

(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
28. Juni 2018 (28.06.2018)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2018/115102 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

G02B 7/08 (2006.01) G02B 27/00 (2006.01)
G02B 21/36 (2006.01)

(72) Erfinder: ROTH, Eckhard; Am Osterbache 2, 07751
Grosslöbichau (DE). DÖRING, Dirk; Scharbergweg 14,
99094 Erfurt (DE).

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2017/083777

(74) Anwalt: THEOBALD, Andreas; PATERIS Patentanwälte
PartmbB, Markgrafenstr. 22, 10117 Berlin (DE).

(22) Internationales Anmeldedatum:
20. Dezember 2017 (20.12.2017)

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,
AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY,
BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM,
DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN,
KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD,
ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO,
NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW,
SA, 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.

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

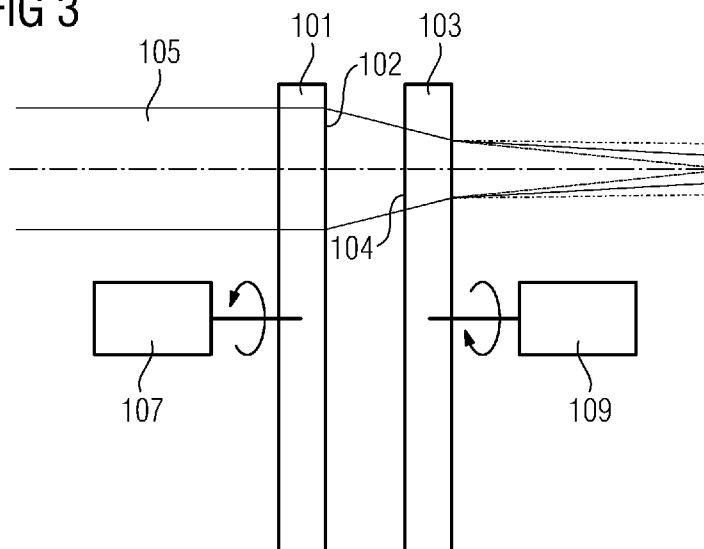
(30) Angaben zur Priorität:
10 2016 125 255.7
21. Dezember 2016 (21.12.2016) DE

(71) Anmelder: CARL ZEISS JENA GMBH [DE/DE]; Carl-
Zeiss-Promenade 10, 07745 Jena (DE).

(54) Title: MICROSCOPE HAVING A WAVEFRONT MANIPULATOR

(54) Bezeichnung: MIKROSKOP MIT WELLENFRONTMANIPULATOR

FIG 3



(57) Abstract: A microscope is provided, having an optical beam path and a wavefront manipulator, arranged in the optical beam path, having at least one first optical element (101, 201) and a second optical element (103) that is arranged or is to be arranged relative to the first optical element (101) in such a way that both optical elements (101, 103) are situated in the beam path if the wavefront manipulator is arranged in the optical beam path. The first optical element (101) has a first free-form surface (102) and the second optical element (103) has a second free-form surface (104). Here, the first optical element (101) and the second optical element (103) are arranged so as to be movable relative to one another. The first optical element (101) has a radial direction, a circumferential direction extending perpendicular to the radial direction and an axis of rotation (RA) extending perpendicular to the radial direction and the circumferential direction. Moreover, the first optical element is mounted to be rotatable about the axis of rotation (RA) and a drive (107) that acts on the first optical element (101) for rotating the first optical element (101) is present. The first free-form surface (102) varies at least in the circumferential direction of the first optical element (101).

WO 2018/115102 A1

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, 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, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

(57) Zusammenfassung: Es wird ein Mikroskop mit einem optischen Strahlengang und einem im optischen Strahlengang angeordneten Wellenfrontmanipulator mit wenigstens einem ersten optischen Element (101, 201) und einem zweiten optischen Element (103), welches derart relativ zum ersten optischen Element (101) angeordnet oder anzuordnen ist, dass sich beide optischen Elemente (101, 103) im Strahlengang befinden, wenn der Wellenfrontmanipulator im optischen Strahlengang angeordnet ist, zur Verfügung gestellt. Das erste optische Element (101) weist eine erste Freiformfläche (102,) auf, und das zweite optische Element (103) weist eine zweite Freiformfläche (104) auf. Dabei sind das erste optische Element (101) und das zweite optische Element (103) relativ zueinander bewegbar angeordnet. Das erste optische Element (101) weist eine Radialrichtung, eine zur Radialrichtung senkrecht verlaufende Umfangsrichtung und eine senkrecht zur Radialrichtung sowie zur Umfangsrichtung verlaufende Rotationsachse (RA) auf. Außerdem ist das erste optische Element um die Rotationsachse (RA) drehbar gelagert, und es ist ein auf das erste optische Element (101) zum Drehen des ersten optischen Elements (101) einwirkender Antrieb (107) vorhanden. Die erste Freiformfläche (102) variiert zumindest in Umfangsrichtung des ersten optischen Elements (101).

Mikroskop mit Wellenfrontmanipulator

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Mikroskop mit einem optischen
5 Strahlengang und einem im optischen Strahlengang angeordneten
Wellenfrontmanipulator, welcher wenigstens ein erstes optisches Element
und ein zweites optisches Element umfasst, wobei das erste optische
Element eine erste Freiformfläche und das zweite optische Element eine
10 zweite Freiformfläche aufweist und wobei das erste optische Element und
das zweite optische Element relativ zueinander bewegbar sind. Daneben
betrifft die Erfindung ein optisches Gerät mit einem derartigen
Wellenfrontmanipulator.

Die bisher verwendeten Lösungen zum Manipulieren von Wellenfronten
haben technisch bedingt einen begrenzten Dynamikbereich. So führen
15 klassische Alvarezelemente, wie sie beispielsweise in US 3,305,294
beschrieben sind, eine gegenläufige Linearbewegung zweier optischer
Komponenten aus, wobei die optischen Komponenten mit Freiformflächen
ausgestattet sind, welche je nach Relativstellung der optischen
Komponenten zueinander zu einer Wellenfrontmanipulation in einem
20 vorgegebenen Bereich führen. Die Dynamik eines solchen Alvarezelementes
wird dadurch begrenzt, dass die nötige Hin- und Herbewegung
Umkehrpunkte aufweist, so dass die Elemente jeweils abgebremst und in die
entgegengesetzte Richtung neu beschleunigt werden müssen.

Daneben sind zum veränderlichen Ablenken eines Strahlenbündels
25 bewegliche Ablenkelemente wie etwa Galvanoscanner bekannt, bei denen
jedoch ebenfalls eine bewegliche Masse in einem Umkehrpunkt abgebremst

und in die entgegengesetzte Richtung neu beschleunigt werden muss. Auch bei diesen Elementen ist der Dynamikbereich daher begrenzt.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, ein Mikroskop mit einem optischen Strahlengang und einem im optischen Strahlengang angeordneten
5 Wellenfrontmanipulator zur Verfügung zu stellen, in welchem eine Wellenfront mit einer hohen zeitliche Dynamik manipuliert werden kann, d.h. die Geschwindigkeit der Änderung der Wellenfront hoch ist.

Die genannte Aufgabe wird durch ein Mikroskop nach Anspruch 1 gelöst. Die abhängigen Ansprüche enthalten vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung.

- 10 Im erfindungsgemäßen Mikroskop mit einem optischen Strahlengang und einem im optischen Strahlengang angeordneten Wellenfrontmanipulator umfasst der Wellenfrontmanipulator wenigstens ein erstes optisches Element und ein zweites optisches Element, welches derart relativ zum ersten optischen Element angeordnet oder anzuordnen ist, dass sich beide
15 optischen Elemente im Strahlengang befinden, wenn der Wellenfrontmanipulator im optischen Strahlengang, insbesondere in einem parallelen optischen Strahlengang, angeordnet ist. Das erste optische Element weist eine erste Freiformfläche auf und das zweite optische Element eine zweite Freiformfläche, wobei das erste optische Element und das zweite
20 optische Element relativ zueinander bewegbar angeordnet sind. Im erfindungsgemäßen Wellenfrontmanipulator besitzt das erste optische Element eine radiale Richtung und eine zur radialen Richtung senkrecht verlaufende Umfangsrichtung, wobei die erste Freiformfläche zumindest in Umfangsrichtung des ersten optischen Elements variiert. Außerdem weist
25 das erste optische Element eine senkrecht zur Radialrichtung und senkrecht zur Umfangsrichtung verlaufende Rotationsachse auf, wobei das erste optische Element um die Rotationsachse drehbar gelagert ist. Zudem umfasst der Wellenfrontmanipulator ein auf das erste optische Element zum Drehen desselben einwirkenden Antrieb.
- 30 Im erfindungsgemäßen Mikroskop können die erste Freiformfläche und die zweite Freiformfläche insbesondere so gewählt sein, dass ein durch die optischen Elemente hindurchtretendes Strahlenbündel einen variablen

Defokus erfährt und das Mikroskop eine Steuereinheit umfasst, die durch Variieren des Defokus die Fokusebene nacheinander in unterschiedliche Entfernungen verschiebt und veranlasst, dass das Mikroskop nacheinander Licht aus diesen unterschiedlichen Entfernungen detektiert.

- 5 Im erfindungsgemäßen Mikroskop kann die zum Manipulieren der Wellenfront benötigte Freiformfläche in Umfangsrichtung auf das drehbare optische Element des Wellenfrontmanipulators aufgebracht werden. Die Wellenfrontmanipulation erfolgt dabei bei einer Drehung des ersten optischen Elementes in einem durch die Freiformfläche gegebenen
- 10 Modulationsbereich, wobei spätestens nach einer Umdrehung des optischen Elements ein Sprung vom Ende des Modulationsbereiches zurück zum Anfang des Modulationsbereiches erfolgt. Ein wiederholtes Durchlaufen des von der Freiformfläche vorgegebenen Manipulationsbereiches kann somit durch eine kontinuierliche Rotation des Elements realisiert werden, so dass
- 15 es nicht nötig ist, das optische Element abzubremesen und in entgegengesetzter Richtung zu beschleunigen. Dadurch lässt sich die Dynamik der Wellenfrontmanipulation gegenüber den bekannten Wellenfrontmanipulatoren erhöhen. Die Frequenz, mit der der Modulationsbereich durchlaufen wird, ist dabei durch die Drehfrequenz des
- 20 rotierenden optischen Elements gegeben. Wenn die Freiformfläche derart ausgestaltet ist, dass sie zwei oder mehr in Umfangsrichtung hintereinander angeordnete identische Abschnitte aufweist, kann die Frequenz, mit der der Modulationsbereich durchlaufen wird, auf ein n -faches der Rotationsfrequenz des optischen Elements erhöht werden, wobei n der Anzahl der in
- 25 Umfangsrichtung hintereinander angeordneten identischen Abschnitte angibt. Auf diese Weise lassen sich sehr hohe Frequenzen beim Durchlaufen des Modulationsbereiches und damit sehr hohe Modulationsfrequenzen realisieren.

- Ebenfalls sehr hohe Modulationsfrequenzen lassen sich realisieren, wenn
- 30 auch das zweite optische Element eine Radialrichtung, eine zur Radialrichtung senkrecht verlaufenden Umfangsrichtung und eine senkrecht zur Radialrichtung sowie zur Umfangsrichtung verlaufenden Rotationsachse aufweist, wobei das zweite optische Element um die Rotationsachse drehbar

gelagert ist, die zweite Freiformfläche zumindest in Umfangsrichtung des zweiten optischen Elements variiert und ein auf das zweite optische Element zum Drehen desselben einwirkender Antrieb vorhanden ist, welcher das zweite optische Element gegenläufig zum ersten optischen Element dreht.

- 5 Der Antrieb kann dabei derselbe Antrieb sein, der auch das erste optische Element dreht, wenn ein geeignetes Getriebe vorhanden ist, welches das gegenläufige Drehen der beiden optischen Elemente ermöglicht. Durch das gegenläufige Drehen der optischen Elemente kann die Winkelgeschwindigkeit der beiden optischen Elemente relativ zueinander
- 10 verdoppelt werden, wodurch sich auch die Frequenz, mit der der durch die Freiformflächen definierte Modulationsbereich der Wellenfront durchlaufen wird. Gegenläufig rotierende Elemente mit Freiformflächen, die mindestens zwei in Umfangsrichtung hintereinander angeordnete identische Abschnitte aufweisen, ermöglichen eine weitere Frequenzerhöhung, so dass ein sehr
- 15 rasches Durchlaufen des Manipulationsbereiches möglich wird.

- Es besteht aber auch die Möglichkeit, das zweite optische Element statt drehbar fix anzuordnen, was es ermöglicht, das zweite optische Element gegenüber dem optischen Element deutlich kleiner auszugestalten. Außerdem wird dann nur ein rotierendes optisches Element benötigt, was
- 20 den Aufbau des Wellenfrontmanipulators vereinfacht.

