



(10) **DE 10 2016 114 375 A1** 2018.02.08

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2016 114 375.8**  
(22) Anmeldetag: **03.08.2016**  
(43) Offenlegungstag: **08.02.2018**

(51) Int Cl.: **G02B 27/00** (2006.01)  
**G02B 21/36** (2006.01)  
**G02B 27/50** (2006.01)  
**G01B 11/24** (2006.01)

(71) Anmelder:  
**Humboldt-Universität zu Berlin, 10099 Berlin, DE**

(74) Vertreter:  
**LKGLOBAL | Lorenz & Kopf PartG mbB**  
**Patentanwälte, 20354 Hamburg, DE**

(72) Erfinder:  
**Müller, Johannes, 12437 Berlin, DE; Koch,**  
**Christoph, 12557 Berlin, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

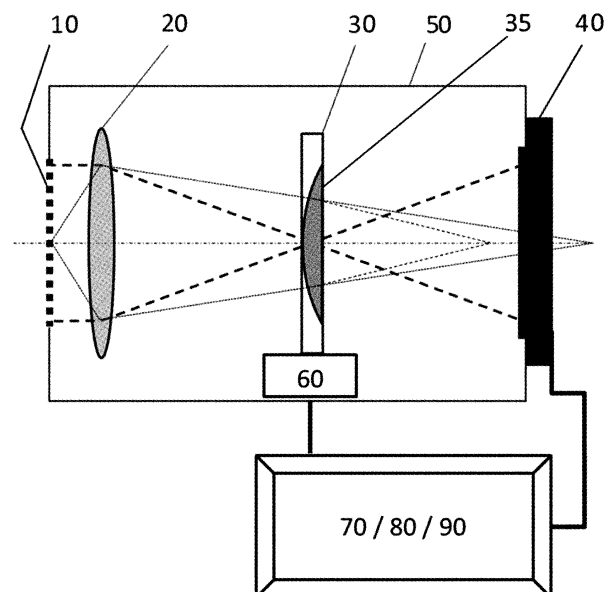
<b>DE</b>	<b>10 2013 016 752</b>	<b>A1</b>
<b>US</b>	<b>2003 / 0 201 393</b>	<b>A1</b>
<b>US</b>	<b>2005 / 0 092 930</b>	<b>A1</b>
<b>WO</b>	<b>2008/ 025 433</b>	<b>A2</b>

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.**

(54) Bezeichnung: **Vorrichtung zur Erzeugung einer Bildserie**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur Erzeugung einer Bildserie, aufweisend ein Gehäuse (50) mit einer Pupille (10) zum Lichteintritt in die Vorrichtung und einen elektronischen Bildsensor (40) im Gehäuse (50), der eine zweidimensionale Anordnung lichtsensitiver Pixel umfasst, wobei die Vorrichtung weiter aufweist: eine einen vorbestimmten Astigmatismus einführende optische Komponente (35) angeordnet auf der optischen Achse zwischen Pupille (10) und Bildsensor (40) im Gehäuse; eine Einrichtung (30, 60) zur Drehung der Astigmatismus einführenden Komponente (35) um die optische Achse um vorbestimmte Drehwinkel; eine Bilderfassungseinrichtung (70) zur Erfassung einer Bildserie, wobei die Bilderfassungseinrichtung (70) die dazu ausgebildet ist, die auf den Pixeln des Bildsensors (40) gemessenen Lichtintensitäten auszulesen und als astigmatische Bildserie, indiziert mit dem bei der Bilderfassung vorliegenden Drehwinkel der Astigmatismus einführenden Komponente (35), zu speichern; und eine Bildkonstruktionseinrichtung (80), die dazu ausgebildet ist, für jedes Bild der astigmatischen Bildserie eine Fourier-Transformierte zu berechnen und in Abhängigkeit des indizierten Drehwinkels des Bildes eine Mehrzahl von Ausschnitten der Fourier-Transformierten auszuwählen und jedem Ausschnitt einen Defokuswert zuzuordnen und durch Übertragen und Speichern der Ausschnitte in ein mit Pixelkoordinaten und Defokuswerten indiziertes Array eine Defokusserie im Fourier-Raum zu generieren.



## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur Erzeugung einer Bildserie aufweisend ein Gehäuse mit einer Pupille zum Lichteintritt in die Vorrichtung und einen elektronischen Bildsensor im Gehäuse, der eine zweidimensionale Anordnung lichtsensitiver Pixel umfasst. Die Erfindung betrifft insbesondere eine Vorrichtung zum Anschluss an den Bildport eines optischen Gerätes, insbesondere eines Lichtmikroskops, die eine zur Phasenwiedergewinnung geeignete Bildserie erzeugt.

**[0002]** Seit der Einführung der Phasenkontrastmikroskopie durch Zernike ist bekannt, dass die Phasenlage des durch eine weitgehend transparente Probe transmittierten Lichts Informationen über die Probe enthält, die auch in einem Intensitätsbild sichtbar gemacht werden können. Das Mittel der Wahl zur Konvertierung von Phasen in Bildinformation ist bei kohärentem Licht die Interferometrie.

**[0003]** Mit der Entwicklung zweidimensionaler elektronischer Bildsensoren und dem Zuwachs an Rechenkapazität durch moderne Personal Computer entstand das Gebiet der Digitalen Holographie, in dessen Zentrum die Analyse der Phaseninformation von Lichtwellenfeldern steht.

**[0004]** Neben den interferometrischen Herangehensweisen sind inzwischen numerische Verfahren zur Phasenwiedergewinnung („phase retrieval“) in Anwendung, die sich auf die Rekonstruktion des Lichtwellenfeldes aus einer Serie von Bildern stützen, wobei jedes Bild unter einer vorbestimmten Manipulation des Lichts erfasst worden ist. Diese Ansätze erlauben den Verzicht auf Referenzlicht, das mit Probenlicht zur Interferenz zu bringen wäre, um die Phase in einem Interferogramm sichtbar zu machen.

**[0005]** Bei den Verfahren aus der Gruppe der Gerchberg-Saxton-Algorithmen wird das Lichtwellenfeld als komplexwertige Funktion iterativ berechnet. Es wird dabei ausgenutzt, dass in der Brennebene einer Linse die Fourier-Transformierte der Lichtwelle in der Objektebene entsteht, und dass man durch einen geeigneten Messaufbau sowohl ein Bild (Intensitätsverteilung) des Lichtwellenfeldes als auch ein Bild seiner Fourier-Transformierten direkt messen kann. Dies gestattet das Aufsetzen einer Iterationsschleife für die Lichtwellenfunktion, die in der Bildebene und in der Fourier-Ebene an die Messwerte als Randbedingung („constraints“) angeglichen wird. Zur Vereinfachung des Messaufbaus und insbesondere zur Verbesserung der Konvergenz solcher Verfahren wird inzwischen, wie oben erwähnt, auf die Auswertung von Bildserien gesetzt, beispielsweise in den Druckschriften EP 1 230 576 B2 und WO 2010/050909 A1.

**[0006]** Von besonderer Bedeutung für die vorliegende Beschreibung ist die Druckschrift WO 2008/025433 A2. Sie beschreibt ein Bilderfassungsverfahren und eine Vorrichtung zur Bilderfassung für die Phasenwiedergewinnung. Die Vorrichtung weist u. a. einen um die optische Achse rotierbaren Ortsfrequenzfilter in der Pupillenebene auf, beispielsweise ein Phasengitter. Während der Rotation kann so eine Sequenz von phasenmodulierten Bildern erfasst werden. Die Bildserie kann hiernach einer iterativen Rekonstruktion der Wellenfunktion zur Phasenbestimmung zugeführt werden.

**[0007]** Ein alternatives Phasenwiedergewinnungsverfahren modelliert das Lichtwellenfeld durch numerisches Lösen der sogenannten „Transport of Intensity Equation“ (TIE). Das Konzept geht auf das an sich bekannte Scharfstellen eines Mikroskops z. B. durch Absenken oder Anheben des Probenstückes zurück und auf die Beobachtung, dass an den Kanten scharf abgegrenzter Bildbereiche Bildpunkte „auseinanderlaufen“, wenn man die Probe durch die Fokusebene hindurch bewegt. Da der Gradient der Phase in der Bildebene die lokale Richtung beschreibt, aus der das Licht auf die einzelnen Pixel des Bildsensors einfällt, kann man durch Defokussieren erkennen, in welche Richtung die Lichtanteile weiterlaufen. Der Gradient der Intensität bezüglich des Defokus entlang der optischen Achse enthält somit eine Information zur Lösung der Wellengleichung für das propagierende Lichtwellenfeld. Dies wird auch durch die TIE ausgedrückt, in der die Intensität  $I(r_{\perp}, z)$  und ihre Ableitung als Parameter einer partiellen Differentialgleichung (DGL) zweiter Ordnung für die Phase  $\varphi(r_{\perp}, z)$  dienen.

