

(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
27. September 2018 (27.09.2018)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2018/172271 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

G02B 21/00 (2006.01) G02B 27/00 (2006.01)
G02B 26/06 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2018/056862

(22) Internationales Anmeldedatum:

19. März 2018 (19.03.2018)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:

10 2017 106 143.6

22. März 2017 (22.03.2017) DE

(71) Anmelder: CARL ZEISS MICROSCOPY GMBH

[DE/DE]; Carl-Zeiss-Promenade 10, 07745 Jena (DE).

(72) Erfinder: STOPPE, Lars; Karl-Schmid-Ring 3, 07743 Jena (DE). PETSCHULAT, Jörg; Golmsdorfer Straße 9, 07749 Jena (DE). STICKER, Markus; Luchsweg 14, 07749 Jena (DE). KRZIC, Andrej; Tavcarjeva 11, 3320 Velenje (SI).

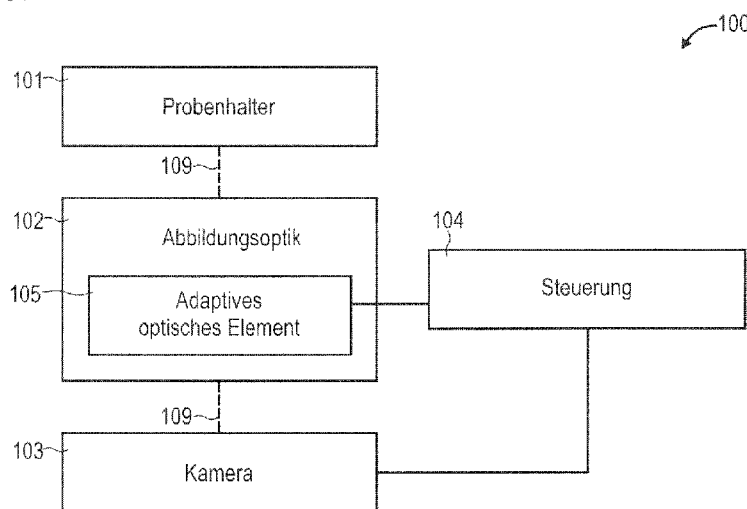
(74) Anwalt: NEUSSER, Sebastian; KRAUS & WEISERT, Patentanwälte PartGmbH, Thomas-Wimmer-Ring 15, 80539 München (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, 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,

(54) Title: WAVEFRONT CORRECTION USING ADAPTIVE OPTICAL ELEMENT

(54) Bezeichnung: WELLENFRONT-KORREKTUR MIT ADAPTIVEM OPTISCHEN ELEMENT

FIG. 1



- 101 Sample holder
- 102 Optical imaging system
- 103 Camera
- 104 Controller
- 105 Adaptive optical element

(57) Abstract: An optical device (100) comprises an optical imaging system (102) and an adaptive optical element (105). A controller (104) is designed to carry out a first optimization of control parameters of the adaptive optical element (105) to reduce a spherical aberration. The controller (104) is further designed to carry out, on the basis of the first optimization, a second optimization of the control parameters to reduce at least one non-spherical aberration.

(57) Zusammenfassung: Eine optische Vorrichtung (100) umfasst eine Abbildungsoptik (102) und ein adaptives optisches Element (105). Eine Steuerung (104) ist eingerichtet, um eine erste Optimierung von Steuerparametern des adaptiven optischen Elements (105) zur Reduktion einer sphärischen Aberration durchzuführen. Die Steuerung (104) ist weiterhin eingerichtet, um basierend auf der ersten Optimierung eine zweite Optimierung der Steuerparameter zur Reduktion mindestens einer nicht-sphärischen Aberration durchzuführen.

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.

- (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)
- vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderungen eingehen (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe h)

Beschreibung

5 Wellenfront-Korrektur mit adaptivem optischen Element

TECHNISCHES GEBIET

10 Verschiedene Beispiele der Erfindung betreffen eine optische Vorrichtung, die eine Abbildungsoptik sowie ein adaptives optisches Element umfasst. Verschiedene Beispiele der Erfindung betreffen insbesondere Techniken, um Steuerparameter für das adaptive optische Element zu ermitteln.

HINTERGRUND

15 Es sind verschiedene Techniken bekannt, um eine Wellenfront-Korrektur eines durch eine Abbildungsoptik definierten Strahlengangs einer optischen Vorrichtung durchzuführen. Beispiele für adaptive optische Elemente umfassen z.B. einen verformbaren Spiegel, eine digitale Mikrospiegelvorrichtung (englisch „Digital Micro-
20 Mirror Device; DMD“) oder einen Raumlichtmodulator (englisch „Spatial Light Modulator; SLM“). Ein Beispiel für eine solche Technik ist z.B. aus L.P. Murray et al. „Wave front correction through image sharpness maximization“ in Opto-Ireland (2005) 40-47 bekannt.

25 Dabei wurde jedoch beobachtet, dass solche vorbekannten Techniken zur Wellenfront-Korrektur teilweise schlechte Ergebnisse in Bezug auf die Qualität der Wellenfront-Korrektur erzielen können. Dies kann beispielsweise bedeuten, dass bestimmte Aberrationen des Strahlengangs nicht oder nur ungenügend durch die Wellenfront-Korrektur reduziert bzw. korrigiert werden. Oftmals kann das Durchführen der Wellenfront-Korrektur auch vergleichsweise lange dauern, sodass die eigentliche
30 Bildgebung behindert oder verzögert wird.

KURZE BESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

Deshalb besteht ein Bedarf für verbesserte Techniken zur Wellenfront-Korrektur. Insbesondere besteht ein Bedarf für solche Techniken, die Aberrationen des Strahlengangs, für welchen die Wellenfront-Korrektur durchgeführt wird, genau, zuverlässig und zügig reduzieren können.

Diese Aufgabe wird von den Merkmalen der unabhängigen Patentansprüche gelöst. Die Merkmale der abhängigen Patentansprüche definieren Ausführungsformen.

- 10 In einem Beispiel umfasst eine optische Vorrichtung eine Abbildungsoptik. Die Abbildungsoptik ist eingerichtet, um einen Strahlengang mit einem in einer Bildebene des Strahlengangs angeordneten Abbilds eines Probenobjekts zu definieren. Die optische Vorrichtung umfasst auch ein adaptives optisches Element, welches im Strahlengang
- 15 angeordnet ist. Die optische Vorrichtung umfasst auch eine Steuerung. Die Steuerung ist eingerichtet, um eine erste Optimierung von Steuerparametern des adaptiven optischen Elements durchzuführen. Die erste Optimierung dient der Reduktion mindestens einer sphärischen Aberration des Strahlengangs. Die Steuerung ist ferner eingerichtet, um eine zweite Optimierung der Steuerparameter durchzuführen. Die zweite Optimierung wird
- 20 basierend auf der ersten Optimierung durchgeführt. Die zweite Optimierung dient der Reduktion mindestens einer nicht-sphärischen Aberration des Strahlengangs. Die Steuerung ist ferner eingerichtet, um das adaptive optische Element basierend auf den Steuerparametern zu steuern.
- 25 Beispielsweise könnte die optische Vorrichtung ein Mikroskop sein. Beispielsweise könnte die optische Vorrichtung ein Laser-Scanning-Mikroskop sein. Beispielsweise könnte die optische Vorrichtung einen Probenhalter umfassen, der eingerichtet ist, um ein Probenobjekt zu fixieren, wobei das Probenobjekt beispielsweise ein Volumen-Probenobjekt oder 3D-Probenobjekt sein kann, welches Ausdehnungen in allen drei
- 30 Raumrichtungen aufweist. Beispiele für solche Probenobjekte können z.B. biologische Proben mit Zellen sein. In anderen Beispielen könnte die optische Vorrichtung auch eine Kamera mit einer entsprechenden Abbildungsoptik, z.B. einem Weitwinkel-Objektiv oder einem Tele-Objektiv sein.

Beispielsweise wäre es möglich, dass die Abbildungsoptik den Strahlengang in Bezug auf das Probenobjekt in einer Auflicht-Geometrie oder in einer Durchlicht-Geometrie definiert. Die Abbildungsoptik kann das Abbild des Probenobjekts in der Bildebene mit einer bestimmten Vergrößerung bereitstellen. Die Abbildungsoptik könnte beispielsweise weiterhin eine Beleuchtungseinheit aufweisen, die eingerichtet ist, um Licht entlang des Strahlengangs auf das Probenobjekt zu senden.