- Wenn das rotierende optische Element oder die rotierenden optischen Elemente dezentral zum Strahlengang angeordnet ist bzw. sind, kann der Antrieb zum Rotieren des optischen Elements bzw. der optischen Elemente zentral im jeweiligen optischen Element angeordnet sein. Dadurch kann eine
- 25 gleichmäßige Kräfte- und Momentenverteilung realisiert werden, was zu einer sehr gleichmäßigen Rotation führt.

- Im erfindungsgemäßen Mikroskop kann die Freiformfläche bzw. können die Freiformflächen des Wellenfrontmanipulators derart ausgebildet sein, dass bei einer Drehung des drehbaren optischen Elementes bzw. der drehbaren
- 30 optischen Elemente ein durch wenigstens ein ausgesuchtes Zernikepolynom Z_j^i beschriebener Wellenfrontanteil in einem vorgegebenen Bereich variiert wird. Die Zernikepolynome Z_j^i repräsentieren Wellenfrontanteile, die jeweils einen definierten optischen Abbildungsfehler repräsentieren. So

repräsentieren die Zernikepolynome Z^1_1 und Z^{-1}_1 jeweils eine Verkipfung der Wellenfront in x-Richtung bzw. y-Richtung, das Zernikepolynom Z^0_2 das Einbringen eines Defokus in die Wellenfront, die Zernikepolynome Z^{-2}_2 und Z^2_2 jeweils das Einbringen eines Astigmatismus in die Wellenfront, die
5 Zernikepolynome Z^{-1}_3 und Z^1_3 jeweils das Einbringen einer Koma in die Wellenfront, das Zernikepolynom Z^0_4 das Einbringen einer sphärischen Aberration, etc. Mit einer geeigneten Ausgestaltung der Freiformflächen lassen sich einzelne der genannten Abbildungsfehler oder Kombinationen aus den genannten Abbildungsfehlern gezielt herbeiführen. Das Verkippen
10 der Wellenfront kann dabei beispielsweise zum Durchführen eines lateralen Scans und der Defokus zum Durchführen eines Tiefenscans (z-scans) nutzen.

In einer ersten Ausführungsvariante des erfindungsgemäßen Mikroskops ist wenigstens eines der optischen Elemente des Wellenfrontmanipulators
15 transmissiv ausgebildet und weist eine erste Grundfläche sowie eine zur ersten Grundfläche parallel verlaufende zweite Grundfläche auf, wobei die in Umfangsrichtung variierende Freiformfläche durch eine auf der ersten Grundfläche gebildete Freiformfläche und/oder eine auf der zweiten Grundfläche gebildete Freiformfläche realisiert ist. Die erste Grundfläche und
20 die zweite Grundfläche können Kreisflächen oder Kugelkalottenflächen sein. In dieser Ausführungsvariante kann auch jedes der optischen Elemente transmissiv ausgebildet sein, so dass der Wellenfrontmanipulator ausschließlich aus transmissiven optischen Elementen besteht. In diesem Fall kann insbesondere auch jedes der optischen Elemente eine erste
25 Grundfläche und eine zur ersten Grundfläche parallel verlaufende zweite Grundfläche aufweisen, wobei die Wellenfrontmanipulation durch eine auf der ersten Grundfläche gebildete Freiformfläche und/oder eine auf der zweiten Grundfläche gebildete Freiformfläche realisiert sein kann.

In der ersten Ausführungsvariante kann jedes der transmissiv ausgebildeten
30 optischen Elemente wenigstens zwei aneinander nicht überlappende radiale Abschnitte aufweisen, wobei in den aneinander nicht überlappenden radialen Abschnitten auf der ersten Grundfläche und/oder auf der zweiten Grundfläche unterschiedliche Freiformflächen ausgebildet sind. Die

unterschiedlichen Freiformflächen können dabei jeweils denselben Abbildungsfehler herbeiführen, also beispielsweise jeweils einen Defokus, jedoch mit unterschiedlichen Abstandsbereichen, den der Fokuspunkt relativ zum Wellenfrontmanipulator durchläuft, so dass der Fokuspunkt in

5 Abhängigkeit vom radialen Abschnitt, durch den das scannende Strahlenbündel hindurchtritt, jeweils unterschiedliche Tiefenbereiche in einer zu untersuchenden Probe durchläuft. Ebenso besteht die Möglichkeit, dass die radialen Abschnitte jeweils eine Verkipfung der Wellenfront herbeiführen, wobei die Kippwinkel jeweils unterschiedliche Winkelbereiche durchlaufen,

10 bspw. 0 bis 3 Grad, 3 bis 6 Grad, usw. Es besteht aber auch die Möglichkeit, den radialen Abschnitten unterschiedliche Wellenfrontfehler zuzuordnen, so dass beispielsweise ein radialer Abschnitt eine Freiformfläche aufweist, die einen Defokus herbeiführt, wohingegen ein anderer radialer Abschnitt eine Freiformfläche aufweist, die eine Verkipfung

15 der Wellenfront herbeiführt.

In einer zweiten Ausführungsvariante des erfindungsgemäßen Mikroskops weist wenigstens eines der optischen Elemente des Wellenfrontmanipulators eine reflektierende zylindermantelförmige oder kegelmantelförmige Randfläche auf. Die in Umfangsrichtung variierende Freiformfläche ist dann

20 durch eine auf der reflektierenden zylindermantelförmigen oder kegelmantelförmigen Randfläche gebildete Freiformfläche realisiert. Insbesondere kann in dieser Ausführungsvariante jedes der optischen Elemente eine reflektierende Fläche aufweisen, so dass der Wellenfrontmanipulator ein ausschließlich reflektiver Wellenfrontmanipulator

25 ist. Dabei kann insbesondere jedes der optischen Elemente eine reflektierende zylindermantelförmige oder kegelmantelförmige Randfläche aufweisen, wobei eine in Umfangsrichtung variierende Freiformfläche durch eine auf der reflektierenden zylindermantelförmigen oder kegelmantelförmigen Randfläche gebildete Freiformfläche realisiert ist.

30 Weiterhin besteht in dieser Ausführungsvariante des Mikroskops die Möglichkeit, dass jede der zylindermantelförmigen oder kegelmantelförmigen Randflächen senkrecht zur Umfangsrichtung wenigstens zwei aneinander nicht überlappende Abschnitte aufweist, wobei in den nicht überlappenden Abschnitten der Randfläche unterschiedliche Freiformflächen ausgebildet

sind. Für diese Freiformflächen gilt das, was hinsichtlich der Freiformflächen in verschiedenen radialen Abschnitten der transmissiven rotierenden Elemente der ersten Ausführungsvariante des Mikroskops ausgeführt worden ist, analog.

- 5 Das erfindungsgemäße Mikroskop kann insbesondere ein Laser-Scanning-Mikroskop sein, in welchem ein Wellenfrontmanipulator zum Herbeiführen eines Defokus und/oder ein Wellenfrontmanipulator zum Herbeiführen einer Verkipfung der Wellenfront vorhanden sind.

10 Wenn im erfindungsgemäßen Mikroskop, insbesondere im erfindungsgemäßen Laser-Scanning-Mikroskop, lediglich ein Wellenfrontmanipulator zum Herbeiführen eines Defokus vorhanden ist, kann die Verkipfung durch andere Mittel herbeigeführt werden, bspw. durch Galvanometerspiegel. Das Herbeiführen der Verkipfung mit Hilfe von Wellenfrontmanipulatoren ist jedoch Vorteilhaft, bspw. im Hinblick auf die zu
15 erzielenden Scangeschwindigkeiten. Zusätzlich oder alternativ zu einem Wellenfrontmanipulator zum Herbeiführen eines Defokus und/oder einem Wellenfrontmanipulator zum Herbeiführen Verkipfung können im erfindungsgemäßen Mikroskop, insbesondere im erfindungsgemäßen Laser-Scanning-Mikroskop, auch Wellenfrontmanipulatoren vorhanden sein, die
20 andere Abbildungsfehler gezielt herbeiführen, wie beispielsweise eine sphärische Aberration, eine Koma, etc., etwa um im Strahlengang durch andere optische Elemente induzierte auftretende Abbildungsfehler durch Herbeiführen eines entgegengesetzt wirkenden Abbildungsfehlers zu kompensieren.

- 25 Der Wellenfrontmanipulator kann insbesondere im parallelen Strahlengang des erfindungsgemäßen Mikroskops angeordnet sein. Vorteilhafterweise ist er pupillennah angeordnet. Außerdem kann er Teil des Mikroskopobjektivs sein.

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

- Figur 1 zeigt einen Wellenfrontmanipulator mit einem feststehenden und einem rotierenden optischen Element.
- Figur 2 zeigt eine Draufsicht auf die optische Fläche des rotierenden optischen Elements aus Figur 1 in einer schematischen Darstellung.
- Figur 3 zeigt einen Wellenfrontmanipulator mit zwei rotierenden optischen Elementen.
- Figur 4 ist eine schematische Darstellung einer Draufsicht auf die optische wirksame Fläche eines rotierenden optischen Elements aus Figur 3 und der Querschnittsfläche eines durch das rotierende optische Element hindurchtretenden Strahlenbündels.
- Figur 5 zeigt in einer schematischen Darstellung eine Draufsicht auf die optische wirksame Fläche eines weiteren Wellenfrontmanipulators.
- Figur 6 zeigt einen Wellenfrontmanipulator, welcher zwei rotierende optische Elemente in Form von Kugelkalottenflächen aufweist.
- Figur 7 zeigt einen Wellenfrontmanipulator, welcher rotierende Zylinder mit verspiegelten Flächen aufweist.
- Figur 8 zeigt ein Beispiel für ein Oberflächenprofil eines rotierenden optischen Elementes, welches zu einem Defokus führt.
- Figur 9 zeigt ein Beispiel für ein Oberflächenprofil eines rotierenden optischen Elements, welches zu einem variablen Fokus für ein außeraxial passierendes Strahlenbündel führt.
- Figur 10 zeigt ein Beispiel für ein Oberflächenprofil, welches in einem außeraxial passierenden Strahlenbündel in Abhängigkeit vom radialen Bereich, in dem das Strahlenbündel den Wellenfrontmanipulator passiert, zu verschiedenen variablen Defokusbereichen führt.

- Figur 11 zeigt ein Beispiel für ein Oberflächenprofil, welches zu einer einstellbaren radialen linearen Phase in einem außeraxial passierenden Strahlenbündel führt.
- Figur 12 zeigt ein Beispiel für ein Oberflächenprofil für ein rotierendes optisches Element, welches zu einer einstellbaren linearen Phase eines das optische Element außeraxial passierenden Strahlenbündels führt.
- Figur 13 zeigt eine schematische Darstellung eines Laser-Scanning-Mikroskops mit zwei Wellenfrontmanipulatoren.
- Ein erstes Beispiel für einen Wellenfrontmanipulator, wie er im erfindungsgemäßen Mikroskop zum Einsatz kommen kann, wird nachfolgend mit Bezug auf die Figuren 1 und 2 beschrieben. Während Figur 1 den Wellenfrontmanipulator in einer Seitenansicht zeigt, zeigt Figur 2 eine Draufsicht auf ein rotierendes optisches Element des Wellenfrontmanipulators in einer schematischen Darstellung.
- Der Wellenfrontmanipulator des ersten Beispiels weist ein erstes optisches Element 1 und ein zweites optisches Element 3 auf. Während das erste optische Element 1 im vorliegenden Beispiel als Kreisscheibe ausgebildet und um eine Rotationsachse RA drehbar ist, ist das zweite optische Element 3 fix im Strahlengang angeordnet. Die Rotationsachse RA des ersten optischen Elements 1 verläuft im vorliegenden Beispiel parallel zur optischen Achse OA eines Strahlengangs, in den der Wellenfrontmanipulator eingebracht ist. Während das fix im Strahlengang angeordnete zweite optische Element 3 eine Größe aufweist, die ausreichend ist, das Strahlenbündel 5 im Strahlengang vollständig passieren zu lassen, ist der Durchmesser des ersten optischen Elements 1, also des drehbaren optischen Elements, so groß, dass das Strahlenbündel 5 die Kreisscheibe weit genug außeraxial passieren kann, damit es durch einen zentrisch im Bereich der Kreisscheibe angeordneten Antrieb 7 zum Antreiben der Kreisscheibe nicht blockiert wird.

Sowohl das erste optische Element 1 als auch das zweite optische Element 3 weisen Freiformflächen 2, 4 auf. Die Freiformfläche 2 des ersten, drehbaren optischen Elements 1, die in Figur 2 schematisch dargestellt ist, variiert in Umfangsrichtung der Kreisscheibe. Die Oberflächenprofile der Freiformflächen 2, 4 sind so gewählt, dass ein durch die optischen Elemente 1, 3 hindurchtretendes Strahlenbündel 5 einen variablen Defokus erfährt. Der Grad des Defokus hängt dabei von der Drehstellung der Kreisscheibe ab. Durch Drehen ersten optischen Elements 1 werden so nacheinander unterschiedliche Defoki eingestellt, so dass das Strahlenbündel 5 während einer Umdrehung der Kreisscheibe kontinuierlich von einem ersten Fokusabstand zu einem zweiten Fokusabstand wechselt, wobei der Fokusabstand zum ersten Fokusabstand zurückspringt, wenn eine vollständige Rotation der Kreisscheibe durchgeführt ist. Unterschiedliche Defokuszustände sind in Figur 1 durch durchgezogene Linien, kurz gestrichelte Linien und langgestrichelte Linien angedeutet. Die Geschwindigkeit, mit der der Defokus durchgestimmt wird, hängt von der Drehzahl der Kreisscheibe ab und kann daher durch Einstellen einer geeigneten Drehzahl auf eine gewünschte Geschwindigkeit eingestellt werden.