$$(1) \quad \vec{\nabla}_{\perp} \cdot [I(r_{\perp}, z) \vec{\nabla}_{\perp} \varphi(r_{\perp}, z)] = -k \frac{\partial I(r_{\perp}, z)}{\partial z}$$

**[0008]** Die Ableitung  $\frac{\partial I}{\partial z}$  beschreibt die Änderung der Bildintensität entlang der optischen Achse (z-Richtung), die in defokussierten Bildern erkennbar ist; sie wird auch als Defokus-Ableitung bezeichnet. Ihre Berechnung erfolgt in ihrer einfachsten Implementierung als Differenzenquotient aus zwei verschieden (de)fokussierten Bildern mit bekanntem Abstand zueinander, wobei zum Beispiel die Lage der Bildebene verschoben wird, während die abbildende Optik unverändert bleibt, beispielsweise durch:

$$(2) \quad \frac{\partial I(r_{\perp}, z_0)}{\partial z} \approx \frac{1}{2\delta z} (I(r_{\perp}, z_0 + \delta z) - I(r_{\perp}, z_0 - \delta z))$$

**[0009]** Mit  $r_{\perp}$  sind die Koordinaten senkrecht zur optischen Achse bezeichnet, und der Nabla-Operator  $\vec{\nabla}_{\perp}$  betrifft nur diese Koordinaten. Mit  $k = 2\pi/\lambda$  ist die Wellenzahl des hier monochromatischen Lichts gemeint.

**[0010]** Die Phasenfunktion  $\varphi(r_{\perp}, z)$  kann man durch numerisches Lösen von Gleichung (1) für diejenigen z-Ebenen berechnen, für die man über eine Defokus-Ableitung verfügt. Diesem Ansatz folgt der Stand der Technik beispielsweise auch in den Druckschriften EP 1 505 376 B1, WO 2005/083377 A1 und WO 2015/002614 A1.

**[0011]** Das TIE-Verfahren ist als direktes Berechnungsverfahren keinen Konvergenzproblemen wie die iterativen Verfahren unterworfen. Gleichwohl kann es zu Uneindeutigkeiten und Phasensprüngen kommen, wenn die Defokus-Ableitung lokale Nullstellen aufweist. Überdies ist die Lösung der TIE davon abhängig, welche Werte für die Phase oder deren Gradienten am äußeren Rand des Detektierten Bildbereichs (Randbedingungen) angenommen werden.

**[0012]** Als eine Verallgemeinerung der TIE formuliert die Druckschrift von Allen et al., „Computational Aberration Correction for an Arbitrary Linear Imaging System“, Phys. Rev. Lett., Vol. 87, Nr. 12, S. 123902–1 ff, 2001 eine Transportgleichung im Raum der Aberrationen. Die Grundidee ist, dass die Defokus-Ableitung der TIE durch vergleichbare Ableitungen nach anderen Aberrationen ersetzt werden kann.

**[0013]** Aus dem Aufsatz von Petersen und Keast, „Astigmatic intensity equation for electron microscopy based Phase retrieval“, Ultramicroscopy 107, S. 635–643, 2007 ist die Formulierung einer TIE zu entnehmen, die neben den Defokus-Ableitungen auch eine Ableitung nach dem Astigmatismus umfasst. Sie ist für Bilder eines Transmissionselektronenmikroskops (TEM) vorgesehen, bei dem die Elektronenwellen mittels magnetischer Felder fokussiert werden. Sowohl der Defokus als auch der Astigmatismus lassen sich leicht über das Variieren der Felder verändern. Dies ist jedoch auf elektromagnetische Strahlung und optische Wellenlängen nicht übertragbar, und der Ansatz von Petersen und Keast wurde zur Phasenrekonstruktion von Lichtwellen zunächst nicht weiter verfolgt.