Das adaptive optische Element könnte beispielsweise in die Abbildungsoptik integriert sein oder separat zur Abbildungsoptik angebracht sein. Das adaptive optische Element kann aus folgender Gruppe ausgewählt sein: verformbarer Spiegel; DMD; SLM. Das adaptive optische Element kann eingerichtet sein, um eine Wellenfront-Korrektur des Strahlengangs durchzuführen. Dazu kann das adaptive optische Element eine optisch wirksame Oberfläche aufweisen, wobei das adaptive optische Element eingerichtet sein kann, um in Abhängigkeit von den Steuerparametern eine Topologie der Oberfläche zu verändern. Insbesondere können unterschiedliche Topologien der Oberfläche des adaptiven optischen Elements dazu verwendet werden, um den Strahlengang an unterschiedlichen Punkten einer lateralen Querschnittsfläche quer zur Ausbreitungsrichtung des Strahlengangs unterschiedlich stark zu beeinflussen.

Durch die Wellenfront-Korrektur können ein oder mehrere Aberrationen des Strahlengangs reduziert bzw. kompensiert werden. Eine Aberration des Strahlengangs kann eine Abweichung des tatsächlichen Lichtfelds von einem Soll-Lichtfeld bezeichnen. Manchmal kann diese Abweichung formal durch sogenannte Zernike-Polynomialterme oder Seidel-Polynomialterme oder Kugelwellen-Polynomialterme oder Entwicklungsstufen dieser beschrieben werden. Dabei bezeichnen z.B. unterschiedliche Polynomialterme der Zernike-Entwicklung unterschiedliche Geometrien der Aberration, und damit z.B. sphärische oder nicht-sphärische Aberrationen. In manchen Beispielen wäre es möglich, dass die mindestens eine sphärische Aberration mehrere Zernike-Polynome unterschiedlicher Ordnung umfasst, die jeweils einen sphärischen Anteil aufweisen. In Bezug auf die nicht-sphärische Aberration können unterschiedliche Geometrien von Aberrationen berücksichtigt werden und/oder unterschiedliche Ordnungen derselben Geometrie. Beispiele für nicht-sphärische Aberrationen umfassen:

eine Koma-Aberration; eine Trefoil-Aberration; eine Tip-Aberration; eine Tilt-Aberration; eine Astigmatismus Aberration; eine Ashtray-Aberration, und eine Piston-Aberration.

Die erste Optimierung und/oder die zweite Optimierung können beispielsweise jeweils
5 durch numerische Algorithmen implementiert werden, welche auf Grundlage eines iterativen Verfahrens solche Steuerparameter auffinden, welche die jeweilige Zielgröße – d.h. bei der ersten Optimierung die mindestens eine sphärische Aberration und bei der zweiten Optimierung die mindestens eine nicht-sphärische Aberration – besonders gut erfüllen. Dazu kann z.B. ein bestimmtes Gütekriterium, welches in Bezug auf die
10 mindestens eine sphärische Aberration bzw. in Bezug auf die mindestens eine nicht-sphärische Aberration definiert ist, extremal gestaltet werden, d.h. z.B. maximiert oder minimiert werden. Beispiele für Techniken, die im Zusammenhang mit der ersten Optimierung und/oder der zweiten Optimierung durchgeführt werden, umfassen: Simplex-Optimierung (Nelder-Mead-Verfahren), Verfahren der konjugierten Gradienten,
15 Levenberg-Marquardt-Algorithmen, evolutionäre Verfahren wie beispielsweise eine genetische Suche, etc..

Das Durchführen der zweiten Optimierung basierend auf der ersten Optimierung kann z.B. bedeuten, dass zunächst die erste Optimierung zum Auffinden eines Satzes von
20 Steuerparametern des adaptiven optischen Elements durchgeführt wird und anschließend die zweite Optimierung unter initialer Verwendung des durch die erste Optimierung aufgefundenen Satzes von Steuerparametern durchgeführt wird. Dies bedeutet, dass der durch die erste Optimierung aufgefundene Satz von Steuerparametern als Eingang für die zweite Optimierung dienen kann. Ein weiteres –
25 alternativ oder zusätzlich verwendetes – Beispiel für das Durchführen der zweiten Optimierung basierend auf der ersten Optimierung beträfe z.B. die Verwendung von ein oder mehreren Randbedingungen im Rahmen der zweiten Optimierung, wobei diese Randbedingungen durch das Ergebnis der ersten Optimierung definiert sind. Ein Beispiel
für eine solche Bestimmung von Randbedingungen betrifft die Fixierung von
30 Steuerparametern des adaptiven optischen Elements, die primär oder ausschließlich die mindestens eine sphärische Aberration des Strahlengangs betreffen, im Rahmen des Durchführens der zweiten Optimierung.

- Durch die erste Optimierung und die zweite Optimierung der Steuerparameter für das adaptive optische Element werden Techniken bereitgestellt, welche es ermöglichen, die mindestens eine sphärische Aberration und die mindestens eine nicht-sphärische Aberration des Strahlengangs durch die geeignete Wellenfront-Korrektur besonders gut, genau und/oder zügig zu reduzieren. Indem nämlich die erste Optimierung und die zweite Optimierung getrennt und aufeinanderfolgend durchgeführt werden, kann zunächst – ausgehend von einer Situation, bei der noch signifikante Aberrationen des Strahlengangs vorliegen – auf Grundlage der ersten Optimierung ein grober Einfluss durch die sphärische Aberration reduziert werden. Anschließend kann dann die mindestens eine nicht-sphärische Aberration – ausgehend von einer Situation, bei welcher auf Grundlage der ersten Optimierung bereits die mindestens eine sphärische Aberration reduziert wurde – zügig reduziert werden. Durch die Trennung in zwei Optimierungen, kann insgesamt eine Genauigkeit und Schnelligkeit beim Auffinden der geeigneten Steuerparameter erhöht werden. Im Vergleich zu herkömmlichen Techniken, welche beispielsweise eine gekoppelte Optimierung hinsichtlich aller verschiedenen möglicherweise vorhandenen Aberrationen des Strahlengangs durchführen, kann derart ein besonders robustes Auffinden von Steuerparametern, die die Aberrationen des Strahlengangs insgesamt reduzieren, gewährleistet werden. Beispielsweise ist der freie Parameterraum, der von der ersten Optimierung und der zweiten Optimierung durchsucht wird, vergleichsweise begrenzt. Dadurch kann eine schnellere Konvergenz erzielt werden. Die Trennung des Gesamt-Optimierungsproblems in die erste und die zweite Optimierung spiegelt den physikalischen Sachverhalt der unterschiedlichen Arten von Aberrationen wieder.
- Solche Techniken beruhen auf der Erkenntnis, dass niedrigere Ordnungen der Aberrationen – insbesondere sphärische Aberrationen – oftmals primär zu störenden Bildverfälschungen beitragen. Gemäß den verschiedenen hierin beschriebenen Beispielen kann es daher möglich sein, diese im Rahmen der ersten Optimierung zu korrigieren bzw. zu reduzieren; dadurch kann ein guter Bildkontrast erhalten werden, der dann als Grundlage für die zweite Optimierung dienen kann.

Verschiedene hierin beschriebene Beispiele beruhen weiterhin auf der Erkenntnis, dass sphärische Aberrationen eine Fokusslage verändern können. Dabei kann es oftmals

unerwünscht sein, die Fokusslage bei der Reduktion der Aberrationen zu verändern. Im Allgemeinen kann es daher möglich sein, die folgenden Schritte in der genannten Reihenfolge auszuführen: (I) Finden der Fokusslage; (II) Reduktion der niedrigsten sphärischen Aberration unter Beibehaltung der Fokusslage; (III) Reduktion weiterer sphärischen Aberrationen höherer Ordnung und anderer Aberrationen. Solche Techniken beruhen auf der Erkenntnis, dass die unterschiedlichen Typen von Aberrationen beispielsweise bei einer Beschreibung mittels Zernike-Polynomialtermen voneinander unabhängig sein können, da ein senkrecht zueinander stehendes Funktionensystem ausgebildet wird; dies ermöglicht die individuelle Optimierung.