Mit dem in Figur 1 dargestellten Wellenfrontmanipulator kann ein rasches Scannen des Fokuspunktes in Z-Richtung, also entlang der optischen Achse, erfolgen, wobei die Scangeschwindigkeit durch die Rotationsgeschwindigkeit der rotierenden Schreibe gegeben ist.

Ein zweites Beispiel für einen Wellenfrontmanipulator, wie er im erfindungsgemäßen Mikroskop zum Einsatz kommen kann, wird nachfolgend mit Bezug auf die Figuren 3 und 4 beschreiben.

Figur 3 zeigt den Wellenfrontmanipulator in einem optischen Strahlengang in einer Seitenansicht, wohingegen Figur 4 eines der optischen Elemente in einer Draufsicht zeigt. Im Unterschied zum ersten Beispiel sind im zweiten Beispiel beide optischen Elemente 101, 103 als Kreisscheiben aufweisende rotierbare optische Elemente ausgestattet. Jede der beiden Kreisscheiben weist im vorliegenden Beispiel eine über ihre Umfangsrichtung variierende Freiformfläche ähnlich der in Figur 2 dargestellten Freiformfläche auf, welche

zu einem Defokus führt, dessen Ausmaß von der Drehstellung der beiden Kreisscheiben relativ zueinander abhängt. Die unterschiedlichen Defoki sind wie im ersten Beispiel, durch durchgezogene Linien, kurz gestrichelte Linien und lang gestrichelte Linien angedeutet. Dadurch, dass im zweiten Beispiel
5 beide optischen Elemente 101, 103 als drehbare Kreisscheiben ausgebildet sind, kann die Geschwindigkeit mit der der Defokus von einem ersten Defokuszustand zu einem zweiten Defokuszustand durchgestimmt wird, erhöht werden, wenn beide Kreisscheiben wie in Figur 3 angeordnet, gegenläufig zueinander rotieren. Auch hier ist die Geschwindigkeit, mit der
10 der Defokus durchgestimmt wird, von der Drehzahl der Kreisscheiben abhängig und kann daher durch eine geeignete Drehzahl auf eine gewünschte Geschwindigkeit eingestellt werden.

Die erreichbaren Geschwindigkeiten, mit der bei einem Wellenfrontmanipulator gemäß dem ersten Beispiel und bei einem
15 Wellenfrontmanipulator gemäß dem zweiten Beispiel der Defokus von einem ersten Defokusabstand zu einem zweiten Defokusabstand durchgestimmt werden kann, wird nachfolgend unter Bezugnahme auf Figur 4 erläutert. Angenommen bei einem Wellenfrontmanipulator gemäß dem ersten Beispiel, also bei einem Wellenfrontmanipulator mit einem drehbaren optischen
20 Element und einem fix im Strahlengang angeordneten optischen Element, beträgt der Durchmesser D_s des Strahlenbündels 5 14 mm, und der Durchmesser des Kreises, auf dem sich der Mittelpunkt des Strahlenbündels 5 während einer Umdrehung der Kreisscheibe bewegt, beträgt 100 mm, so beträgt der Umfang der Kreisbahn etwa 314 mm, so dass das
25 Strahlenbündel mit 14 mm Durchmesser ca. 22 mal nebeneinander auf die Kreisbahn passt. Wenn die Kreisscheibe beispielsweise mit 10.000 Umdrehung pro Minute rotiert, ergibt sich dadurch eine Frequenz von 167 Umdrehung pro Sekunde. Wenn die 22 Strahlquerschnitte, die auf der Kreisbahn der rotierenden Scheibe Platz finden, jeweils einen Fokusabstand
30 repräsentieren, können mit einer Umdrehung der Kreisscheibe 22 Fokusabstände eingestellt werden, wobei die 22 Fokusabstände pro Sekunde 167 mal durchgestimmt werden können. Insgesamt lassen sich daher mit der rotierenden Kreisscheibe aus Figur 1 Fokusabstände mit einer Frequenz von 3.667 Fokusabständen pro Sekunde einstellen. Wenn, wie im

zweiten Beispiel zwei gegenläufig rotierende optische Elemente 101, 103 vorhanden sind, verdoppelt sich diese Zahl, und es können 7.333 Fokusabstände pro Sekunde eingestellt werden, d.h. die 22 Fokusabstände können 333 mal innerhalb einer Sekunde eingestellt werden. Wenn der
5 Durchmesser der Kreisbahn, auf der sich das Strahlenbündel 105 auf der rotierenden Scheibe bewegt, größer als im vorliegenden Beispiel ist, passen mehr Strahlenbündelquerschnitte nebeneinander auf die Kreisbahn, so dass sich die Anzahl der bei einem Umlauf einstellbaren Fokusabstände erhöht. Auf diese Weise kann der Bereich, in dem der Fokusabstand durchgestimmt
10 werden kann, erhöht werden.

Es besteht aber noch eine weitere die Möglichkeit, die Geschwindigkeit, mit der die Fokusabstände eingestellt werden, zu erhöhen. Diese Möglichkeit besteht darin, dass die Freiformfläche nicht den gesamten Umfang der Scheibe einnimmt, sondern nur beispielsweise die Hälfte des Umfangs und
15 sich auf der anderen Hälfte des Umfangs wiederholt. Auf diese Weise kann die Frequenz, mit der ein Bereich an Fokusabständen durchgestimmt wird, verdoppelt werden. Dies gilt sowohl bei einem fixen 3 und einem rotierenden optischen Element 1 als auch bei zwei rotierenden optischen Elementen 101, 103. Wenn die Freiformfläche lediglich 1/3 oder 1/4 des Umfangs einnimmt,
20 kann die Frequenz weiter erhöht werden.

Ein weiteres Beispiel für einen Wellenfrontmanipulator, wie er im erfindungsgemäßen Mikroskop zum Einsatz kommen kann, ist in Figur 5 dargestellt. Figur 5 zeigt eine Draufsicht auf die Kreisscheibe eines rotierenden optischen Elements 203 des Wellenfrontmanipulators. In diesem
25 Beispiel kann der Wellenfrontmanipulator neben dem rotierenden optischen Element 203 ein fixes optisches Element oder eine zweites rotierendes optisches Element aufweisen.

Im Unterschied zu den ersten beiden Beispielen weist die Kreisscheibe des rotierenden optischen Elements 203 im vorliegenden Beispiel mehrere
30 radiale Bereiche A, B auf, in denen unterschiedliche Freiformflächen 204A, 204B ausgebildet sind. Dies ermöglicht es, ein erstes Strahlenbündel 205A gemäß einem ersten Erfordernis zu variieren und ein zweites Strahlenbündel 205B gemäß einem zweiten Erfordernis. Dabei können zwei verschiedene

Strahlenbündel 205A, 205B durch die Bereiche A und B hindurchgeleitet werden, oder es kann mittels eines Ablenkers dasselbe Strahlenbündel entweder zuerst durch den Bereich A hindurchgeleitet werden und nach Vollendung einer Umdrehung durch den Bereich B oder umgekehrt. Auf
5 diese Weise kann beispielsweise der mit dem Wellenfrontmanipulator zugängliche Bereich an Fokusabständen vergrößert werden.

Es besteht aber auch die Möglichkeit, die unterschiedlichen radialen Bereiche A, B mit Freiformflächen für unterschiedliche Wellenfrontmanipulationen zu versehen, beispielsweise den Bereich A zum
10 Herbeiführen eines einstellbaren Defokus und den Bereich B zum Herbeiführen einer Verkipfung der Wellenfront. Außerdem können außer den zwei radialen Bereichen A, B weitere radiale Bereiche vorhanden sein, wobei die Anzahl der realisierbaren radialen Bereiche von dem Durchmesser des Strahlenbündels bzw. der Strahlenbündel 205A, 205B und den
15 Durchmesser der Kreisscheibe abhängt.

Ein weiteres Beispiel für einen Wellenfrontmanipulator, wie er im erfindungsgemäßen Mikroskop zum Einsatz kommen kann, ist in Figur 6 dargestellt. Dieser unterscheidet sich von dem in Figur 3 dargestellten Beispiel dadurch, dass die rotierenden optischen Elemente 301, 303 statt
20 zweier rotierender Kreisscheiben, zwei rotierende Kugelkalottenflächen aufweisen. In diesem Beispiel sind die Freiformflächen somit statt einer Kreisfläche einer Kugelkalottenfläche überlagert. Wie im in Figur 3 dargestellten Beispiel verläuft der Strahlengang außeraxial zum Wellenfrontmanipulator, so dass die Antriebe 207, 209 zum gegenläufigen
25 Antreiben der optischen Elemente 301, 303 zentral an den optischen Elementen 301, 303 angreifen können. Alternativ besteht aber auch die Möglichkeit, Antriebselemente 311, 313 im Bereich des Umfangs der optischen Elemente 301, 303 bspw. an den Kugelkalottenflächen angreifen zu lassen. Die Antriebselemente 311, 313 können beispielsweise als auf die
30 Kugelkalottenflächen einwirkende Antriebswalzen oder Antriebskugeln ausgestaltet sein. Diese alternative Ausgestaltung, die in Figur 6 ebenfalls schematisch eingezeichnet ist, ermöglicht es, die Kugelkalottenflächen nur wenig größer als den Durchmesser des Strahlenbündels auszugestalten und

die optische Achse des Strahlengangs durch das Zentrum der Kugelkalotten hindurchgehend anzuordnen. Ein am Umfang angreifender Antrieb kann auch bei den Kreisscheiben der in den zuvor beschriebenen Beispielen dargestellten drehbaren optischen Elemente realisiert werden.

- 5 Während in den bisherigen Beispielen transmissive Wellenfrontmanipulatoren beschrieben worden sind, zeigt Figur 7 ein Beispiel für einen reflektiven Wellenfrontmanipulator. In diesem sind die rotierenden optischen Elemente 401, 403 Zylinder mit reflektierenden Zylinderflächen und die Freiformflächen 402, 404 sind den Zylinderflächen überlagert. Ein
- 10 Strahlenbündel 405 wird vom ersten rotierenden Zylinder zum zweiten rotierenden Zylinder und von dort zu einem Zielobjekt abgelenkt. Durch die in Figur 7 dargestellte gegenläufige Rotation kann ein sehr hochfrequentes Durchstimmen des Manipulationsbereiches der Wellenfront realisiert werden. Es besteht aber auch die Möglichkeit, einen der beiden rotierenden Zylinder
- 15 durch eine fixe Reflektionsfläche mit einer überlagerten Freiformfläche zu ersetzen, so dass man einen zum transmissiven Wellenfrontmanipulator auf Figur 1 analogen reflektiven Wellenfrontmanipulator erhält. Der in Figur 3 dargestellte Wellenfrontmanipulator entspricht dagegen den transmissiven Wellenfrontmanipulatoren aus den Figuren 3 oder 6.
- 20 Konkrete Freiformflächen für rotierende optische Elemente in Form von Kreisscheiben, wie sie in den Figuren 1 bis 5 dargestellt sind, werden nachfolgend mit Bezug auf die Figuren 8 bis 12 beschrieben. In diesen Figuren sind die Freiformflächen als Oberflächenprofile dargestellt, wobei die kreisförmige Grundfläche der rotierenden Elemente die Fläche mit der
- 25 Profilhöhe null bildet. Die über die Profilhöhe null hinausgehenden Bereiche sind in den Figuren 8 bis 12 als Graustufen dargestellt. Die Graustufenskala ist den jeweiligen Figuren zu entnehmen. Im Sinne der „Näherung dünner Elemente“ wird eine durch das Oberflächenprofil hindurchtretende Wellenfront derart verändert, dass zu deren Phasenverteilung eine zum
- 30 Oberflächenprofil proportionale Phasenverteilung hinzuaddiert wird. Die Phasenverteilung einer durch ein Oberflächenpaar hindurchtretenden Wellenfront wird in der „Näherung dünner Elemente“ so verändert, dass eine

zur partiellen Ableitung des Oberflächenprofils proportionale Phasenverteilung hinzuaddiert wird.

