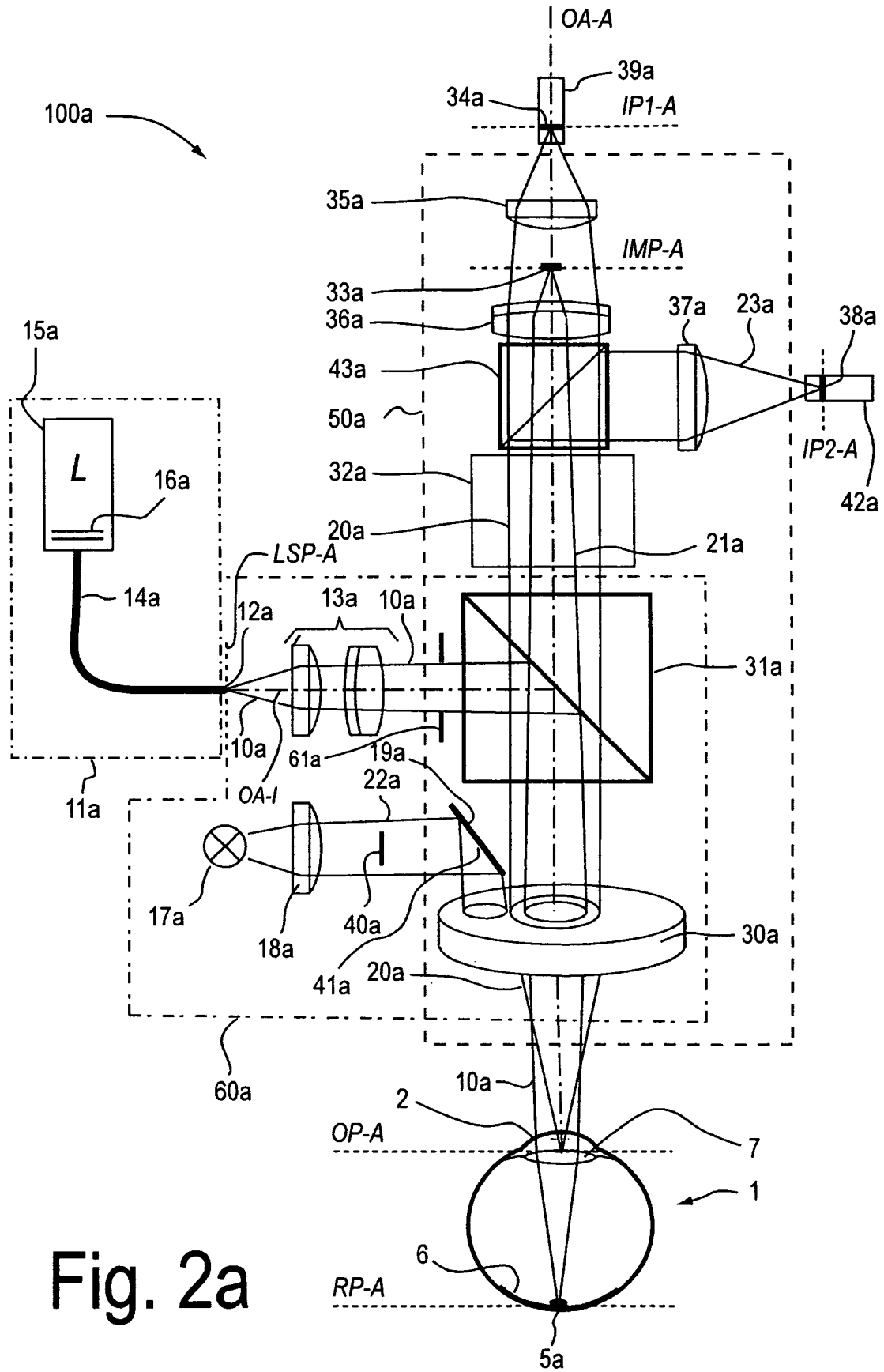


Fig. 2a