10 Im Rahmen der ersten Optimierung können unterschiedliche Techniken verwendet werden, um ein Maß für die sphärische Aberration des Strahlengangs als Optimierungskriterium zu bestimmen. Entsprechend können im Rahmen der zweiten Optimierung unterschiedliche Techniken verwendet werden, um ein Maß für die
15 mindestens eine nicht-sphärische Aberration als Optimierungskriterium zu bestimmen. D.h. es können unterschiedliche Gütekriterien verwendet werden. In manchen Beispielen wäre es möglich, dass zum Bestimmen eines solchen Maßes der mindestens einer sphärischen Aberration und/oder der mindestens einen nicht-sphärischen Aberration dedizierte Hardware vorhanden ist. Beispielsweise könnte die optische Vorrichtung einen
20 Wellenfront-Sensor umfassen, der eingerichtet ist, um die Geometrie der Wellenfront des Strahlengangs zu vermessen. Der Wellenfront-Sensor kann zusätzlich zu ein oder mehreren Kameras bereitgestellt werden, die Bilddaten der optischen Vorrichtungen bereitstellen. Es wäre in anderen Beispielen auch möglich, dass z.B. optische Hilfsmittel, wie beispielsweise Führungssterne (englisch „Guide Stars“) in den Strahlengang
25 eingeblendet werden. Dann könnte z.B. basierend auf einer Abweichung in Form und/Position und/Orientierung eines solchen Führungssterns von einem Referenzwert die mindestens eine sphärische Aberration und/oder die mindestens eine nicht-sphärische Aberration bestimmt werden.

30 In noch weiteren Beispielen wäre es aber möglich, dass Bilddaten des Abbilds des Probenobjekts durch eine Kamera der optischen Vorrichtung selbst erfasst werden. Dann könnte das Maß für die mindestens eine sphärische Aberration basierend auf diesen Bilddaten des Abbilds des Probenobjekts bestimmt werden bzw. das Maß für die

mindestens eine nicht-sphärische Aberration basierend auf den Bilddaten des Abbilds des Probenobjekts bestimmt werden. Beispielsweise wäre es in diesem Zusammenhang möglich, dass die erste Optimierung ein erstes Bildgütekriterium der Bilddaten als Optimierungskriterium berücksichtigt und/oder die zweite Optimierung mindestens eine
5 zweites Bildgütekriterium der Bilddaten als Optimierungskriterium berücksichtigt. Beispielsweise könnte das jeweilige Optimierungskriterium durch die entsprechende Optimierung durch geeignete Steuerparameter extremal gestaltet werden. In manchen Beispielen kann das erste Bildgütekriterium gleich dem zweiten Bildgütekriterium sein. Beispiele für das mindestens eine erste Bildgütekriterium und/oder das mindestens eine
10 zweite Bildgütekriterium umfassen: ein globales Schärfemaß; ein lokales Schärfemaß; ein lokales Maß einer Modulationsübertragungsfunktion; ein globales Maß einer Ortsfrequenzraumanalyse; und ein lokales Maß einer Kantensteilheit.

Dabei wäre es in den verschiedenen Beispielen möglich, dass die Steuerung eingerichtet
15 ist, um im Rahmen der ersten Optimierung das adaptive optische Element iterativ basierend auf unterschiedlichen temporären Steuerparametern anzusteuern um mehrere Bilddaten des Abbilds des Probenobjekts zu erhalten. Alternativ oder zusätzlich kann die Steuerung eingerichtet sein, um im Rahmen der zweiten Optimierung das adaptive optische Element iterativ basierend auf unterschiedlichen temporären Steuerparametern
20 anzusteuern, um mehrere Bilddaten des Abbilds des Probenobjekts zu erhalten. In anderen Worten kann es also möglich sein, solange eine Veränderung der Steuerparameter vorzunehmen, bis das Abbild des Probenobjekts die gewünschte Form angenommen hat.

25 In den verschiedenen hierin beschriebenen Beispielen sind unterschiedliche Techniken möglich, um eine Defokus-Aberration zu berücksichtigen. Dabei kann eine Defokus-Aberration beispielsweise unterschiedlich behandelt werden, je nachdem ob das Probenobjekt eine 2D-Ausdehnung aufweist oder eine 3D-Ausdehnung aufweist: Beispielsweise könnte der Probenhalter eingerichtet sein, um ein 3D-Probenobjekt zu
30 fixieren, welches eine Ausdehnung entlang des Strahlengangs aufweist, die größer als ein Tiefenschärfebereich der Abbildungsoptik ist. Beispielsweise könnte ein solches 3D-Probenobjekt ein Probenobjekt aus biologischem Material wie beispielsweise eine Zellkultur etc. sein.

- Dann wäre es möglich, dass die Steuerung weiter eingerichtet ist, um durch Bewegung des Probenhalters eine laterale Querschnittsfläche des 3D-Probenobjekts in der Bildebene des Strahlengangs zu positionieren und um eine weitere Optimierung der
- 5 Steuerparameter zur Reduktion einer Defokus-Aberration des Strahlengangs durchzuführen. Die erste Optimierung kann auf der weiteren Optimierung basieren. Dies bedeutet in anderen Worten, dass die weitere Optimierung vor der ersten Optimierung durchgeführt werden kann. Beispielsweise könnten ein oder mehrere Steuerparameter, die im Rahmen der weiteren Optimierung aufgefunden wurden und die die Defokus-
- 10 Aberration betreffen, im Rahmen der ersten Optimierung als Randbedingungen betrachtet werden. Es wäre auch möglich, dass die Steuerparameter, die im Rahmen der weiteren Optimierung erhalten werden, als Eingang für die erste Optimierung verwendet werden.
- 15 Anstatt einer getrennten Optimierung zur Reduktion der Defokus-Aberration, könnte die Defokus-Aberration auch im Zusammenhang mit der ersten Optimierung und/oder der zweiten Optimierung berücksichtigt werden. In manchen Beispielen wäre es auch möglich, dass die erste Optimierung zur gemeinsamen Reduktion der mindestens einen sphärischen Aberration und der Defokus-Aberration durchgeführt wird. Dies bedeutet,
- 20 dass die erste Optimierung eine Zielgröße aufweisen kann, die sowohl hinsichtlich einer Reduktion der mindestens einen sphärischen Aberration definiert ist, als auch hinsichtlich einer Reduktion der Defokus-Aberration. Beispielsweise wäre es möglich, dass die mindestens eine sphärische Aberration und die Defokus-Aberration durch unterschiedliche Zernike-Polynome definiert werden.
- 25 In manchen Beispielen wäre es auch möglich, dass die Steuerung eingerichtet ist, um die erste Optimierung nicht zur Reduktion einer Defokus-Aberration des Strahlengangs durchzuführen. Dies bedeutet, dass ein oder mehrere Zielgrößen der ersten Optimierung nicht in Bezug auf die Defokus-Aberration festgelegt sein können. Eine solche Technik
- 30 kann insbesondere im Zusammenhang mit 3D-Probenobjekten erstrebenswert sein: Dort können unterschiedliche Positionierungen des 3D-Probenobjekts entlang des Strahlengangs jeweils unterschiedliche Ausschnitte des 3D-Probenobjekts (laterale Querschnittsflächen) zeigen, so dass insbesondere im Zusammenhang mit einem auf

Grundlage des Abbilds des Probenobjekts bestimmten Bildgütekriteriums irreführende Ergebnisse erhalten werden können. Beim Verändern der Defokus-Aberration kann sich nämlich nicht nur das Abbild der lateralen Querschnittsfläche des Probenobjekts verändern, sondern auch der abgebildete lateralen Querschnittsfläche selbst.

5

Zum Beispiel wäre es in diesem Zusammenhang möglich, dass die erste Optimierung einen vorgegebenen Wert oder Wertebereich einer Defokus-Aberration des Strahlengangs als Randbedingung berücksichtigt. Zum Beispiel könnte nämlich der Wert der Defokus-Aberration fixiert werden oder innerhalb des Wertebereichs fixiert werden.