In den beispielhaft dargestellten Oberflächenprofilen werden gemäß der Lehre von Alvares zwei dicht bei einander angeordnete Flächen mit inverser
5 Profilhöhe genutzt, so dass sich in Nullstellung die Wirkungen der Flächen gegeneinander aufheben. Bei Bewegung einer Fläche gegenüber der anderen ergibt sich eine Phasenänderung, die proportional zu der partiellen Ableitung der Oberflächenform entlang der Bewegungsrichtung ist. Dies führt in kartesischen Koordinaten auf Funktionale wie

10 $z(x,y) = x^2 + y^3 / 3,$

die, wenn in y verschoben, entsprechend ihrem Gradienten in y

$$dz/dy = x^2 + y^2$$

zu von der Verschiebung abhängigen quadratischen Phasenthermen führen, die mit einer Defokussierung in Abhängigkeit von der linearen Verschiebung
15 einhergehen.

Im Rahmen der vorliegenden Erfindung ist diese Betrachtung auf Polarkoordinaten erweitert, um einen rotatorischen Bewegungsfreiheitsgrad für die Phasenänderung in einem optischen System zu nutzen. Es gibt zwei Vorteile dieser Ausführung:

- 20 1. Aufgrund der Rotationsbewegung – und des damit einhergehenden Wegfalls der Umkehrbewegung – sind große Bewegungsgeschwindigkeiten möglich.
2. Es können kleine Bauformen realisiert werden, da die Lösung rotationssymmetrisch und damit passend zur Geometrie üblicher
25 Linsensysteme ausgestaltet werden kann.

Nachfolgend werden anhand der Figuren 8 bis 12 einfache Beispiele für Oberflächenprofile von rotierenden Flächen beschrieben, mit denen eine erweiterte Schärfentiefe, ein dynamischer Fokus und eine dynamische Ablenkung erreicht werden können, indem Platten mit Flächenformen, die

analytisch beschreibbar sind, rotiert werden. Dabei finden Polarkoordinaten Verwendung, wobei die Polarkoordinaten durch den Radius r und den Winkel φ einer in Radialrichtung verlaufenden Geraden zu einer vorgegebenen Referenzrichtung bzw. Referenzgeraden gegeben sind. Kartesische

5 Koordinaten können gemäß der Gleichungen

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$\varphi = \operatorname{atan} \frac{y}{x}$$

in Polarkoordinaten umgerechnet werden. Entsprechend können Polarkoordinaten gemäß der Gleichungen

10 $x = r \cdot \cos \varphi$

$$y = r \cdot \sin \varphi$$

In kartesische Koordinaten umgerechnet werden.

Die Begriffe Oberflächenprofil und Phase eines optischen Elements werden im nachfolgenden oft synonym verwendet. Dies ist im Sinne der „Näherung
15 dünner Elemente“ gerechtfertigt, da eine durch das Oberflächenprofil hindurchtretende Wellenfront derart verändert wird, dass zu deren Phasenverteilung eine zum Oberflächenprofil proportionale Phasenverteilung hinzuaddiert wird.

Die Phasenverteilung einer durch ein Oberflächenpaar mit inverser
20 Oberfläche hindurchtretenden Wellenfront wird in der „Näherung dünner Elemente“ so verändert, dass eine zur partiellen Ableitung des Oberflächenprofils proportionale Phasenverteilung hinzuaddiert wird.

Figur 8 zeigt ein erstes Oberflächenprofil eines Flächenpaares für einen Wellenfrontmanipulator, wie er im erfindungsgemäßen Mikroskop zum
25 Einsatz kommen kann. Mittels des in Figur 8 dargestellten Oberflächenprofils in Zusammenarbeit mit einem im Strahlengang nach diesem Oberflächenprofil angeordnetem zweiten inversen Oberflächenprofil wird ein

Defokus, also eine dem Zernikepolynom Z_2^0 entsprechende Aberration, gezielt herbeigeführt und dadurch der Fokusabstand variiert. Das Oberflächenprofil ist dabei

$$z = z(r, \varphi) = a \cdot r^2 \cdot \varphi.$$

- 5 Diese Gleichung beschreibt ein Oberflächenprofil, das einer Spirale mit einer Unstetigkeit bei $\varphi = 0$ entspricht. Die Funktionalität des variablen Fokus lässt sich durch gegensätzliches Rotieren des Oberflächenpaares erreichen.

Das in Figur 8 dargestellte Oberflächenprofil ist für den Fall ausgestaltet, dass die optische Achse der Anordnung mit der Drehachse des drehbaren optischen Elementes zusammenfällt. Mit anderen Worten, das durch den Wellenfrontmanipulator hindurchtretende Strahlenbündel füllt im Wesentlichen die gesamte Kreisscheibe des drehbaren optischen Elementes aus. In Figur 8 ist die kreisförmige Scheibe als durchgezogene Linie eingezeichnet, das durch die Kreisscheibe hindurchtretende Strahlenbündel durch eine gestrichelte Linie.

Das in Figur 8 dargestellte Oberflächenprofil bewirkt im Zusammenspiel mit dem inversen Oberflächenprofil eine Phasenänderung, der das Oberflächenpaar durchlaufenden Wellenfront, die proportional der Ableitung des Oberflächenprofils nach dem Winkel φ ist. Die Wellenfrontänderung durch das Oberflächenpaar weist eine quadratische Phase

$$\frac{\partial z}{\partial \varphi} = a \cdot r^2,$$

auf, welche proportional zu einer Fokusänderung ist. Die Magnitude des Defokus hängt vom Grad der Verdrehung des Oberflächenpaares ab. Nach einer vollen Rotation der Kreisscheibe kehrt der Fokusabstand zu seinem Ausgangswert zurück, wenn der Drehwinkel $\varphi = 0$ passiert wird.

In dem in Figur 8 dargestellten Beispiel beträgt der Parameter $a = 1 \text{ } \mu\text{m}/\text{mm}^2$ und r variiert von 0 bis 1 mm. Der Winkelbereich für φ läuft von 0 bis 2π .

Ein nicht dargestelltes Oberflächenprofil, das in Verbindung mit dem inversen Oberflächenprofil einer Variation der primären sphärischen Aberration sowie sphärischer Aberration höherer Ordnungen bewirkt, ist durch die Gleichung

$$z = z(r, \varphi) \text{ mit } z = (c \cdot r^4 + d \cdot r^6 + \dots) \varphi$$

- 5 gegeben. Das Oberflächenprofil bewirkt im Zusammenspiel mit dem inversen Oberflächenprofil eine Phasenänderung, der das Oberflächenpaar durchlaufenden Wellenfront, die proportional der Ableitung des Oberflächenprofils nach dem Winkel φ ist

$$\frac{\partial z}{\partial \varphi} = c \cdot r^4 + d \cdot r^6 + \dots$$

- 10 Die optische Achse zur Anordnung muss wie in dem in Figur 8 dargestellten Oberflächenprofil mit der Drehachse zusammenfallen.

- Figur 9 zeigt ein Oberflächenprofil mit einer Kreisscheibe eines axial rotierbaren optischen Elements zur Erzeugung eines variablen Fokus für einen außeraxialen Strahlengang. Wie in Figur 8 ist in Figur 9 die
- 15 kreisförmige Scheibe durch eine durchgezogene Linie gekennzeichnet und das durch die Kreisscheibe hindurchtretende Strahlenbündel durch eine gestrichelte Linie. Das Oberflächenprofil bewirkt im Zusammenspiel mit dem inversen Oberflächenprofil eine Phaseänderung, der das Oberflächenpaar durchlaufenden Wellenfront, die proportional der Ableitung des
- 20 Oberflächenprofils nach dem Winkel φ ist. Mit der Dezentrierung in x um einen Beitrag $x = x_0$ ergibt sich für die Ableitung nach φ also für die durch das Oberflächenprofil zusammen mit einer starr angeordneten Fläche mit inversem Oberflächenprofil der Wellenfront aufgeprägte Phase

$$\frac{\partial z}{\partial \varphi} = a \cdot [(x - x_0)^2 + y^2] = a \cdot r^2 - 2 \cdot a \cdot x \cdot x_0 + a \cdot x_0^2$$

$$= a \cdot r^2 - 2 \cdot a \cdot x_0 \cdot r \cdot \cos \phi + a \cdot x_0^2$$

Bei dem Phasenbeitrag $a \cdot x_0^2$ handelt es sich um einen konstanten Phasenterm, der keine optische Wirkung besitzt und deshalb vernachlässigt werden kann.

Durch partielle Integration der von den Polarkoordinaten abhängigen Terme über den Drehwinkel ergibt sich eine Oberflächen die proportional:

$$z(r, \varphi) = a \cdot r^2 \cdot \varphi - 2 \cdot a \cdot x_0 \cdot r \cdot \sin \varphi \text{ ist.}$$

In dem in Figur 9 dargestellten Oberflächenprofil hat der Parameter a den Wert $1 \mu\text{m}/\text{mm}^2$, der Parameter x_0 hat den Wert $0,5 \text{ mm}$, und r variiert zwischen 0 und 1 mm . Das zugehörige zweite optische Element hat die entsprechende inverse Oberflächenform, so dass sich in der Winkelstellung $\varphi = 0$ Grad die Wirkung beider Plattenpaare gegeneinander aufhebt.

Figur 10 zeigt ein Oberflächenprofil eines Flächenpaares für eine axial rotierbare Kreisscheibe zur Erzeugung mehrerer variabler Foki unterschiedlicher Größe für verschiedene außeraxiale Strahlenbündel. Durch bereichsweise Anwendung der Funktion

$$z(r, \varphi) = a \cdot r^2 \cdot \varphi - 2 \cdot a \cdot x_0 \cdot r \cdot \sin \varphi$$

ist es möglich für ein Oberflächenpaar aus inversen Oberflächen, in unterschiedlichen Entfernungen zur Rotationsachse zum Beispiel unterschiedlich starke Defokussierbereiche zu bewirken. Für die einzelnen radialen Bereiche gelten dann die Funktionen

$$z_1(r, \varphi) = a_1 \cdot r^2 \cdot \varphi - 2 \cdot a_1 \cdot x_1 \cdot r \cdot \sin \varphi$$

$$z_2(r, \varphi) = a_2 \cdot r^2 \cdot \varphi - 2 \cdot a_2 \cdot x_2 \cdot r \cdot \sin \varphi$$

$$z_3(r, \varphi) = a_3 \cdot r^2 \cdot \varphi - 2 \cdot a_3 \cdot x_3 \cdot r \cdot \sin \varphi$$

jeweils definiert in Radialbereichen Δr_n und dezentriert in x_n . Die in Figur 10 dargestellten drei Bereiche mit drei unterschiedlichen Defokussierbereichen weist die folgenden Parameter auf:

$$a_1 = 9 \text{ } \mu\text{m/mm}^2, x_1 = 0,5 \text{ mm}$$

$$a_2 = 3 \text{ } \mu\text{m/mm}^2, x_2 = 1,5 \text{ mm}$$

$$a_3 = 1 \text{ } \mu\text{m/mm}^2, x_3 = 2,5 \text{ mm}$$

Die radialen Bereiche Δr erstrecken sich jeweils in radialer Richtung über 0,5
5 mm bei einer radialen Ausdehnung der rotierbaren Kreisscheibe von 3 mm.

Mit einem solchen Element lassen sich entweder mehrere außeraxiale Strahlengänge mit einem einzigen rotierenden Element beeinflussen, oder es können durch Anordnung eines einzigen Strahlengangs zu dem jeweiligen radialen Segment der rotierbaren Kreisscheibe – also durch Verschiebung
10 der rotierbaren Kreisscheibe oder Versatz des Strahlengangs relativ zur rotierbaren Kreisscheibe - auch schaltbar mehrere Funktionalitäten der rotierbaren Kreisscheibe zugänglich gemacht werden.

Figur 11 zeigt ein Oberflächenprofil, welches zusammen mit einer starr angeordneten Fläche mit inversem Oberflächenprofil gemäß der Gleichung

$$15 \quad \frac{\partial z}{\partial \varphi} = c \cdot r$$

zu einer linearen Phase entlang der Radialrichtung r führt. Diese Phase wird durch ein Oberflächenprofil der Form

$$z(r, \varphi) = c \cdot r \cdot \varphi$$

erzeugt, welches eine Spirale mit Unstetigkeit bei $\varphi = 0$ darstellt. Auch diese
20 Oberflächenstruktur kann außeraxial genutzt werden. Die Phasenänderung entlang des Radius ist konstant. Insbesondere im Falle einer außeraxialen Nutzung gegenüber im Vergleich zu dem genutzten Aperturbereich ergeben sich näherungsweise plane Phasenfronten, die zu einer kontinuierlichen Winkeländerung bei Verdrehung der rotierbaren Kreisscheiben mit
25 zueinander inverser Oberfläche gegeneinander führen. Auch diese Ausführungsvariante lässt sich durch eine rotierende Kreisscheibe und eine fixe Kreisscheibe mit inversem Oberflächenprofil realisieren. Die durch die Phasenänderung realisierte Auslenkung des Strahlenbündels folgt einer linearen Funktion des Winkels. Der Parameter c des in Figur 11 dargestellten

Oberflächenprofils hat den Wert $1 \mu\text{m}/\text{mm}^2$, und der Radius variiert zwischen 0 und 1 mm.

Figur 12 zeigt ein Oberflächenprofil für einen Wellenfrontmanipulator zur Erzeugung einer einstellbaren linearen Phase der Wellenfront in x-Richtung.