**[0014]** In der Masterarbeit von Müller „Entwicklung einer optischen Methode zur Charakterisierung von Oberflächen mittels astigmatischer inline Holografie“, Universität Ulm, 2015, wird ein Versuchsaufbau zur Bestimmung der Phase eines Lichtwellenfeldes vorgestellt, der Bilder mit veränderlichem Astigmatismus erfasst. Hierfür wird eine um die optische Achse drehbare Zylinderlinse in den Strahlengang vor einen elektronischen Bildsensor gesetzt und es werden vier Bilder erfasst, um Astigmatismus-Ableitungen der Intensität (kurz:  $\frac{\partial I}{\partial A}$ ) für zwei unterschiedliche Ausrichtungen der astigmatischen Hauptachsen zu ermitteln. Weiterhin legt die Arbeit dar, wie die TIE durch ein System von zwei DGLen (A-TIE) für die Phase unter Einbeziehung der Astigmatismus-Ableitungen ersetzt werden kann, und führt die Berechnungen numerisch aus. Der Ansatz erweist sich als interessant, da er geeignet ist, Artefakte bei kleinen Raumfrequenzen (Halo-Effekt) besser zu vermeiden. Er liefert jedoch nicht immer korrekte Ergebnisse, insbesondere dann nicht, wenn die einfallende Lichtwelle z. B. eine Defokus-artige Wellenfrontverzerrung aufweist, für die die Ermittlung der Astigmatismus-Ableitung nicht sensitiv ist.

**[0015]** Weiterführende Arbeiten der Erfinder haben nun gezeigt, dass es möglich ist, einen Algorithmus zur optischen Phasenwiedergewinnung zu entwickeln, der diverse Nachteile vergleichbarer Verfahren des Standes der Technik überkommt. Über die Einzelheiten des Algorithmus wird hier nicht berichtet. Als Eingaben erfordert der Algorithmus eine Bildserie, aus der sich sowohl Defokus-Ableitungen als auch Astigmatismus-Ableitungen ermitteln lassen.

**[0016]** Die Aufgabe der Erfindung besteht darin, eine einfache und kostengünstige Vorrichtung vorzuschlagen, die eine astigmatische Bildserie und eine Defokusserie im Fourier-Raum oder alternativ eine defokussierte Bildserie erfassen kann.

**[0017]** Die Aufgabe wird gelöst durch eine Vorrichtung zur Erzeugung einer Bildserie aufweisend ein Gehäuse mit einer Pupille zum Lichteintritt in die Vorrichtung und einen elektronischen Bildsensor im Gehäuse, der eine zweidimensionale Anordnung lichtsensitiver Pixel umfasst, gekennzeichnet durch

- a. eine einen vorbestimmten Astigmatismus einführende optische Komponente angeordnet auf der optischen Achse zwischen Pupille und Bildsensor im Gehäuse;
- b. eine Einrichtung zur Drehung der Astigmatismus einführenden Komponente um die optische Achse um vorbestimmte Drehwinkel;

c. eine Bilderfassungseinrichtung, die dazu ausgebildet ist, die auf den Pixeln des Bildsensors gemessenen Lichtintensitäten auszulesen und als astigmatische Bildserie indiziert mit dem bei der Bilderfassung vorliegenden Drehwinkel der Astigmatismus einführenden Komponente zu speichern;

d. eine Bildkonstruktionseinrichtung, die dazu ausgebildet ist, für jedes Bild einer astigmatischen Bildserie eine Fourier-Transformierte zu berechnen und in Abhängigkeit des indizierten Drehwinkels des Bildes eine Mehrzahl von Ausschnitten der Fourier-Transformierten auszuwählen und jedem Ausschnitt einen Defokuswert zuzuordnen und durch Übertragen und Speichern der Ausschnitte in ein mit Pixelkoordinaten und Defokuswerten indiziertes Array eine Defokusserie im Fourier-Raum zu generieren.

**[0018]** Vorzugsweise ist die Pupille in eine Außenwand des Gehäuses integriert oder darin angeordnet, so dass Licht von außerhalb des Gehäuses in einen Innenraum des Gehäuses eindringen kann.

**[0019]** Vorzugsweise kann die Pupille als eine Öffnung in der Wand des Gehäuses ausgebildet sein. Dabei kann die Pupille von oder mit einem Gitter oder einem anderen, insbesondere optischen, Element gebildet sein, das einen Lichtdurchlass in das Gehäuse gewährleistet.

**[0020]** Durch die zweidimensionale Anordnung der lichtsensitiven Pixel kann der Bildsensor eine Vielzahl von lichtsensitiven Pixeln aufweisen. Jedes lichtsensitives Pixel kann dabei als eine Pixel-Zelle des Bildsensors verstanden werden.