10 Dadurch kann z.B. vermieden werden, dass aufgrund der ersten Optimierung ein Verstellen der Fokusslage in Bezug auf unterschiedliche laterale Querschnittsflächen eines 3D-Probenobjekts erfolgt.

In manchen Beispielen wäre es auch möglich, dass die erste Optimierung eine
15 vorgegebene Beziehung zwischen der mindestens einen sphärischen Aberration und einer Defokus-Aberration des Strahlengangs als Randbedingung berücksichtigt. Solche Techniken können auf der Erkenntnis beruhen, dass eine Korrelation zwischen Zernike-Polynomialausdrücken, die die mindestens eine sphärische Aberration beschreiben, und Zernike-Polynomialausdrücken, die die Defokus-Aberration beschreiben, bestehen kann.

20 Dann kann eine solche Abhängigkeit nach Auffinden von Steuerparametern im Rahmen der ersten Optimierung kompensiert werden. Dadurch kann vermieden werden, dass die Fokusslage in eine andere Querschnittsebene des 3D-Probenobjekts parallel zum Strahlengang verschoben wird.

25 In manchen Beispielen wäre es möglich, dass die zweite Optimierung einen basierend auf der ersten Optimierung bestimmten vorgegebenen Wert oder Wertebereich der mindestens einen sphärischen Aberration als Randbedingung berücksichtigt. Alternativ oder zusätzlich wäre es möglich, dass die zweite Optimierung einen basierend auf der ersten Optimierung bestimmten vorgegebenen Wert oder Wertebereich der Defokus-
30 Aberration als weitere Randbedingung berücksichtigt. Derart kann die Abhängigkeit der zweiten Optimierung basierend auf der ersten Optimierung implementiert werden.

In einem Beispiel umfasst ein Verfahren das Erzeugen eines Abbilds eines Probenobjekts in einer Bildebene eines Strahlengangs einer Abbildungsoptik. Das Verfahren umfasst auch das Durchführen einer ersten Optimierung von Steuerparametern eines im Strahlengang angeordneten adaptiven optischen Elements zur Reduktion mindestens einer sphärischen Aberration des Strahlengangs. Das Verfahren umfasst ferner das Durchführen einer zweiten Optimierung der Steuerparameter zur Reduktion mindestens einer nicht-sphärischen Aberration des Strahlengangs basierend auf der ersten Optimierung. Das Verfahren umfasst weiterhin das Steuern des adaptiven optischen Elements basierend auf den Steuerparametern.

Die oben dargelegten Merkmale und Merkmale, die nachfolgend beschrieben werden, können nicht nur in den entsprechenden explizit dargelegten Kombinationen verwendet werden, sondern auch in weiteren Kombinationen oder isoliert, ohne den Schutzbereich der vorliegenden Erfindung zu verlassen.

KURZE BESCHREIBUNG DER FIGUREN

Die oben beschriebenen Eigenschaften, Merkmale und Vorteile dieser Erfindung sowie die Art und Weise, wie diese erreicht werden, werden klarer und deutlicher verständlich im Zusammenhang mit der folgenden Beschreibung der Ausführungsbeispiele, die im Zusammenhang mit den Zeichnungen näher erläutert werden.

FIG. 1 illustriert schematisch eine optische Vorrichtung mit einer Abbildungsoptik, einem adaptiven optischen Element und einer Steuerung gemäß verschiedener Beispiele.

FIG. 2 ist ein Flussdiagramm eines Verfahrens gemäß verschiedener Beispiele.

FIG. 3 illustriert schematisch das Durchführen einer Optimierung gemäß verschiedener Beispiele.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG VON AUSFÜHRUNGSFORMEN

Nachfolgend wird die vorliegende Erfindung anhand bevorzugter Ausführungsformen unter Bezugnahme auf die Zeichnungen näher erläutert. In den Figuren bezeichnen gleiche Bezugszeichen gleiche oder ähnliche Elemente. Die Figuren sind schematische Repräsentationen verschiedener Ausführungsformen der Erfindung. In den Figuren dargestellte Elemente sind nicht notwendigerweise maßstabsgetreu dargestellt. Vielmehr sind die verschiedenen in den Figuren dargestellten Elemente derart wiedergegeben, dass ihre Funktion und genereller Zweck dem Fachmann verständlich wird. In den Figuren dargestellte Verbindungen und Kopplungen zwischen funktionellen Einheiten und Elementen können auch als indirekte Verbindung oder Kopplung implementiert werden. Eine Verbindung oder Kopplung kann drahtgebunden oder drahtlos implementiert sein. Funktionale Einheiten können als Hardware, Software oder eine Kombination aus Hardware und Software implementiert werden.

Nachfolgend werden Techniken zur Wellenfront-Korrektur beschrieben. Die hierin beschriebenen Techniken ermöglichen es, zuverlässig und zügig Steuerparameter für ein adaptives optisches Element im Strahlengang einer Abbildungsoptik einer optischen Vorrichtung aufzufinden, die Aberrationen des Strahlengangs reduzieren. Dazu werden gemäß verschiedener Beispiele mehrere getrennte Optimierungen durchgeführt. Eine erste Optimierung dient der Reduktion von mindestens einer sphärischen Aberration; während eine zweite Optimierung der Reduktion von mindestens einer nicht-sphärischen Aberration dient. Indem unterschiedliche Optimierungen zur Reduktion der mindestens einen sphärischen Aberration und der mindestens einen nicht-sphärischen Aberration verwendet werden, ist es möglich, eine besonders zügige und robuste Technik zum Bestimmen der Steuerparameter auf Grundlage der Optimierungen zu implementieren.

In manchen Beispielen werden die hierin beschriebenen Techniken zur Wellenfront-Korrektur bei der Abbildung eines 3D-Probenobjekts verwendet, d.h. eines Probenobjekts welches eine Ausdehnung entlang des Strahlengangs hat, die größer ist als ein Tiefenschärfebereich der Abbildungsoptik. Diese Techniken beruhen auf der Erkenntnis, dass eine freie Optimierung - beispielsweise auch in Bezug auf eine Defokus-Aberration - für solche 3D-Probenobjekte manchmal nicht gewünscht sein kann. Insbesondere kann es bei der freien Optimierung der Defokus-Aberration vorkommen, dass eine Fokusslage des 3D-Probenobjekts verändert wird. Dadurch kann es vorkommen, dass

unterschiedliche laterale Querschnittsflächen des 3D-Probenobjekts abgebildet werden, so dass der Informationsgehalt des derart erhaltenen Bilds ungewollt abgeändert werden kann. Um eine solche Veränderung der Fokuslage zu vermeiden, kann es in manchen Beispielen möglich sein, einen bestimmten Wert oder Wertebereich der Defokus-

5 Aberration als Randbedingung beim Durchführen einer Optimierung, z.B. zur Reduktion mindestens eine nicht-sphärischen Aberration oder zur Reduktion mindestens einer sphärischen Aberration, zu berücksichtigen. In manchen Beispielen kann insbesondere eine Beziehung zwischen der mindestens einen sphärischen Aberration und der Defokus-

10 Aberration berücksichtigt werden: dies bedeutet, dass eine gewisse Veränderung der mindestens einen sphärischen Aberration in einer durch die Beziehung bestimmten weiteren Veränderung der Defokus-Aberration resultieren kann, um eine Veränderung der Fokuslage des 3D-Probenobjekts zu vermeiden. Dies beruht auf der Erkenntnis, dass die Fokuslage durch den Radius einer Kugelwelle beschrieben werden kann; die Kugelwelle kann als Entwicklung in rotationssymmetrische Zernike-Polynomialterme,

15 d.h. sphärische Aberrationen, beschrieben werden.

FIG. 1 illustriert Aspekte in Bezug auf eine optische Vorrichtung 100. Die optische Vorrichtung 100 umfasst einen Probenhalter 101, wobei im Allgemeinen der Probenhalter 101 optional ist.

20 Die optische Vorrichtung 100 umfasst ferner eine Abbildungsoptik 102 sowie eine Kamera 103. Ein Strahlengang 109 ist durch die Abbildungsoptik 102 definiert und verläuft zwischen dem Probenhalter 101 und der Kamera 103. Licht, das entlang des Strahlengangs 109 verläuft, kann zur Bildgebung eines durch den Probenhalter 101 fixierten Probenobjekts, beispielsweise eines 3D-Probenobjekts, verwendet werden.