- 5 Dies entspricht einer Kippung in x-Richtung und damit dem Zernikepolynom Z_1^1 . Die in der Wellenfront induzierte lineare Phase entlang der Richtung x ist durch die Gleichung

$$\frac{\partial z}{\partial \varphi} = c \cdot r \cdot \cos \varphi = c \cdot x$$

gegeben und wird durch eine Fläche proportional zu

- 10 $z(r, \varphi)$ mit $z = c \cdot r \cdot \sin \varphi$

zusammen mit einer gegenläufig rotierenden Fläche mit inversem Oberflächenprofil induziert. Der Faktor $r \cdot \sin \varphi$ entspricht dabei der kartesischen Koordinate y.

- Das Oberflächenprofil kann beliebig außeraxial genutzt werden, da das
15 Oberflächenprofil in der x-Richtung konstant ist. Um die lineare Phase entlang der x-Richtung zu realisieren, müssen zwei rotierbare Kreisscheiben vorhanden sein, die in entgegengesetzter Richtung gedreht werden, damit man nur eine Auslenkung in einer Achse erreicht. Die Auslenkung in x folgt einer Sinusfunktion im Winkel.

- 20 Mit einem Elementepaar bestehend aus einem rotierbaren optischen Element mit dem Oberflächenprofil aus Figur 12 und einem Element mit dem inversen Oberflächenprofil lässt sich ein lateraler Scan in x-Richtung realisieren. Der Parameter c besitzt im vorliegenden Beispiel den Wert $1 \mu\text{m}/\text{mm}^2$, und r läuft von 0 bis 1 mm.

- 25 Die mit Bezug auf die Figuren 8 bis 12 beschriebenen Oberflächenprofile können auch für transmissive Kugelkalottenflächen oder reflektierende Zylinder- oder Kegelmantelflächen realisiert werden. Im Falle von

Kugelkalottenflächen ist das Oberflächenprofil in Kugelkoordinaten gegeben, im Falle einer Zylinderfläche oder Kegelfläche in Zylinderkoordinaten.

Die beschriebenen Wellenfrontmanipulatoren kommen in erfindungsgemäßen Mikroskopen zum Einsatz. Nachfolgend wird beispielhaft
5 der Einsatz erfindungsgemäßer Wellenfrontmanipulatoren in einem Laser-Scanning-Mikroskop beschrieben. Das Laser-Scanning-Mikroskop ist schematisch in Figur 13 dargestellt und umfasst ein Objektivlinsensystem 20, eine Lichtquelle 22, einen Detektor 24 und eine Lochblende 26, die in einer zur Fokusebene 28 des Laser-Scanning-Mikroskop konjugierten Ebene
10 angeordnet ist. Im in Figur 13 dargestellten Ausführungsbeispiel ist zudem ein Ablenkspiegel 30 vorhanden, welcher den Strahlengang um 90° ablenkt, so dass eine kompaktere Bauform als ohne Ablenkung realisierbar ist.

Zwischen der Lichtquelle 22 und der Lochblende 26 sind außerdem zwei Linsen 30, 32 angeordnet, zwischen denen ein paralleler Strahlengang
15 vorliegt. Die Linse 30 kollimiert dabei ein von der Lichtquelle ausgehendes divergentes Strahlenbündel und die Linse 32 fokussiert das parallele Strahlenbündel auf das Loch in der Lochblende 26. Zwischen den beiden Linsen 30 und 32 ist ein teildurchlässiger Ablenkspiegel vorhanden, welcher das Licht der Lichtquelle 22 in Richtung auf die Lochblende 26 passieren
20 lässt, von der Lochblende 26 kommendes Objektlicht dagegen in Richtung auf den Detektor 24 ablenkt. Mittels einer dem Detektor 24 vorgeschalteten Linse 36 wird das Objektlicht auf den Detektor 24 fokussiert. Zwischen dem Ablenkspiegel 30 und der Lochblende 26 ist eine weitere Linse 38 vorhanden, welche das von der Lochblende 26 ausgehende divergente
25 Beleuchtungsstrahlenbündel in ein paralleles Strahlenbündel umwandelt. Gleichzeitig fokussiert diese Linse 38 ein aus der Fokusebene stammendes parallelisiertes Strahlenbündel auf das Loch der Lochblende 26. Das parallele Beleuchtungsstrahlenbündel wird schließlich von dem Objektivlinsensystem in die Fokusebene 28 fokussiert. Die Objektebene ist
30 dabei durch die Fokusebene des Mikroskops gegeben.

Im Betrieb des Laserscanningmikroskops wird das von der Lichtquelle 22 ausgehende Licht auf die Öffnung der Lochblende 26 fokussiert. Da sich die Lochblende 26 in einer zur Fokusebene des Laser-Scanning-Mikroskops

konjugierten Ebene befindet, ist das von der Lochblende 26 ausgehende Strahlenbündel auch in der Fokusebene 28 fokussiert. Dort wird das Beleuchtungslicht von dem in der Fokusebene 28 befindlichen Objektmaterial reflektiert und gelangt als Objektlicht wieder in die Ebene der Lochblende 26.

5 Aufgrund dessen, dass die Lochblende 26 in einer zur Fokusebene 28 konjugierten Ebene liegt, ist das aus der Fokusebene 28 stammende Objektlicht im Bereich der Lochblende 26 ebenfalls fokussiert, wodurch es die Lochblende vollständig passieren kann. Objektlicht, dass aus einer anderen als der Fokusebene 28 reflektiert wird, ist im Bereich der
10 Lochblende dagegen defokussiert, so dass es Größtenteils von der Lochblende 26 ausgeblendet wird. Auf diese Weise gelangt nur Licht aus demjenigen Tiefenbereich des Objekts, indem sich die Fokusebene des Laser-Scanning-Mikroskops befindet, zum Detektor 24, so dass ein Bild mit einer sehr hohen Tiefenauflösung realisiert werden kann.

15 Mit einem Laser-Scanning-Mikroskop wird durch Variieren des Fokusabstandes ein Scan der Probe in z-Richtung, also in Tiefenrichtung, vorgenommen. Nacheinander wird die Fokusebene um einen bestimmten Betrag verschoben, und für jeden Fokusabstand wird ein Bild aufgenommen. Da der Fokuspunkt lateral sehr klein ist, erfolgt zum Aufnehmen des Bildes
20 für einen eingestellten Fokusabstand ein laterales Abtasten des Objekts innerhalb der Fokusebene, so dass für jede Fokusebene ein zweidimensionales Bild generiert wird. Durch laterales Scannen und Tiefenscannen kann so ein dreidimensionales Bild der Probe gewonnen werden kann.

25 Im vorliegenden Ausführungsbeispiel erfolgt sowohl der Tiefenscan, also das Verändern des Fokusabstandes, als auch der laterale Scan jeweils mit Hilfe eines erfindungsgemäßen Wellenfrontmanipulators. Die hierzu verwendeten Wellenfrontmanipulatoren befinden sich im parallelen Strahlengang zwischen der Linse 38 und dem Objektivlinsensystem 20. Der laterale Scan kann
30 jedoch auch mit anderen Mitteln erfolgen, bspw. mit Hilfe von Galvanometerspiegeln.

Mittels des Wellenfrontmanipulators 40 erfolgt ein rasches Variieren des Fokusabstandes und mittels des Wellenfrontmanipulators 42 erfolgt im

vorliegenden Ausführungsbeispiel ein lateraler Scan in x-Richtung. Die Wellenfrontmanipulatoren sind im vorliegenden Ausführungsbeispiel transmissiv ausgestaltet und können gemäß einer der mit Bezug auf die Figuren 1 bis 6 beschriebenen Varianten realisiert sein. Grundsätzlich ist
5 auch eine Variante mit reflektiven Wellenfrontmanipulatoren, wie sie mit Bezug auf Figur 7 beschrieben worden sind, möglich. Zudem besteht auch die Möglichkeit, sowohl transmissive als auch reflektive Wellenfrontmanipulatoren gleichzeitig zu verwenden.

Der Wellenfrontmanipulator 40 zum Variieren des Fokusabstandes weist
10 beispielsweise eine rotierende Kreisscheibe und eine feststehende Scheibe auf, wobei die rotierende Kreisscheibe ein Oberflächenprofil, wie es mit Bezug auf Figur 1 beschrieben worden ist, besitzt und die feststehende Scheibe das dazu inverse Oberflächenprofil aufweist. Er kann aber auch zwei gegenläufig zueinander rotierende Kreisscheiben aufweisen, um eine
15 höhere Scangeschwindigkeit realisieren zu können.

Der Wellenfrontmanipulator 42 weist beispielsweise zwei gegenläufig zueinander rotierende Kreisscheiben auf, von denen eine ein Oberflächenprofil wie es mit Bezug auf Figur 12 beschrieben worden ist, aufweist und die andere das dazu inverse Oberflächenprofil. Mit dem
20 Wellenfrontmanipulator 42 erfolgt daher eine Ablenkung in x-Richtung. Ein Wellenfrontmanipulator für die Ablenkung in y-Richtung ist der Übersichtlichkeitshalber nicht dargestellt, kann aber ebenfalls vorhanden sein.

Die Funktionalität der Wellenfrontmanipulatoren ist nicht auf die Fokussierung bzw. die Strahlenablenkung begrenzt, sondern kann bspw.
25 über die Segmentierung in unterschiedlichen radialen Bereichen (wie sie bspw. in Figur 10 gezeigt ist) auch weitere Phasenänderungen mit beinhalten. Beispielsweise kann es nützlich sein, die Strahlauslenkung oder die Fokussierung mit anderen Systemaberrationen wie sphärische Aberrationen oder Koma zu verknüpfen um eine bessere
30 Systemperformance zu erhalten.

Im Laser-Scanning-Mikroskop weisen Wellenfrontmanipulatoren mit Kreisscheibenförmigen rotierbaren Elementen den Vorteil auf, dass

Wellenfrontmanipulatoren mit unterschiedlichen Funktionalitäten räumlich nahe beieinander angeordnet werden können, was es insbesondere auch ermöglicht, die Wellenfrontmanipulationen pupillennah vorzunehmen.

Die vorliegende Erfindung wurde zu ihrer Veranschaulichung anhand von exemplarischen Ausführungsvarianten im Detail beschrieben. Einem Fachmann ist jedoch klar, dass von den beschriebenen Ausführungsvarianten abgewichen werden kann. So kann außer den beschriebenen Wellenfrontmanipulationen eine Vielzahl weiterer Wellenfrontmanipulationen realisiert werden, beispielsweise solche, wie sie durch Zernikepolynome oder Kombinationen von Zernikepolynomen beschrieben werden können. Die Oberflächenprofile können dabei bei einem transmissiven System auf der eingangsseitigen Fläche einer rotierenden Scheibe oder auf der ausgangsseitigen Fläche der rotierenden Scheibe angeordnet sein. Darüber hinaus besteht auch die Möglichkeit, das Oberflächenprofil so auszulegen, dass sowohl auf der eingangsseitigen Fläche als auch auf der ausgangsseitigen Fläche des optischen Elementes ein Profil vorhanden ist und die auf der eingangsseitigen Fläche und der ausgangsseitigen Fläche vorhandenen Profile zusammen das zur Wellenfrontmanipulation wirksame Oberflächenprofil bilden. Auf diese Weise können die Profilhöhen insgesamt kleiner gehalten werden, wodurch die rotierbaren optischen Elemente näher beieinander angeordnet sein können, was insbesondere dann vorteilhaft sein kann, wenn mehrere Wellenfrontmanipulatoren pupillennah angeordnet werden sollen. Mit Bezug auf die reflektiven Wellenfrontmanipulatoren sei noch erwähnt, dass außer dem beschriebenen Beispiel mit zylinderförmigen rotierenden Elementen auch Varianten mit kegelförmigen rotierenden Elementen denkbar sind. Die vorliegende Erfindung soll daher nicht auf die Verwendung der speziellen Formen der beschriebenen Wellenfrontmanipulatoren beschränkt sein, sondern lediglich durch die beigefügten Ansprüche.