**[0021]** Vorzugsweise ist die Bilderfassungseinrichtung dazu ausgebildet, bei jedem vorbestimmten Drehwinkel ein Bild zu erfassen, und zwar jeweils durch das Auslesen der auf den Pixeln des Bildsensors gemessenen Lichtintensitäten. Vorzugsweise ist die Bilderfassungseinrichtung dazu ausgebildet, die erfassten Bilder als astigmatische Bildserie zusammenzufassen, insbesondere in Form eines Arrays.

**[0022]** In einer vorteilhaften, aber nicht unbedingt erforderlichen Ausgestaltung ist zudem die Bildkonstruktionseinrichtung dazu ausgebildet, aus der Defokusserie im Fourier-Raum durch eine inverse Fourier-Transformation eine defokussierte Bildserie zu berechnen und zu speichern.

**[0023]** Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen sind den Unteransprüchen zu entnehmen.

**[0024]** Der Zweck der Erfindung ist, die bei der Auswertung der Astigmatismus-Ableitungen erkannten Vorzüge für die Phasenberechnung zu nutzen, indem eine Vorrichtung mit einer Astigmatismus einführenden Komponente zur Erfassung einer astigmatischen Bildserie fortgebildet wird. Insbesondere ist die erfindungsgemäße Vorrichtung dazu ertüchtigt, zusätzlich verschieden defokussierte Bilder, wenigstens aber eine Serie von Fourier-Transformierten solcher Bilder, zu ermitteln, ohne dass die Astigmatismus einführende Komponente ausgebaut oder anderweitig manipuliert werden müsste.

**[0025]** Es wird dabei insbesondere unter dem Blickwinkel Herstellungskosten als ganz besonders vorteilhaft angesehen, dass die Astigmatismus einführende optische Komponente als eine Zylinderlinse, vorzugsweise als eine plan-konvexe Zylinderlinse, ausgebildet ist. Die astigmatisch fokussierende Wirkung einer solchen Linse lässt sich nicht ohne weiteres abschalten, aber es wurde erfindungsgemäß erkannt, dass sich die ohnehin für den Verwendungszweck der Phasenwiedergewinnung erforderliche astigmatische Bildserie in eine Defokusserie im Fourier-Raum und bei Bedarf in eine defokussierte Bildserie ohne Astigmatismus überführen lässt, so dass beide Bildserien schnell, gleichzeitig und mit einer recht einfachen Messapparatur zu erfassen sind – und mithin eine einzelne, umfassendere Bildserie bilden.

**[0026]** Zur weiteren Erläuterung der Erfindung dienen die nachfolgenden Figuren. Dabei zeigt:

**[0027]** Fig. 1 einen Plot der modulierten Phasenlage einer Lichtwelle beim Durchtritt durch eine Zylinderlinse;

**[0028]** Fig. 2 eine Skizze der erfindungsgemäßen Messvorrichtung;

**[0029]** Fig. 3 ein Beispiel für ein vervierfaches Bild durch Spiegelung an zwei Achsen zum Erzwingen periodischer Randbedingungen;

**[0030]** Fig. 4 eine beispielhafte Maske zur Auswahl von Ausschnitten der Fourier-Transformierten (hier für vervierfachte Bilder);

**[0031]** Fig. 5a) ein berechnetes defokussiertes Bild und b) der linke obere Quadrant des Bildes aus a) als Ausgabe.

**[0032]** Eine Astigmatismus einführende Komponente verändert die Brechung der auf den Bildsensor abgebildeten, einfallenden Lichtwelle derart, dass Lichtanteile sowohl vor als auch auf und hinter der Bildebene fokussiert werden. An die Stelle einer planen Brennebene bei der idealen Abbildung treten nun zwei zueinander senkrechte, windschiefe Geraden im Raum, die als Brennlinien die kürzeste und die längste Brennweite der astigmatischen Abbildung repräsentieren. Der Abstand dieser Brennlinien, mithin die maximale Spreizung der Brennweite, wird als Astigmatismus bezeichnet.