25

In FIG. 1 ist auch dargestellt, dass die Abbildungsoptik 102 ein adaptives optisches Element 105 umfasst. In anderen Beispielen wäre es auch möglich, dass das adaptive optische Element 105 getrennt von der Abbildungsoptik 102 angeordnet ist.

30 Eine Steuerung 104 ist sowohl mit dem adaptiven optischen Element 105, als auch mit der Kamera 103 verbunden. Beispielsweise könnte die Steuerung 104 durch einen

Mikrocontroller, FPGA, ASIC oder einen Prozessor im Zusammenhang mit Software implementiert werden.

FIG. 2 ist ein Flussdiagramm eines beispielhaften Verfahrens. Zunächst wird in Schritt 1001 ein Probenobjekt in Bezug auf den Strahlengang 109 positioniert. Beispielsweise wäre es in diesem Zusammenhang möglich, dass das Probenobjekt mittels des Probenhalters 101 im Strahlengang 109 fixiert wird.

Anschließend wird eine erste Optimierung in Schritt 1002 durchgeführt. Die Optimierung ermittelt Steuerparameter für das adaptive optische Element 105. Die erste Optimierung in Schritt 1002 dient dabei zur Reduktion einer sphärischen Aberration des Strahlengangs 109. Dies kann bedeuten, dass die Zielgröße der Optimierung ein oder mehrere Zernike-Polynomialterme, die die sphärische Aberration des Strahlengangs 109 beschreiben, sind. Beispielsweise sind gemäß der Noll-Indizierung der Zernike-Polynomialterme die Indizes 1, 4 und 11 sphärische Aberrationen, siehe z.B. NOLL, Robert J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence. *JOsA*, 1976, 66. Jg., Nr. 3, S. 207-211. Dabei beschreiben die Indizes 4 und 11 sphärische Aberrationen höherer Ordnung als der Index 1. Manchmal kann die erste Optimierung in Schritt 1002 allein die Reduktion der sphärischen Aberration niedrigster Ordnung betreffen, wobei ein oder mehrere sphärische Aberrationen höherer Ordnung durch die zweite Optimierung in Schritt 1003 reduziert werden.

Anschließend wird in Schritt 1003 eine zweite Optimierung durchgeführt. Auch im Rahmen der zweiten Optimierung in Schritt 1003 werden Steuerparameter für das adaptive optische Element 105 ermittelt. Dabei dient die zweite Optimierung in Schritt 1003 der Reduktion mindestens einer nicht-sphärischen Aberration des Strahlengangs 109. Dies kann bedeuten, dass die Zielgröße der Optimierung ein oder mehrere Zernike-Polynomialterme, die die nicht-sphärische Aberration des Strahlengangs 109 beschreiben, sind.

In manchen Beispielen basiert das Durchführen der zweiten Optimierung in Schritt 1003 auf dem Durchführen der ersten Optimierung in Schritt 1002. Dies kann beispielsweise bedeuten, dass die zweite Optimierung in Schritt 1003 einen basierend auf der ersten

Optimierung in Schritt 1002 vorgegebenen Wert oder Wertebereich der mindestens einen sphärischen Aberration als Randbedingung berücksichtigt. Alternativ oder zusätzlich wäre es auch möglich, dass das Durchführen der zweiten Optimierung in Schritt 1003 ausgehend von bestimmten Steuerparametern für das adaptive optische Element 105 geschieht, die aus der ersten Optimierung in Schritt 1002 erhalten werden.

Die in FIG. 2 beschriebenen Techniken können insbesondere in Bezug auf ein 3D-Probenobjekt verwendet werden, welches beispielsweise durch den Probenhalter 101 fixiert wird. Das 3D-Probenobjekt kann eine Ausdehnung entlang des Strahlengangs 109 aufweisen, die größer als ein Tiefenschärfebereich der Abbildungsoptik 102 ist.

Je nach Stellung des Probenhalters 101 bzw. je nach Positionierung in Schritt 1001 können dann unterschiedliche Querschnittsflächen des 3D-Probenobjekts in einer Bildebene des Strahlengangs 109, die durch die Kamera 103 abgebildet wird, positioniert werden. In unterschiedlichen Querschnittsflächen des 3D-Probenobjekts können unterschiedliche Merkmale oder Strukturen angeordnet sein, so dass je nach Wahl der Querschnittsebene die durch die Kamera 103 abgebildete Information variieren kann. Deshalb kann es in manchen Beispielen besonders erstrebenswert sein, dass eine Korrektur der Defokus-Aberration nicht zu einer Verschiebung der Fokusposition des 3D-Probenobjekts führt. In manchen Beispielen kann deshalb die Steuerung 104 eingerichtet sein, um eine weitere Optimierung der Steuerparameter zur Reduktion der Defokus-Aberration des Strahlengangs 109 durchzuführen, getrennt von der ersten Optimierung in Schritt 1002 und der zweiten Optimierung in Schritt 1003. In manchen Beispielen wäre es möglich, dass die erste Optimierung in Schritt 1002 auf dieser weiteren Optimierung basiert, d.h. dass die weitere Optimierung zur Reduktion der Defokus-Aberration vor Schritt 1002 durchgeführt wird. In anderen Beispielen könnte diese weitere Optimierung zur Reduktion der Defokus-Aberration aber auch in Zwischenschritten 1002 und 1003 durchgeführt werden oder aber auch nach Schritt 1003. Im Rahmen einer solchen dedizierten weiteren Optimierung zur Reduktion der Defokus-Aberration kann besonders gut sichergestellt werden, dass es nicht zu einer ungewollten Veränderung der Fokuslage des 3D-Probenobjekts kommt. Insbesondere könnte dies dadurch sichergestellt werden, dass Wechselwirkungen der Defokus-Aberration mit anderen Aberrationen,

beispielsweise einer sphärischen Aberration, im Rahmen der weiteren Optimierung durch Fixierung der entsprechenden Werte vermieden werden.

5 In anderen Beispielen wäre es aber auch möglich, dass die Steuerung 104 eingerichtet ist, um die erste Optimierung in Schritt 1002 zur gemeinsamen Reduktion der mindestens einen sphärischen Aberration und der Defokus-Aberration durchzuführen. Eine solche Implementierung könnte z.B. insbesondere im Zusammenhang mit 2D-Probenobjekten erstrebenswert sein, die keine Ausdehnung entlang des Strahlengangs aufweisen, die größer ist, als der Tiefenschärfebereich der Abbildungsoptik 102. In einem solchen Fall
10 könnte nämlich eine Veränderung der Fokuslage des 2D-Probenobjekts keinen oder keinen signifikanten negativen Einfluss in Bezug auf die in einem entsprechenden Bild des Probenobjekts beinhaltete Information haben.

In anderen Beispielen wäre es auch möglich, dass die Steuerung 104 eingerichtet ist, um
15 die erste Optimierung in Schritt 1002 nicht zur Reduktion der Defokus-Aberration durchzuführen. Dies kann bedeuten, dass zum Beispiel Zernike-Polynomialterme, die die Defokus-Aberration betreffen, bei einem bestimmten Wert oder innerhalb eines bestimmten Wertebereichs fixiert verbleiben. Beispielsweise könnte die erste Optimierung in Schritt 1002 einen vorgegebenen Wert oder Wertebereich der Defokus-
20 Aberration als Randbedingung berücksichtigen. Dieser vorgegebene Wert oder Wertebereich könnte sie beispielsweise aus einem initialen Wert oder Wertebereich für die Defokus-Aberration unmittelbar nach Durchführen von Schritt 1001 ableiten.

In manchen Beispielen kann es vorkommen, dass das Durchführen der ersten
25 Optimierung in Schritt 1002 zur Reduktion der sphärischen Aberration auch eine inhärente Veränderung der Defokus-Aberration bewirkt: dies kann beispielsweise vorkommen, wenn eine Kopplung zwischen den Zernike-Polynomialtermen für die sphärische Aberration und für die Defokus-Aberration vorliegt. Insbesondere in einem solchen Fall kann es erstrebenswert sein, dass die erste Optimierung in Schritt 1002 eine
30 vorgegebene Beziehung zwischen der mindestens einen sphärischen Aberration und der Defokus-Aberration als Randbedingung berücksichtigt. Diese Beziehung kann nämlich der Kopplung zwischen den Zernike-Polynomialtermen entsprechen. Derart kann erreicht

werden, dass eine Veränderung der Steuerparameter zur Reduktion der sphärischen Aberration nicht in einer Verschiebung der Fokusslage des 3D-Probenobjekts resultiert.