Patentansprüche

1. Mikroskop mit einem optischen Strahlengang und einem im optischen Strahlengang angeordneten Wellenfrontmanipulator mit wenigstens
5 einem ersten optischen Element (1, 101, 201, 301, 401) und einem zweiten optischen Element (3, 103, 203, 303, 403), welches derart relativ zum ersten optischen Element (1, 101, 201, 301, 401) angeordnet oder anzuordnen ist, dass sich beide optischen Elemente (1, 3, 101, 103, 201, 203, 301, 303, 401, 403) im Strahlengang
10 befinden, wenn der Wellenfrontmanipulator im optischen Strahlengang angeordnet ist, wobei das erste optische Element (1, 101, 201, 301, 401) eine erste Freiformfläche (2, 102, 402) aufweist und das zweite optische Element (3, 103, 203, 303, 403) eine zweite Freiformfläche (4, 104, 204, 404) aufweist und wobei das erste optische Element (1, 101, 201, 301, 401) und das zweite optische Element (3, 103, 203, 303, 403) relativ zueinander bewegbar angeordnet sind, **dadurch gekennzeichnet**, dass
- das erste optische Element (1, 101, 201, 301, 401) eine Radialrichtung, eine zur Radialrichtung senkrecht verlaufende Umfangsrichtung und eine senkrecht zur Radialrichtung sowie zur Umfangsrichtung verlaufende Rotationsachse (RA) aufweist und das erste optische Element um die Rotationsachse (RA) drehbar gelagert ist,
20
 - ein auf das erste optische Element (1, 101, 201, 301, 401) zum Drehen des ersten optischen Elements (1, 101, 201, 301, 401) einwirkender Antrieb (7, 107, 207) vorhanden ist, und
25
 - die erste Freiformfläche (2, 102, 402) zumindest in Umfangsrichtung des ersten optischen Elements (1, 101, 201, 301, 401) variiert.
30
2. Mikroskop nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die erste Freiformfläche 2 und die zweite Freiformfläche 4 sind so gewählt sind, dass ein durch die optischen Elemente 1, 3 hindurchtretendes Strahlenbündel 5 einen variablen Defokus erfährt und das Mikroskop

eine Steuereinheit umfasst, die durch Variieren des Defokus die Fokusebene nacheinander in unterschiedliche Entfernungen verschiebt und veranlasst, dass das Mikroskop nacheinander Licht aus diesen unterschiedlichen Entfernungen detektiert

5

3. Mikroskop nach Anspruch 1 oder Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass das zweite optische Element (3, 103, 203, 303, 403) ein nicht rotierendes optisches Element ist.

10 4. Mikroskop nach Anspruch 1 oder Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass

15 - das zweite optische Element (103, 203, 303, 403) eine Radialrichtung, eine zur Radialrichtung senkrecht verlaufende Umfangsrichtung und eine senkrecht zur Radialrichtung sowie zur Umfangsrichtung verlaufende Rotationsachse (RA) aufweist und das zweite optische Element (103, 203, 303, 403) um die Rotationsachse (RA) drehbar gelagert ist, wobei die zweite Freiformfläche (104, 204, 404) zumindest in Umfangsrichtung des zweiten optischen Elements (103, 203, 303, 403) variiert, und

20

25 - ein auf das zweite optische Element (103, 203, 303, 403) zum Drehen des zweiten optischen Elements (103, 203, 303, 403) einwirkender Antrieb (109, 209) vorhanden ist, welcher das zweite optische Element (103, 203, 303, 403) gegenläufig zum ersten optischen Element (101, 201, 301, 401) dreht.

25

5. Mikroskop nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass wenigstens eines der optischen Elemente (1, 3, 101, 103, 201, 203, 301, 303) transmissiv ausgebildet ist, eine erste Grundfläche und eine zur ersten Grundfläche parallel verlaufende zweite Grundfläche aufweist und die in Umfangsrichtung variierende Freiformfläche (4, 102, 104, 202, 204, 402, 404) durch eine auf der ersten Grundfläche gebildete Freiformfläche und/oder eine auf der zweiten Grundfläche gebildete Freiformfläche realisiert ist.

30

6. Mikroskop nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass jedes der optischen Elemente transmissiv (1, 3, 101, 103, 201, 203, 301, 303) ausgebildet ist.
- 5
7. Mikroskop nach Anspruch 5 oder Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass wenigstens eines der transmissiv ausgebildeten optischen Elemente (201, 203) wenigstens zwei einander nicht überlappende radiale Abschnitte (A, B) aufweist und in den einander nicht überlappenden radialen Abschnitten auf der ersten Grundfläche und/oder auf der zweiten Grundfläche unterschiedliche Freiformflächen (204A, 204B) ausgebildet sind.
- 10
8. Mikroskop nach einem der Ansprüche 5 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass die erste Grundfläche und die zweite Grundfläche Kreisflächen oder Kugelkalottenflächen sind.
- 15
9. Mikroskop nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass wenigstens eines der optischen Elemente (401, 403) eine reflektierende zylindermantelförmige oder kegelmantelförmige Randfläche aufweist und die in Umfangsrichtung variierende Freiformfläche (402, 404) durch eine auf der reflektierenden zylindermantelförmigen oder kegelmantelförmigen Randfläche gebildete Freiformfläche realisiert ist.
- 20
10. Mikroskop nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass jedes der optischen Elemente (401, 403) eine reflektierende Fläche aufweist.
- 25
11. Mikroskop nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass jedes der optischen Elemente (401, 403) eine reflektierende zylindermantelförmige oder kegelmantelförmige Randfläche aufweist und die in Umfangsrichtung variierende Freiformfläche (402, 404) durch eine auf der reflektierenden zylindermantelförmigen oder kegelmantelförmigen Randfläche gebildete Freiformfläche realisiert ist.
- 30

12. Mikroskop nach einem der Ansprüche 9 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass jede der zylindermantelförmigen oder kegemantelförmigen Randflächen senkrecht zur Umfangsrichtung wenigstens zwei einander nicht überlappende Abschnitte aufweist und in den einander nicht überlappenden Abschnitten der Randfläche unterschiedliche Freiformflächen ausgebildet sind.
13. Mikroskop nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Freiformfläche oder die Freiformflächen (2, 4, 102, 104, 202, 204, 402, 404) derart ausgebildet sind, dass bei einer Drehung des drehbaren optischen Elements oder der drehbaren optischen Elemente (1, 3, 101, 103, 201, 203, 301, 303, 401, 403) ein durch wenigstens ein ausgesuchtes Zernikepolynom Z_j^i beschriebener Wellenfrontanteil in einem vorgegebenen Bereich variiert wird.
14. Mikroskop nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass die Freiformfläche oder die Freiformflächen (2, 4, 102, 104, 202, 204, 402, 404) derart ausgebildet sind, dass das wenigstens eine ausgesuchte Zernikepolynom das Polynom Z_2^0 , Z_1^1 oder Z^{-1}_1 ist.
15. Mikroskop nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die wenigstens die erste Freiformfläche derart ausgestaltet ist, dass sie mindestens zwei in Umfangsrichtung hintereinander angeordnete identische Abschnitte aufweist.
16. Mikroskop nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das rotierende optische Element oder die rotierenden optischen Elemente (1, 3, 101, 103, 201, 203, 301, 303) dezentral zum Strahlengang angeordnet ist bzw. sind
17. Mikroskop nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Wellenfrontmanipulator (40, 42) im parallelen Strahlengang angeordnet ist.

18. Mikroskop nach einem der vorangehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch seine Ausbildung als Laser-Scanning-Mikroskop.
- 5 19. Mikroskop nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass er Teil des Mikroskopobjektivs ist.