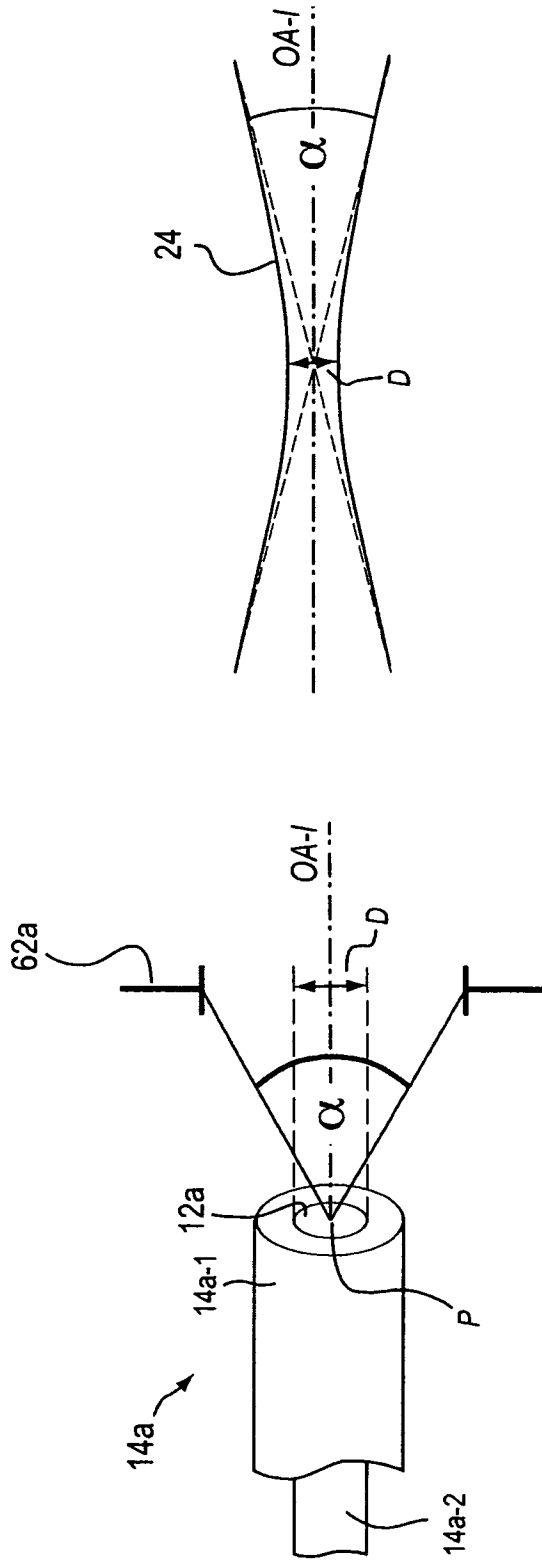


Fig. 2c

Fig. 2b