FIG. 3 ist ein Flussdiagramm eines beispielhaften Verfahrens. FIG. 3 illustriert Aspekte in Bezug auf das Durchführen der ersten Optimierung in Schritt 1002 bzw. in Bezug auf das Durchführen der zweiten Optimierung in Schritt 1003.

Zunächst werden in Schritt 1011 mittels der Kamera 103 Bilddaten des Abbilds des Probenobjekts erfasst. Wenn es sich um ein 3D-Probenobjekt handelt, bilden die Bilddaten 1011 eine Querschnittsfläche des 3D-Probenobjekts ab, die in der entsprechenden Bildebene der Abbildungsoptik 102 positioniert ist. Die Kamera kann z.B. mehrere Bildpunkte aufweisen, wobei unterschiedliche Bildpunkte unterschiedlichen lateralen Positionen senkrecht zum Strahlengang zugeordnet sind.

In Schritt 1002 wird dann überprüft, ob ein oder mehrere Bildgütekriterien durch das Abbild des Probenobjekts in den aktuellen Bilddaten aus der aktuellen Iteration von Schritt 1011 erfüllt sind. Die Bildgütekriterien können z.B. für die erste Optimierung in Schritt 1002 und die zweite Optimierung in Schritt 1003 gleich oder unterschiedlich gewählt werden. Beispiele für solche Bildgütekriterien umfassen: ein globales Schärfemaß; ein lokales Schärfemaß; ein lokales Maß einer Modulationsübertragungsfunktion; ein globales Maß einer Ortsfrequenzraumanalyse; und ein lokales Maß einer Kantensteilheit.

Wenn das Bildgütekriterium in Schritt 1002 noch nicht erfüllt ist, d.h. zum Beispiel noch keinen Extremwert angenommen hat, wird in Schritt 1013 ein bestimmter veränderter Satz von Steuerparametern für das adaptive optische Element bestimmt und anschließend in Schritt 1014 das adaptive optische Element 105 basierend auf dem in Schritt 1003 bestimmten Satz von Steuerparametern angesteuert. Dies bedeutet, dass eine andere Wellenfront-Korrektur implementiert wird. Beispielsweise könnte eine inkrementelle Veränderung der Wellenfront-Korrektur verwendet werden. Die Art und Stärke der Veränderung kann durch den im Rahmen der entsprechenden Optimierung verwendeten Optimierungsalgorithmus bestimmt sein.

Dann werden in Schritt 1011 erneut Bilddaten durch die Kamera 103 erfasst. In Schritt 1002 wird erneut überprüft, ob das Bildgütekriterium erfüllt ist, d.h. zum Beispiel einen Extremwert angenommen hat. Anstatt des Auffindens des Extremwerts für das Bildgütekriterium Schritt 1012 wäre es auch möglich, dass ein oder mehrere andere Abbruchkriterien für das Durchführen der entsprechenden Optimierung verwendet werden. Beispiele für solche Abbruchkriterien wären z.B. Anzahl der Iterationen oder Erreichen eines vorgegebenen Werts oder Wertebereichs für das Bildgütekriterium.

Aus dem Beispiel der FIG. 3 ist ersichtlich, dass die Steuerung 104 eingerichtet ist, um im Rahmen der entsprechenden Optimierung das adaptive optische Element 105 iterativ basierend auf unterschiedlichen temporären Steuerparametern aus Schritt 1013 anzusteuern, um mehrere Bilddaten des Abbilds des Probenobjekts in den verschiedenen Iterationen von Schritt 1011 zu erhalten.

Zusammenfassend wurden voranstehend Techniken zur Wellenfront-Korrektur beschrieben, die verschiedene Aberrationen eines Strahlengangs einer Abbildungsoptik einer optischen Vorrichtung besonders schnell und mit einer besonders großen „Fangbereich“ reduzieren. Dabei wird in einer ersten Optimierung der Hauptteil der Aberrationen in der optischen Vorrichtung, typischerweise Defokus und sphärische Aberration, in einem vergleichsweise niedrigdimensionalen Raum optimiert, bei welchen ein oder mehrere nicht-sphärische Aberrationen unberücksichtigt bleiben. Beispielsweise könnte eine erste Optimierung durchgeführt werden, zur Reduktion einer oder mehrerer sphärischer Aberrationen eines Strahlengangs. Dabei könnten ein oder mehrere nicht-sphärische Aberrationen des Strahlengangs unberücksichtigt bleiben, d.h. entsprechende Werte, beispielsweise von Zernike-Polynomialtermen fixiert verbleiben oder als Randbedingungen vorgegeben sein. Die ein oder mehreren nicht-sphärischen Aberrationen des Strahlengangs können dann beim Durchführen einer zweiten Optimierung, die auf der ersten Optimierung aufbaut, reduziert werden.

Die hierin beschriebenen Techniken können beispielsweise insbesondere im Zusammenhang mit einem Bildgütekriterium, das aus Bilddaten eines Abbilds des Probenobjekts, dass durch eine Kamera erhalten wird, implementiert werden. In einem solchen Fall ist es entbehrlich, dass zusätzliche Hardware für die Wellenfront-Korrektur

vorgesehen wird, wie beispielsweise ein Wellenfront-Sensor oder ein Führungsstern. Neben einer einfacheren Implementierung ohne einen Wellenfront-Sensor, kann eine genauere Reduktion von Aberrationen erfolgen: insbesondere können auch solche Aberrationen der Abbildungsoptik berücksichtigt werden, die durch die bestimmte

5 Positionierung des Wellenfront-Sensors bei solchen herkömmlichen Referenzimplementierungen nicht vermessen werden können.

In solchen Beispielen wäre es auch möglich, dass lediglich Teile der Bilddaten des Abbilds des Probenobjekts bei dem Durchführen der ersten Optimierung und/oder der

10 zweiten Optimierung berücksichtigt werden. Dadurch können Aberrationen orts aufgelöst für unterschiedliche laterale Positionen senkrecht zum Strahlengang reduziert werden.

Selbstverständlich können die Merkmale der vorab beschriebenen Ausführungsformen und Aspekte der Erfindung miteinander kombiniert werden. Insbesondere können die

15 Merkmale nicht nur in den beschriebenen Kombinationen, sondern auch in anderen Kombinationen oder für sich genommen verwendet werden, ohne das Gebiet der Erfindung zu verlassen.

Patentansprüche

1. Optische Vorrichtung (100), die umfasst:
 - eine Abbildungsoptik (102), die eingerichtet ist, um einen Strahlengang (109)
- 5 mit einem in einer Bildebene des Strahlengangs angeordneten Abbild eines Probenobjekts zu definieren,
 - ein adaptives optisches Element (105), das im Strahlengang angeordnet ist,
- und
 - eine Steuerung (104), die eingerichtet ist, um
- 10 - eine erste Optimierung von Steuerparametern des adaptiven optischen Elements zur Reduktion mindestens einer sphärischen Aberration des Strahlengangs durchzuführen,
 - basierend auf der ersten Optimierung eine zweite Optimierung der
- Steuerparameter zur Reduktion mindestens einer nicht-sphärischen Aberration des
- 15 Strahlengangs durchzuführen, und
 - das adaptive optische Element basierend auf den Steuerparametern zu steuern.
2. Optische Vorrichtung nach Anspruch 1, die weiterhin umfasst:
 - eine Kamera (103), die eingerichtet ist, um Bilddaten des Abbilds des
- 20 Probenobjekts zu erfassen,
 - wobei die erste Optimierung mindestens ein erstes Bildgütekriterium der Bilddaten als Optimierungskriterium berücksichtigt und/oder wobei die zweite
- Optimierung mindestens ein zweites Bildgütekriterium der Bilddaten als
- 25 Optimierungskriterium berücksichtigt.
3. Optische Vorrichtung nach Anspruch 2,
 - wobei die Steuerung eingerichtet ist, um im Rahmen der ersten Optimierung das
- adaptive optische Element iterativ basierend auf unterschiedlichen temporären
- 30 Steuerparametern anzusteuern um mehrere Bilddaten des Abbilds des Probenobjekts zu erhalten, und/oder
- wobei die Steuerung eingerichtet ist, um im Rahmen der zweiten Optimierung das
- adaptive optische Element iterativ basierend auf unterschiedlichen temporären

Steuerparametern anzusteuern, um mehrere Bilddaten des Abbilds des Probenobjekts zu erhalten.