FIG 1

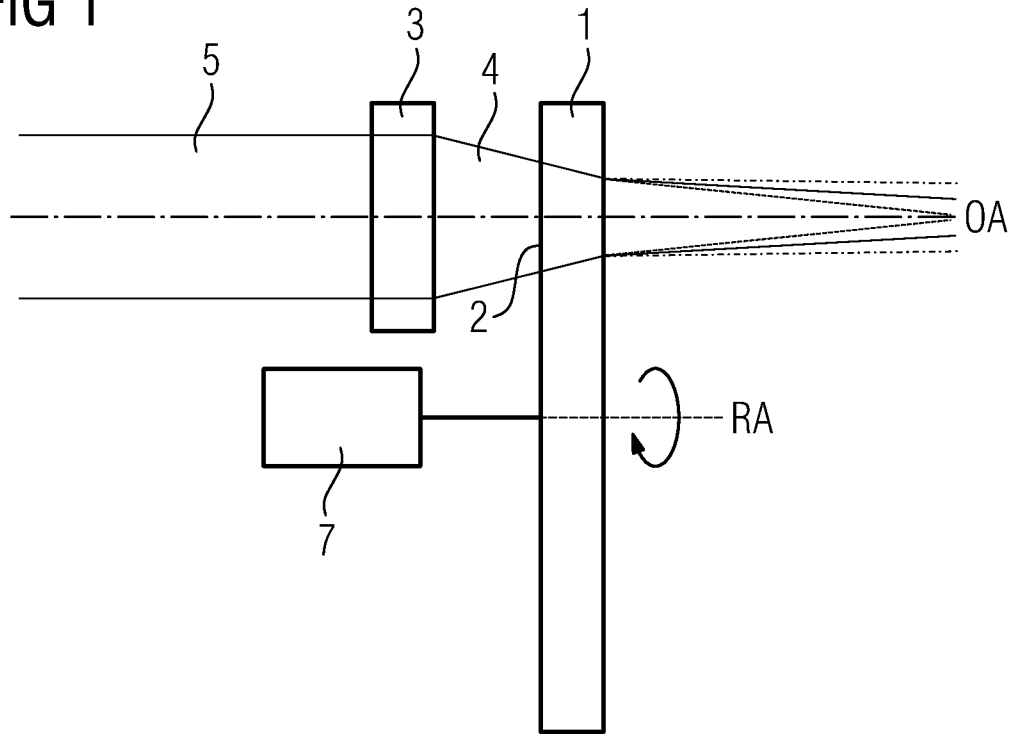


FIG 2

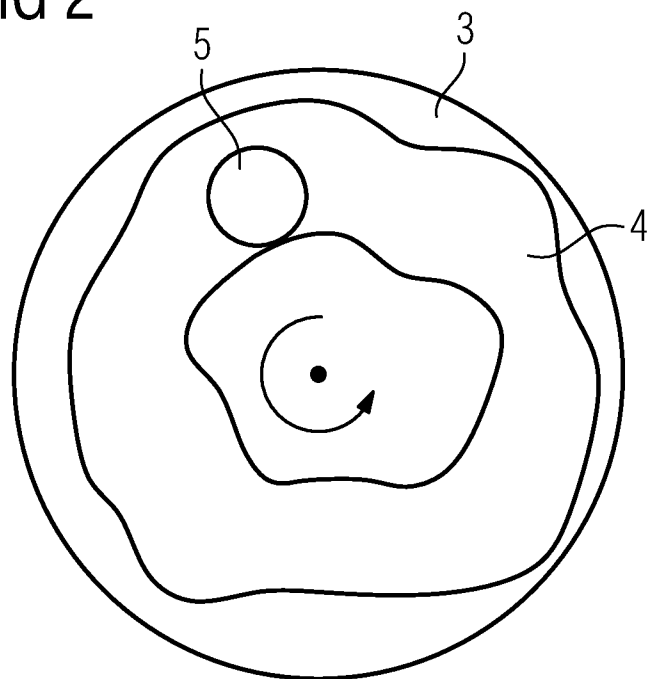


FIG 3

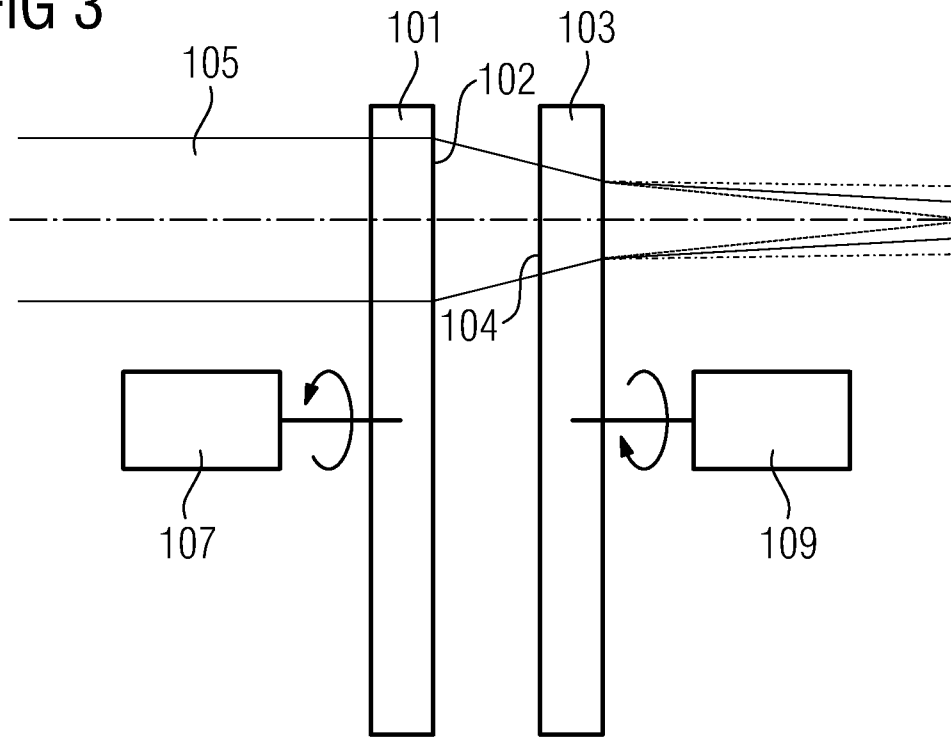


FIG 4

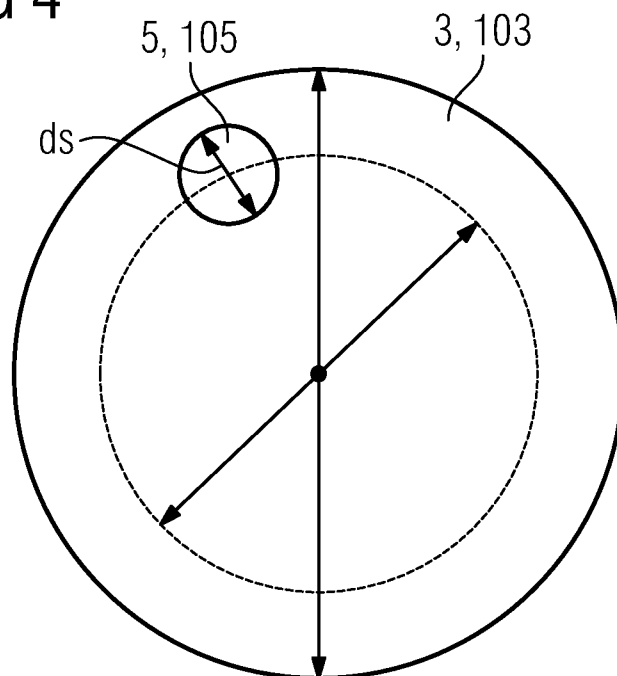


FIG 5

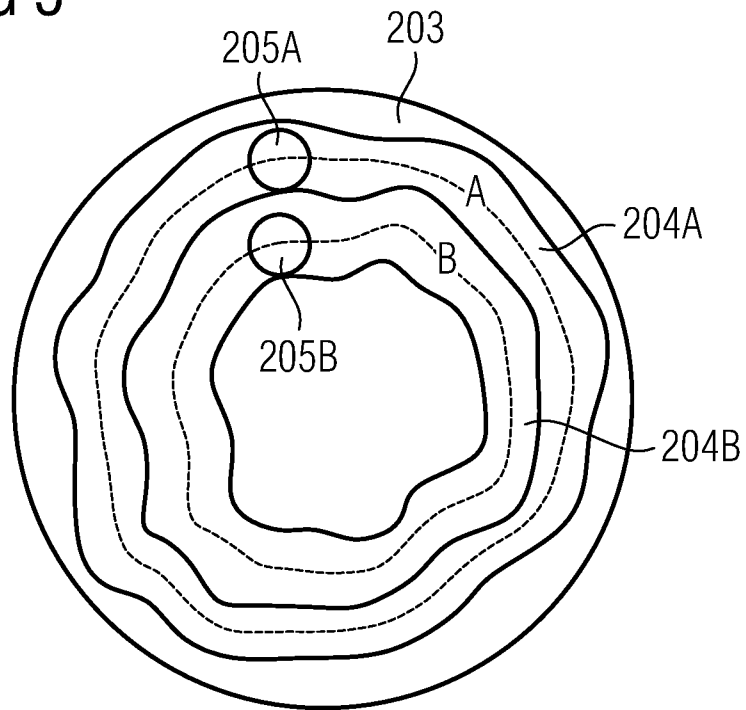


FIG 6

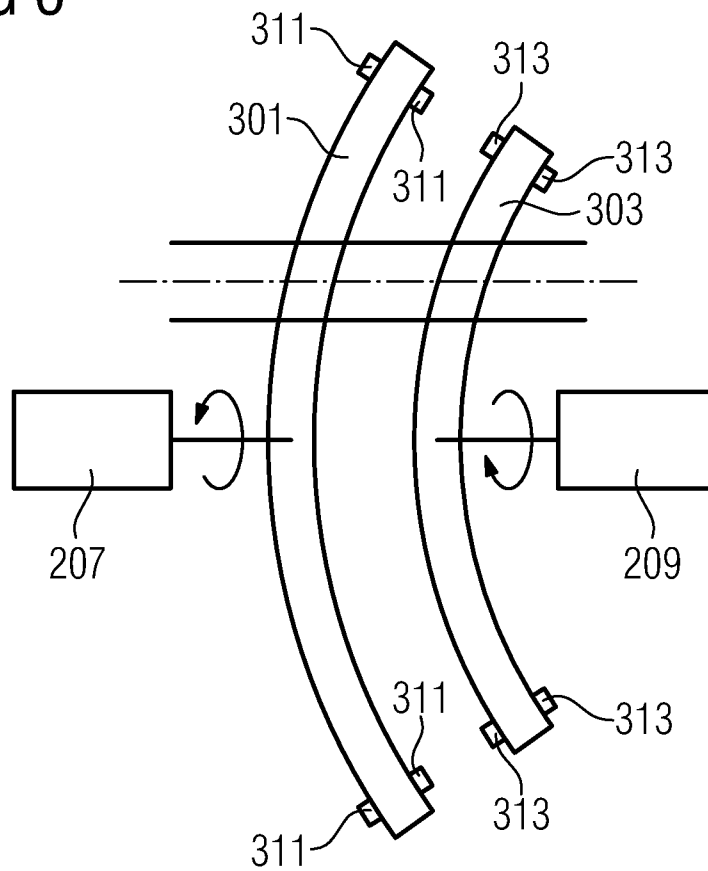


FIG 7

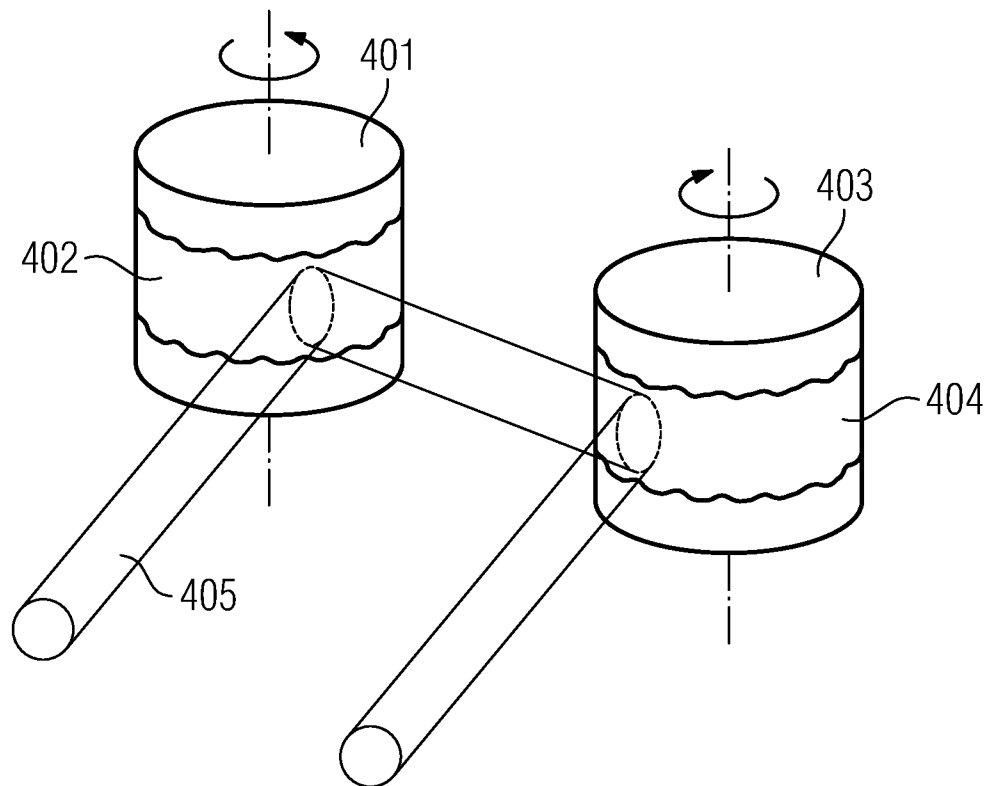


FIG 8

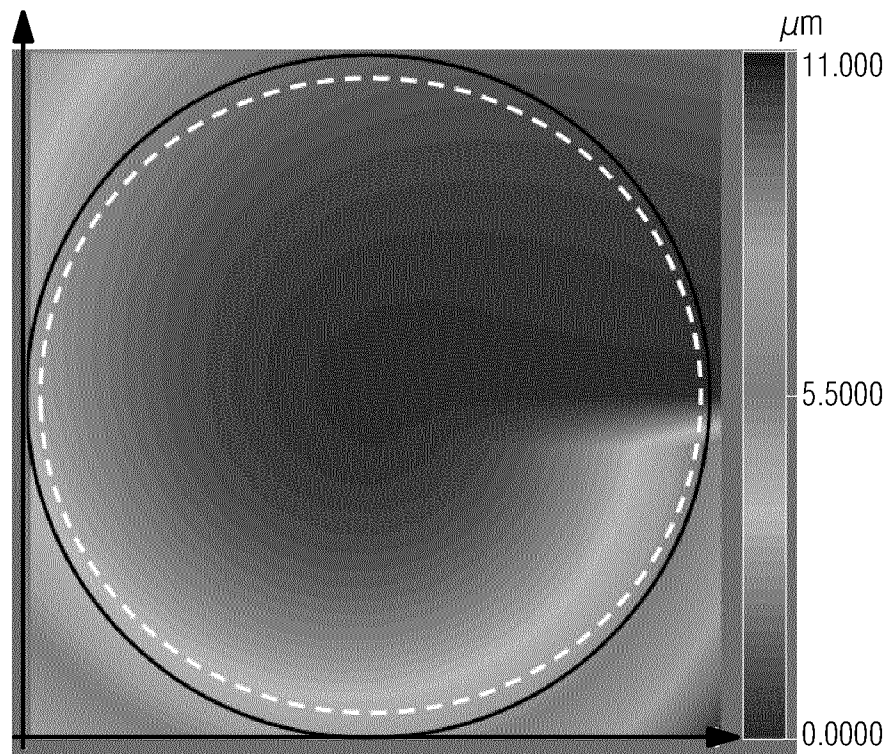


FIG 9

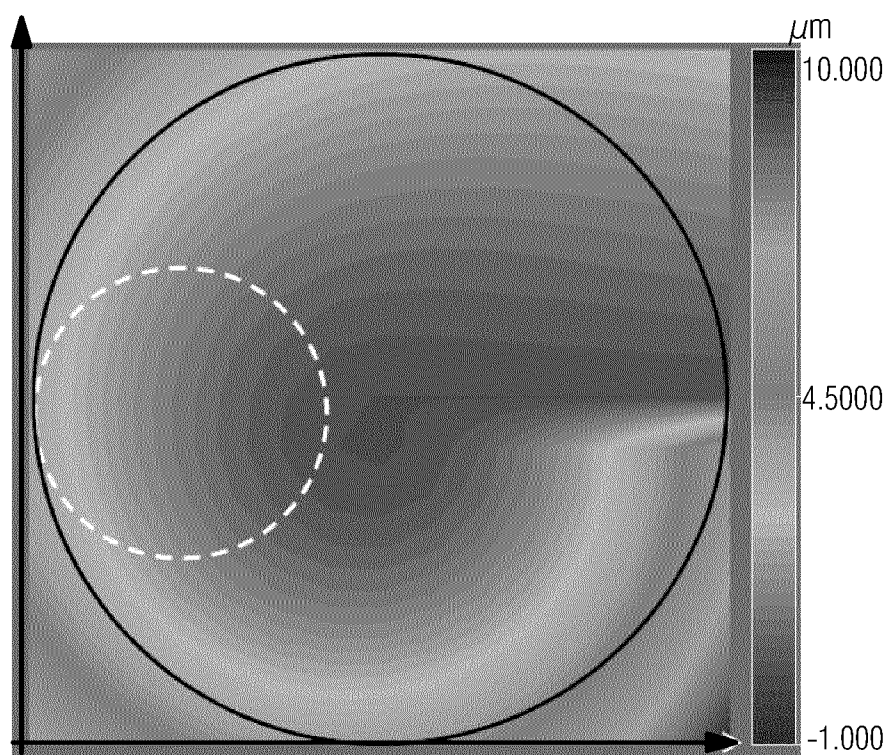


FIG 10

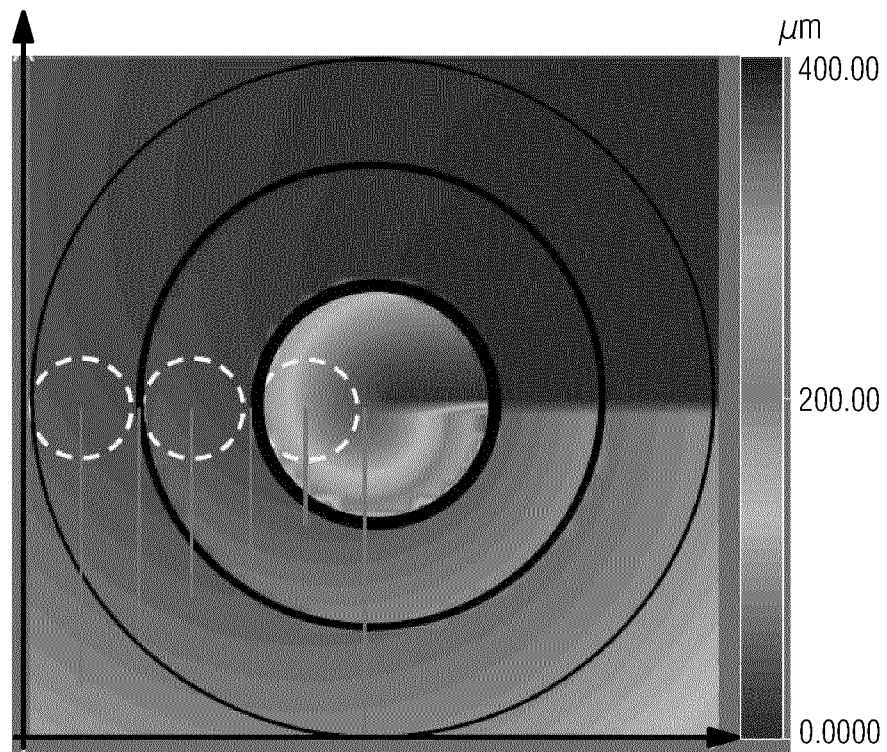


FIG 11

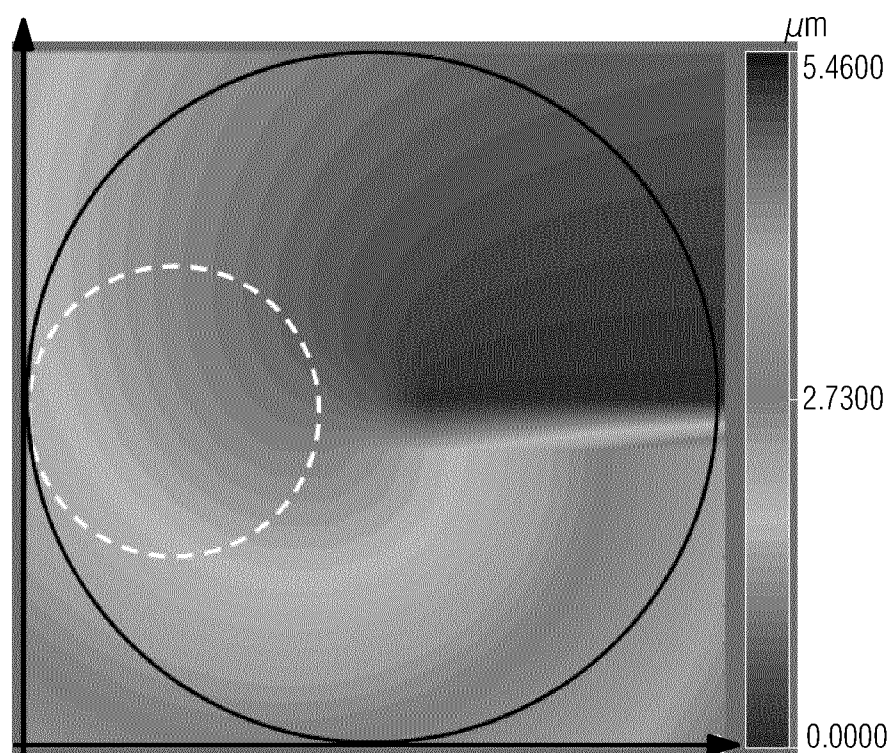


FIG 12

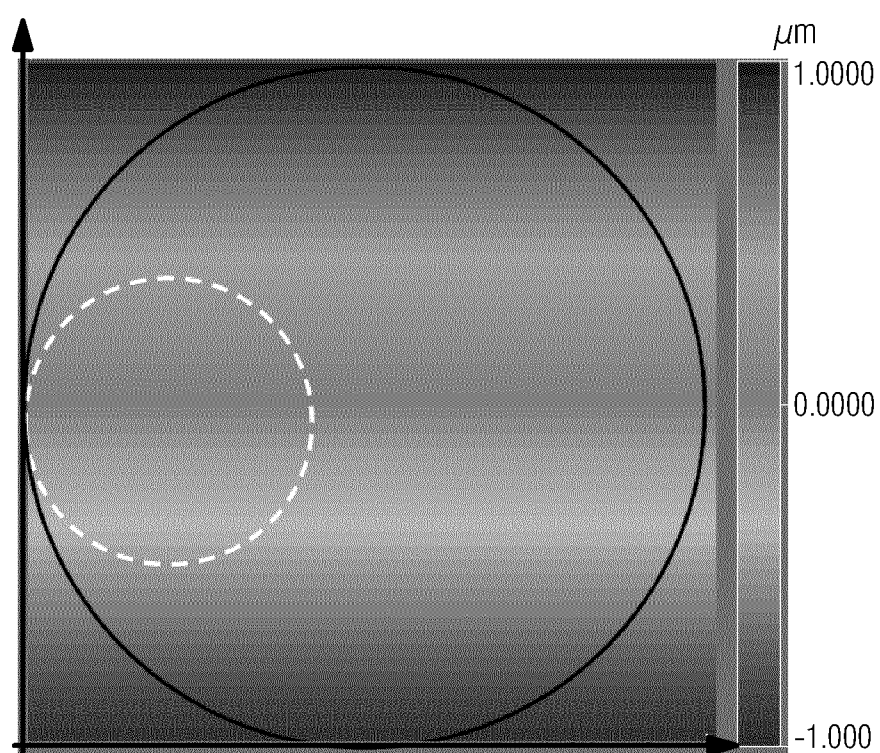
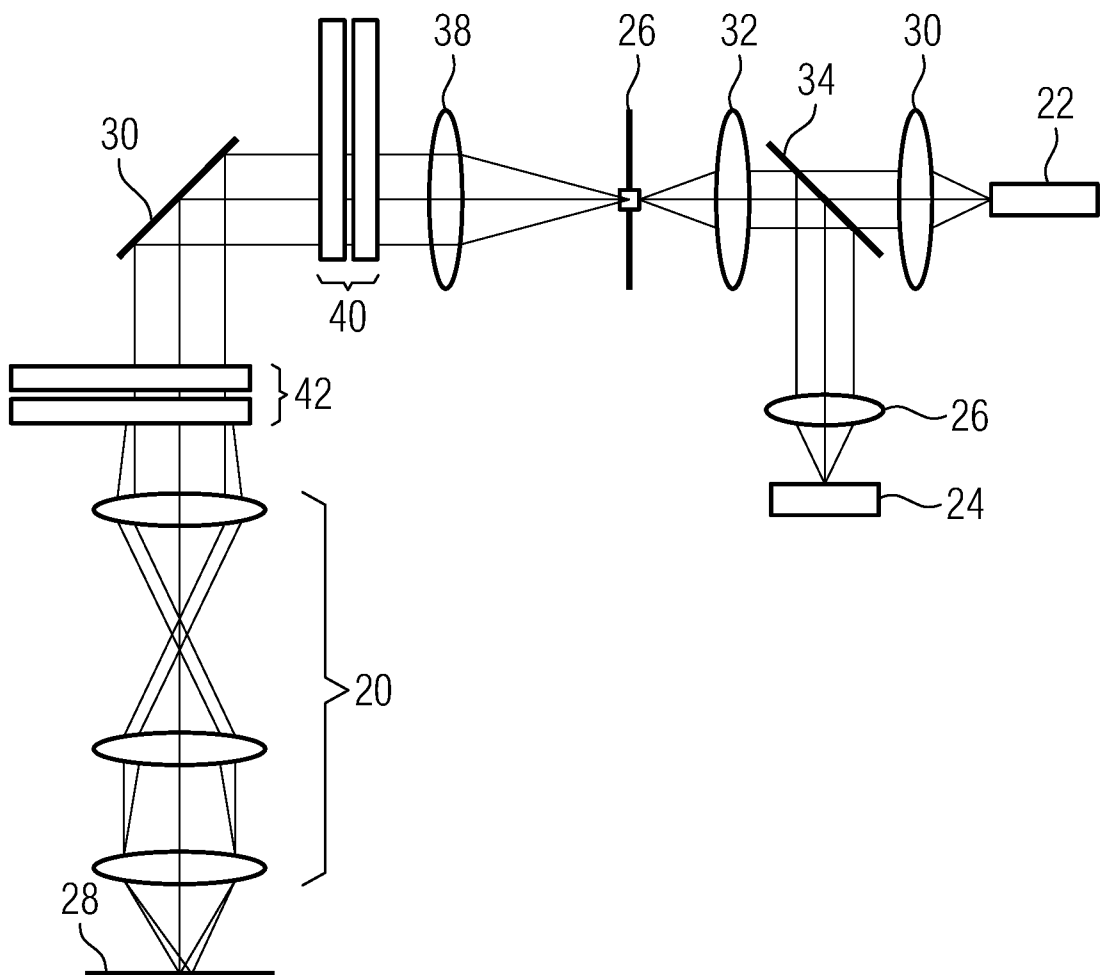


FIG 13



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2017/083777

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

INV. G02B7/08 G02B21/36 G02B27/00
ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G02B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	WO 2015/155027 A1 (ZEISS CARL MICROSCOPY GMBH [DE]) 15 October 2015 (2015-10-15)	1,16-19
Y	paragraph [0028]	2-15
Y	WO 2013/001299 A1 (THE TECHNOLOGY PARTNERSHIP PLC; JOS DINGJAN [GB]) 3 January 2013 (2013-01-03)	2-15
Y	figures 1-8	
Y	DE 10 2013 019951 A1 (ZEISS CARL MICROSCOPY GMBH [DE]; MAX PLANCK GES ZUR FÖRDERUNG DER WISS) 28 May 2015 (2015-05-28)	2-15
Y	paragraph [0023]	
Y	WO 2009/012789 A1 (UNIV INNSBRUCK [AT]; BERNET STEFAN [AT]; RITSCH-MARTE MONIKA [AT]) 29 January 2009 (2009-01-29)	2-15
	abstract	



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

26 February 2018

Date of mailing of the international search report

06/03/2018

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Daffner, Michael

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2017/083777

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
WO 2015155027 A1	15-10-2015	DE 102014104977 A1 EP 3129818 A1 JP 2017513063 A US 2017038575 A1 WO 2015155027 A1	08-10-2015 15-02-2017 25-05-2017 09-02-2017 15-10-2015
WO 2013001299 A1	03-01-2013	EP 2726917 A1 US 2014204472 A1 WO 2013001299 A1	07-05-2014 24-07-2014 03-01-2013
DE 102013019951 A1	28-05-2015	DE 102013019951 A1 EP 3074808 A1 JP 2017501441 A US 2017160529 A1 WO 2015078633 A1	28-05-2015 05-10-2016 12-01-2017 08-06-2017 04-06-2015