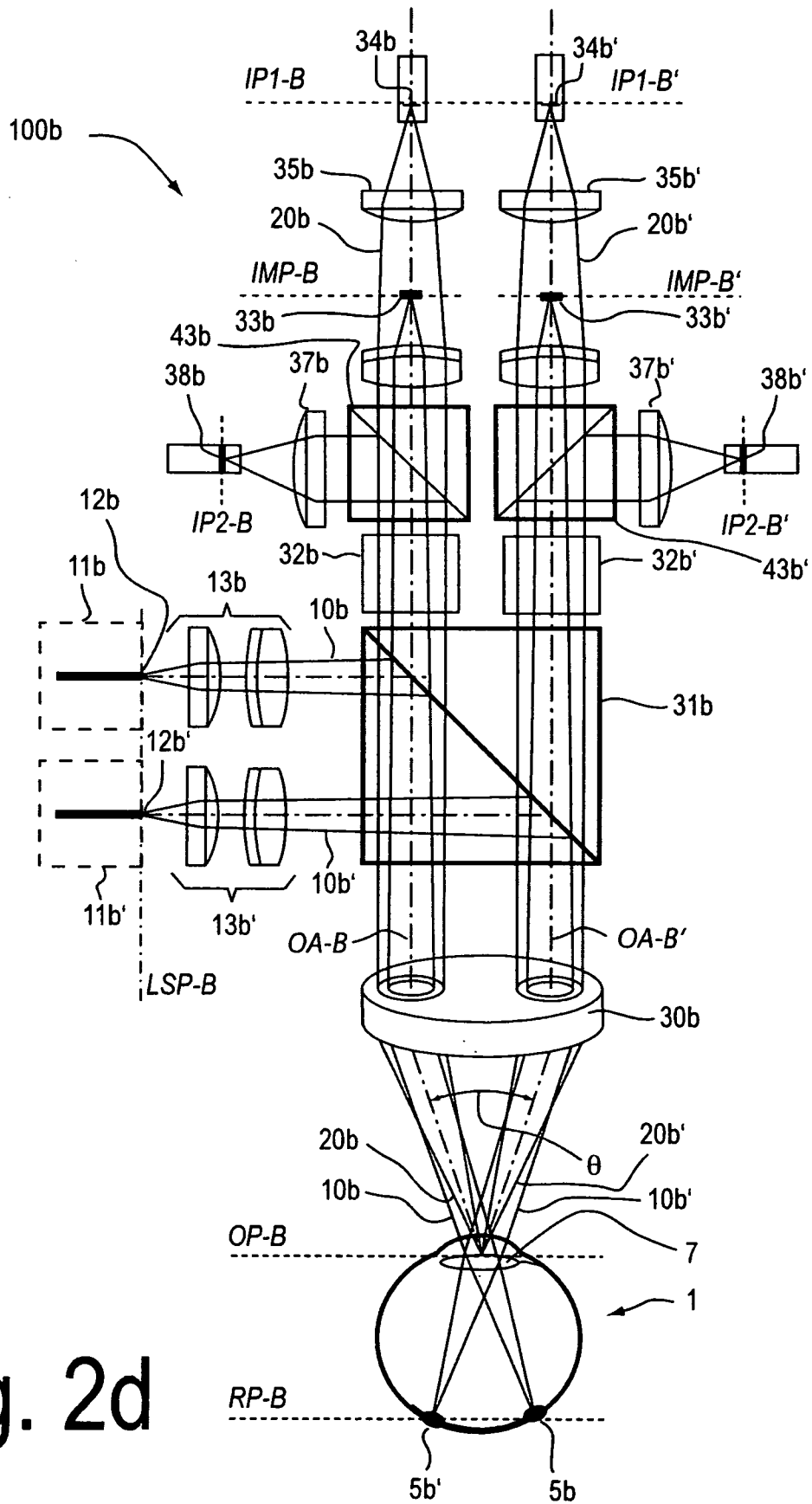


Fig. 2d

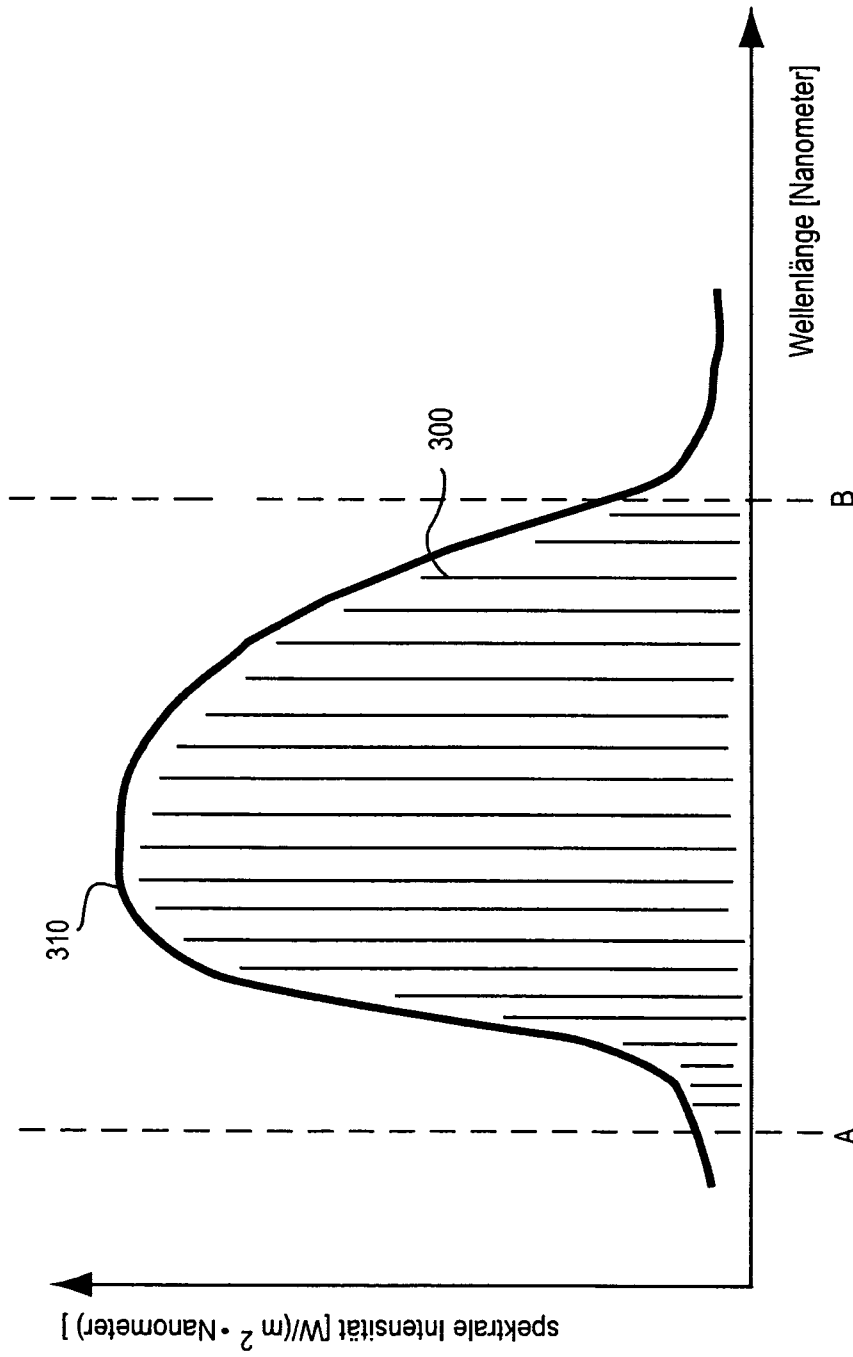