4. Optische Vorrichtung nach Anspruch 2 oder 3,
5 wobei das mindestens eine erste Bildgütekriterium und/oder das mindestens eine zweite Bildgütekriterium aus der Gruppe ausgewählt sind, die umfasst: ein globales Schärfemaß; ein lokales Schärfemaß; ein lokales Maß einer Modulationsübertragungsfunktion; ein globales Maß einer Ortsfrequenzraumanalyse; und ein lokales Maß einer Kantensteilheit.
10
5. Optische Vorrichtung nach einem der voranstehenden Ansprüche, die weiterhin umfasst:
 - einen Probenhalter (101), der eingerichtet ist, um ein 3D-Probenobjekt zu fixieren, das eine Ausdehnung entlang des Strahlengangs aufweist, die größer als ein
15 Tiefenschärfebereich der Abbildungsoptik ist.
6. Optische Vorrichtung nach Anspruch 5,
 wobei die Steuerung weiterhin eingerichtet ist, um durch Bewegung des Probenhalters eine Querschnittsebene des 3D-Probenobjekts in der Bildebene zu
20 positionieren und um eine weitere Optimierung der Steuerparameter zur Reduktion einer Defokus-Aberration des Strahlengangs durchzuführen,
 wobei die erste Optimierung auf der weiteren Optimierung basiert.
7. Optische Vorrichtung nach einem der voranstehenden Ansprüche,
25 wobei die Steuerung eingerichtet ist, um die erste Optimierung zur gemeinsamen Reduktion der mindestens einen sphärischen Aberration und einer Defokus-Aberration des Strahlengangs durchzuführen.
8. Optische Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1-6,
30 wobei die Steuerung eingerichtet ist, um die erste Optimierung nicht zur Reduktion einer Defokus-Aberration des Strahlengangs durchzuführen.
9. Optische Vorrichtung nach einem der voranstehenden Ansprüche,

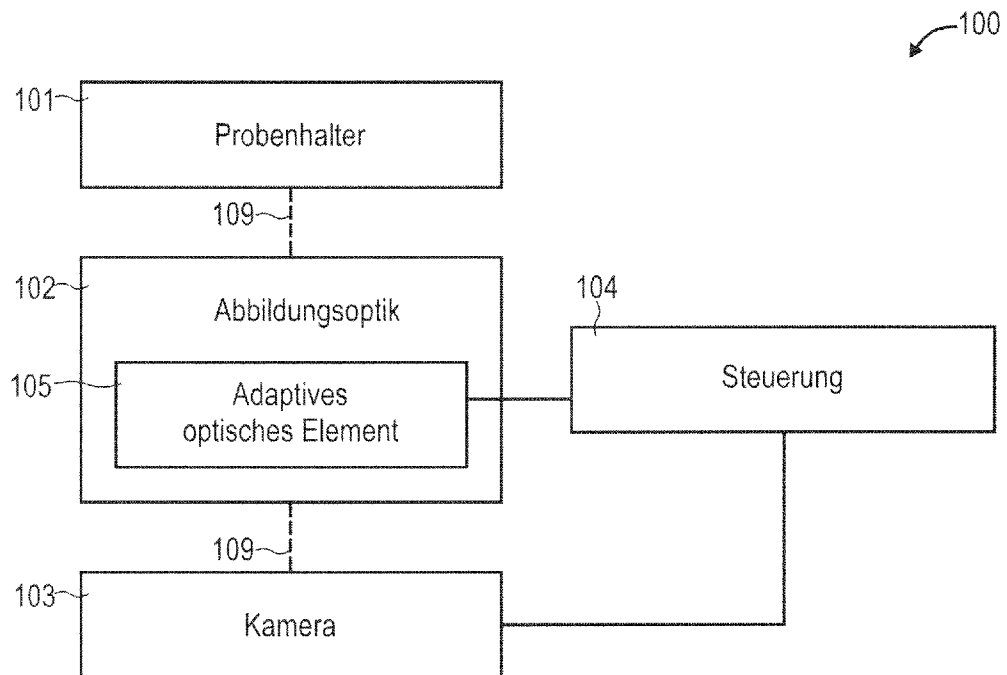
wobei die erste Optimierung einen vorgegebenen Wert oder Wertebereich einer Defokus-Aberration des Strahlengangs als Randbedingung berücksichtigt.

- 5 10. Optische Vorrichtung nach einem der voranstehenden Ansprüche,
wobei die erste Optimierung eine vorgegebene Beziehung zwischen der
mindestens einen sphärischen Aberration und einer Defokus-Aberration des
Strahlengangs als Randbedingung berücksichtigt.
- 10 11. Optische Vorrichtung nach einem der voranstehenden Ansprüche,
wobei die zweite Optimierung einen basierend auf der ersten Optimierung
bestimmten vorgegebenen Wert oder Wertebereich der mindestens einen sphärischen
Aberration als Randbedingung berücksichtigt und optional eine Defokus-Aberration des
Strahlengangs als weitere Randbedingung berücksichtigt.
- 15 12. Optische Vorrichtung nach einem der voranstehenden Ansprüche,
wobei die mindestens eine nicht-sphärische Aberration aus folgender Gruppe
ausgewählt ist: eine Koma-Aberration; eine Trefoil-Aberration; eine Tip-Aberration; eine
Tilt-Aberration; eine Astigmatismus Aberration; eine Ashtray-Aberration; und eine
Piston-Aberration.
- 20 13. Optische Vorrichtung nach einem der voranstehenden Ansprüche,
wobei die erste Optimierung zur Reduktion einer ersten sphärischen Aberration
des Strahlengangs eingerichtet ist,
wobei die zweite Optimierung zur Reduktion einer zweiten sphärischen
25 Aberration des Strahlengangs eingerichtet ist,
wobei die zweite sphärische Aberration höherer Ordnung ist, als die erste
sphärische Aberration.
- 30 14. Verfahren, das umfasst:
- Erzeugen eines Abbilds eines Probenobjekts in einer Bildebene eines
Strahlengangs einer Abbildungsoptik,

- Durchführen einer ersten Optimierung von Steuerparametern eines im Strahlengang angeordneten adaptiven optischen Elements zur Reduktion mindestens einer sphärischen Aberration des Strahlengangs,
 - basierend auf der ersten Optimierung: Durchführen einer zweiten Optimierung der Steuerparameter zur Reduktion mindestens einer nicht-sphärischen Aberration des Strahlengangs, und
 - Steuern des adaptiven optischen Elements basierend auf den Steuerparametern.
- 10 15. Verfahren nach Anspruch 14,
- wobei das Verfahren von der optischen Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1-13 durchgeführt wird.