WO 2009012789 A1	29-01-2009	EP 2174168 A1 JP 5622571 B2 JP 2010533895 A US 2010134869 A1 WO 2009012789 A1	14-04-2010 12-11-2014 28-10-2010 03-06-2010 29-01-2009

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
 INV. G02B7/08 G02B21/36 G02B27/00
 ADD.

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
 G02B

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	WO 2015/155027 A1 (ZEISS CARL MICROSCOPY GMBH [DE]) 15. Oktober 2015 (2015-10-15)	1,16-19
Y	Absatz [0028]	2-15
Y	WO 2013/001299 A1 (THE TECHNOLOGY PARTNERSHIP PLC; JOS DINGJAN [GB]) 3. Januar 2013 (2013-01-03) Abbildungen 1-8	2-15
Y	DE 10 2013 019951 A1 (ZEISS CARL MICROSCOPY GMBH [DE]; MAX PLANCK GES ZUR FÖRDERUNG DER WISS) 28. Mai 2015 (2015-05-28) Absatz [0023]	2-15
Y	WO 2009/012789 A1 (UNIV INNSBRUCK [AT]; BERNET STEFAN [AT]; RITSCH-MARTE MONIKA [AT]) 29. Januar 2009 (2009-01-29) Zusammenfassung	2-15



Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen



Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

26. Februar 2018

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

06/03/2018

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde

Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
 NL - 2280 HV Rijswijk
 Tel. (+31-70) 340-2040,
 Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Daffner, Michael

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2017/083777

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
WO 2015155027 A1	15-10-2015	DE 102014104977 A1	08-10-2015
		EP 3129818 A1	15-02-2017
		JP 2017513063 A	25-05-2017
		US 2017038575 A1	09-02-2017
		WO 2015155027 A1	15-10-2015
WO 2013001299 A1	03-01-2013	EP 2726917 A1	07-05-2014
		US 2014204472 A1	24-07-2014
		WO 2013001299 A1	03-01-2013
DE 102013019951 A1	28-05-2015	DE 102013019951 A1	28-05-2015
		EP 3074808 A1	05-10-2016
		JP 2017501441 A	12-01-2017
		US 2017160529 A1	08-06-2017
		WO 2015078633 A1	04-06-2015
WO 2009012789 A1	29-01-2009	EP 2174168 A1	14-04-2010
		JP 5622571 B2	12-11-2014
		JP 2010533895 A	28-10-2010
		US 2010134869 A1	03-06-2010
		WO 2009012789 A1	29-01-2009