Fig. 3

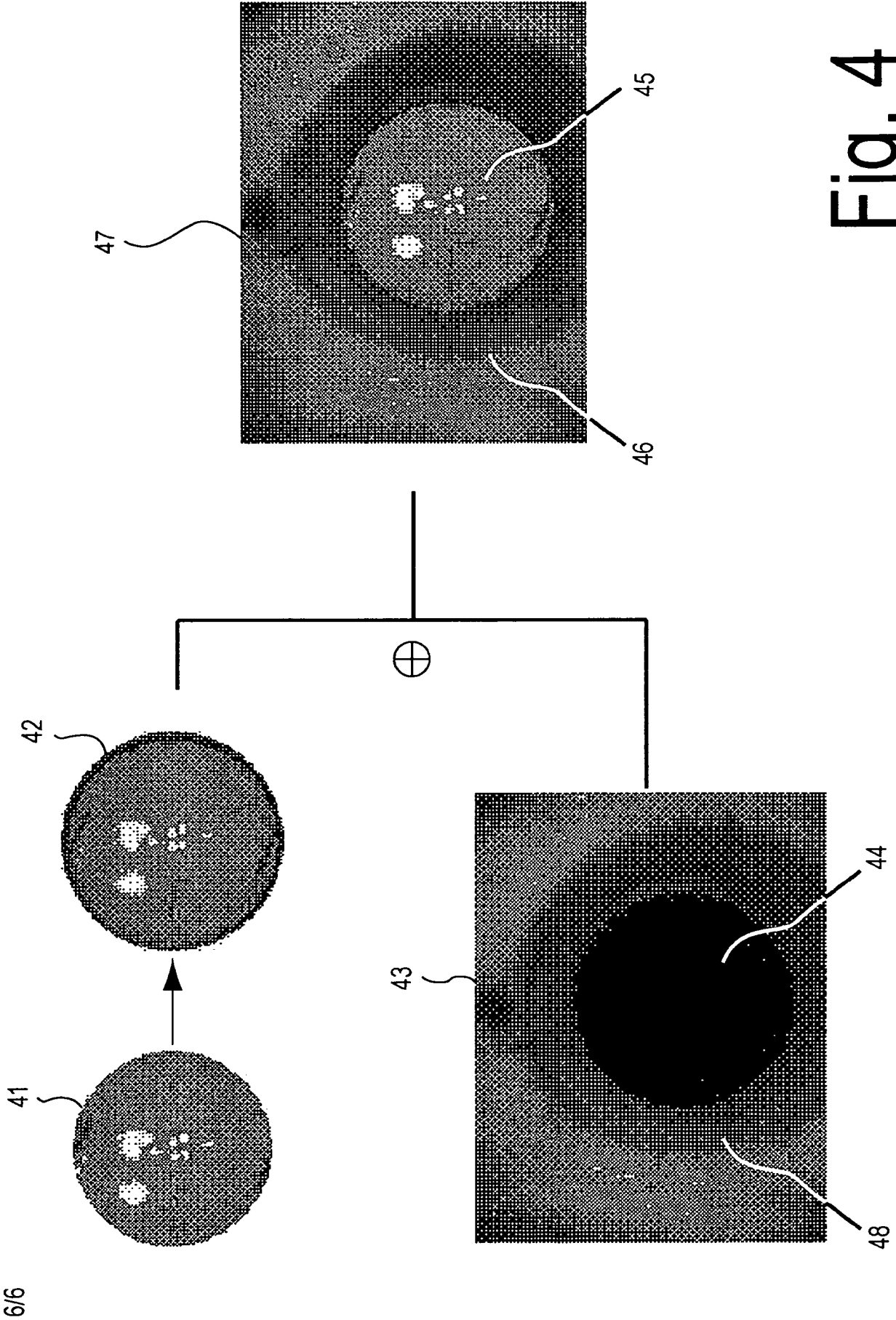


Fig. 4