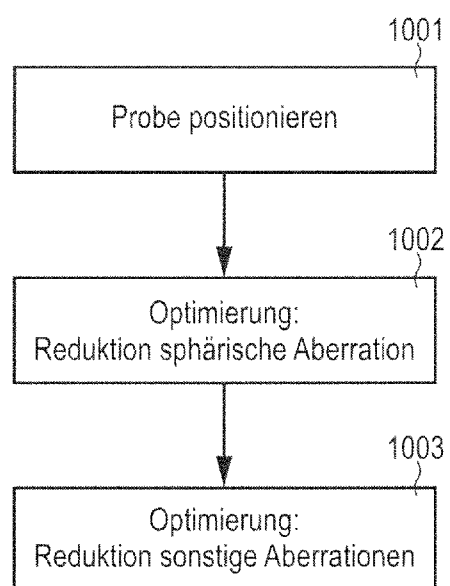
1/3

FIG. 1



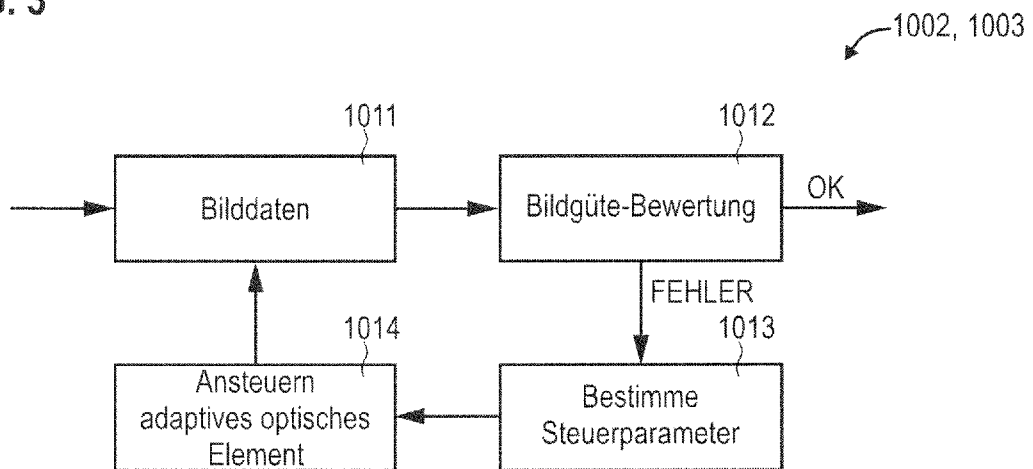
2/3

FIG. 2



3/3

FIG. 3



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2018/056862

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. G02B21/00 G02B26/06 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, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	AUORE MASSON ET AL: "High-resolution in-depth imaging of optically cleared thick samples using an adaptive SPIM", SCIENTIFIC REPORTS, vol. 5, no. 1, 18 November 2015 (2015-11-18), XP055488742, DOI: 10.1038/srep16898 Seite 4, letzter Absatz; Seite 5, Abschnitt "Image quality assessment"; Seite 11, dritter Absatz; figures 1, S6 -----	1-15
X	JP 2015 031812 A (NIKON CORP; UNIV HOKKAIDO) 16 February 2015 (2015-02-16) paragraphs [0020], [0023], [0036] - [0047]; figures 1,2,8 ----- -/-	1-15



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

29 June 2018

Date of mailing of the international search report

20/07/2018

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

Kaiser, Peter

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2018/056862

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	DANIEL BURKE ET AL: "Adaptive optics correction of specimen-induced aberrations in single-molecule switching microscopy", OPTICA, vol. 2, no. 2, 19 February 2015 (2015-02-19), page 177, XP055487641, DOI: 10.1364/OPTICA.2.000177	1-5,12, 15
A	Abschnitt 3; Seite 182, linke Spalte, erster Absatz; figures 1,4	6-11
A	----- Aur�lie Facomprez ET AL: "Accuracy of correction in modal sensorless adaptive optics", Optics express, 30 January 2012 (2012-01-30), pages 2598-612, XP055487655, United States DOI: 10.1364/OE.20.002598 Retrieved from the Internet: URL:https://www.osapublishing.org/DirectPDFAccess/28A70D87-CC51-C350-9803FD70C233B6FC_226697/oe-20-3-2598.pdf?da=1&id=226697&seq=0&mobile=no [retrieved on 2018-06-27] Seiten 2599-2601, 2608, 2610-2611;; figure 1	1-15
A	----- Martin J Booth ET AL: "Applications Part 1: Indirect Wavefront Sensing" In: "Adaptive Optics for Biological Imaging", 26 April 2013 (2013-04-26), Chapman and Hall/CRC, XP055488881, ISBN: 978-1-4398-5018-3 pages 175-189, Abschnitt 10.6; figure 10.4	1-15
X	----- V. FRAISIER ET AL: "Adaptive optics in spinning disk microscopy: improved contrast and brightness by a simple and fast method : ADAPTIVE OPTICS IN SPINNING DISK MICROSCOPY", JOURNAL OF MICROSCOPY, vol. 259, no. 3, 2 September 2015 (2015-09-02), pages 219-227, XP055487521, GB ISSN: 0022-2720, DOI: 10.1111/jmi.12256 Seite 3, rechte Spalte: "Image based iterative algorithms"; Seite 5, linke Spalte; figures 1,3	1-15
	----- -/--	

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2018/056862

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	BOOTH M J ET AL: "Adaptive aberration correction in a confocal microscope", PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES, NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES, US, vol. 99, no. 9, 30 April 2002 (2002-04-30), pages 5788-5792, XP002407828, ISSN: 0027-8424, DOI: 10.1073/PNAS.082544799 Seite 5790, rechte Spalte; figure 2 -----	1-15

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2018/056862

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
JP 2015031812 A	16-02-2015	JP 6178656 B2 JP 2015031812 A	09-08-2017 16-02-2015

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES INV. G02B21/00 G02B26/06 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, WPI Data		
C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	AURORE MASSON ET AL: "High-resolution in-depth imaging of optically cleared thick samples using an adaptive SPIM", SCIENTIFIC REPORTS, Bd. 5, Nr. 1, 18. November 2015 (2015-11-18), XP055488742, DOI: 10.1038/srep16898 Seite 4, letzter Absatz; Seite 5, Abschnitt "Image quality assessment"; Seite 11, dritter Absatz; Abbildungen 1, S6 -----	1-15
X	JP 2015 031812 A (NIKON CORP; UNIV HOKKAIDO) 16. Februar 2015 (2015-02-16) Absätze [0020], [0023], [0036] - [0047]; Abbildungen 1,2,8 ----- -/--	1-15
☒ 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		Absendedatum des internationalen Recherchenberichts
29. Juni 2018		20/07/2018
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 Kaiser, Peter

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	DANIEL BURKE ET AL: "Adaptive optics correction of specimen-induced aberrations in single-molecule switching microscopy", OPTICA, Bd. 2, Nr. 2, 19. Februar 2015 (2015-02-19), Seite 177, XP055487641, DOI: 10.1364/OPTICA.2.000177	1-5,12, 15
A	Abschnitt 3; Seite 182, linke Spalte, erster Absatz; Abbildungen 1,4	6-11
A	----- Aurélie Facomprez ET AL: "Accuracy of correction in modal sensorless adaptive optics", Optics express, 30. Januar 2012 (2012-01-30), Seiten 2598-612, XP055487655, United States DOI: 10.1364/OE.20.002598 Gefunden im Internet: URL:https://www.osapublishing.org/DirectPDFAccess/28A70D87-CC51-C350-9803FD70C233B6FC_226697/oe-20-3-2598.pdf?da=1&id=226697&seq=0&mobile=no [gefunden am 2018-06-27] Seiten 2599-2601, 2608, 2610-2611;; Abbildung 1	1-15
A	----- Martin J Booth ET AL: "Applications Part 1: Indirect Wavefront Sensing" In: "Adaptive Optics for Biological Imaging", 26. April 2013 (2013-04-26), Chapman and Hall/CRC, XP055488881, ISBN: 978-1-4398-5018-3 Seiten 175-189, Abschnitt 10.6; Abbildung 10.4	1-15
X	----- V. FRAISIER ET AL: "Adaptive optics in spinning disk microscopy: improved contrast and brightness by a simple and fast method : ADAPTIVE OPTICS IN SPINNING DISK MICROSCOPY", JOURNAL OF MICROSCOPY, Bd. 259, Nr. 3, 2. September 2015 (2015-09-02), Seiten 219-227, XP055487521, GB ISSN: 0022-2720, DOI: 10.1111/jmi.12256 Seite 3, rechte Spalte: "Image based iterative algorithms"; Seite 5, linke Spalte; Abbildungen 1,3	1-15
	----- -/-	

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	BOOTH M J ET AL: "Adaptive aberration correction in a confocal microscope", PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES, NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES, US, Bd. 99, Nr. 9, 30. April 2002 (2002-04-30), Seiten 5788-5792, XP002407828, ISSN: 0027-8424, DOI: 10.1073/PNAS.082544799 Seite 5790, rechte Spalte; Abbildung 2 -----	1-15

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

PCT/EP2018/056862

Formblatt PCT/ISA/210 (Anhang Patentfamilie) (April 2005)