**[0033]** Die Wirkung der Astigmatismus einführenden Komponente kann so aufgefasst werden, dass sie die Wellenfront der Lichtwelle beim Durchtritt lokal verformt, nämlich teilweise zur optischen Achse hin und teilweise von der optischen Achse weg „verbiegt“. Im Fourier-Raum kann dies als lokale Modulation der Phasenlage der Wellenfront beschrieben werden, wobei die modulierte Phasenlage als Funktion der Pixelkoordinaten die folgenden Eigenschaften haben muss:

- a) Sie ist invariant gegenüber Rotation der optischen Komponente um  $180^\circ$ .
- b) Bei Drehung der optischen Komponente um  $90^\circ$  werden kurze und lange Brennweite ausgetauscht, d. h. die modulierte Phasenlage wechselt überall ihr Vorzeichen.

**[0034]** Beide Eigenschaften sind in Fig. 1 für eine Zylinderlinse als Plot der erzeugten Wellenfrontverzerrung dargestellt.

**[0035]** Dies bedeutet zugleich, dass im Fourier-Raum jede Gerade durch den Mittelpunkt mit genau einer Defokuslage entlang der optischen Achse assoziiert werden kann, nämlich mit

$$\Delta f = \frac{A}{2} \cos(2(\alpha - \alpha_A)), \quad (3)$$

wobei  $\alpha_A$  beispielsweise die Winkellage der vorderen Brennlinie und  $\alpha$  die Winkellage der Geraden und  $A$  den Astigmatismus bezeichnet. Für  $\alpha = \alpha_A$  wird das Licht im Abstand  $\Delta f = \frac{A}{2}$  vor der Bildebene fokussiert, bei  $\alpha = \alpha_A + 90^\circ$  liegt der Fokus hingegen bei  $\Delta f = -\frac{A}{2}$ , also hinter der Bildebene.

**[0036]** Interessant ist insbesondere der Fall  $\Delta f = 0$ , der sich bei  $\alpha = \alpha_A + 45^\circ$  oder  $\alpha = \alpha_A + 135^\circ$  einstellt. Die Fourier-Komponenten entlang dieser beiden Geraden werden vom Astigmatismus nicht berührt, oder anders ausgedrückt, sie sind invariant gegenüber Astigmatismus-Umkehr, also etwa bei einer Verdrehung der optischen Komponente um  $90^\circ$ .

**[0037]** Wenn man erfindungsgemäß durch Rotieren der Astigmatismus einführenden optischen Komponente um die optische Achse eine Variation des Drehwinkels  $\alpha_A$  über ein halboffenes Winkelintervall der Breite  $180^\circ$  hinweg in ausreichend kleiner Schrittweite unternimmt, kann man eine astigmatische Bildserie erfassen und jedes Bild der Serie einer Fourier-Transformation zuführen. Die Fourier-Transformierten enthalten wiederum alle an jeweils vorbestimmten – von  $\alpha$  und  $\alpha_A$  abhängigen – Pixelkoordinaten Fourier-Komponenten, die die Eigenschaft der Invarianz gegenüber Astigmatismus-Umkehr besitzen. Sammelt man eben diese Fourier-Komponenten aus der Serie auf und überträgt sie in ein gemeinsames Array, das mit Pixelkoordinaten indiziert ist, dann stellt dieses gemeinsame Array eine synthetische Fourier-Transformierte desjenigen Bildes dar, das man auf dem Bildsensor erhalten würde, wenn keine Astigmatismus einführende Komponente vorhanden wäre. Tatsächlich kann man so man das unverzerrte, scharfe Bild der Lichtwelle aus einer Mehrzahl von Ausschnitten der Fourier-Transformierten der erfassten astigmatischen Bildserie numerisch bestimmen.

**[0038]** Wählt man überdies die Ausschnitte anders, beispielsweise entlang einer Geraden, die mit dem Winkel  $\alpha = \alpha_A + 30^\circ$  beschrieben ist, dann findet man in den Ausschnitten die Fourier-Komponenten jenes Bildes, das sich bei einem Defokuswert von  $\Delta f = \frac{A}{4}$  ergeben würde. Sammelt man auch die Fourier-Komponenten zu  $\Delta f = \frac{A}{4}$  aus allen Fourier-Transformierten der astigmatischen Bildserie auf und überträgt diese in ein gemeinsames Array, dann synthetisiert man dadurch die Fourier-Transformierte eines defokussierten Bildes mit dem vorgeannten Defokuswert.

**[0039]** Nach dem zuvor Gesagten ist es daher zweckdienlich, für jedes Bild einer astigmatischen Bildserie eine Fourier-Transformierte zu berechnen und in Abhängigkeit des indizierten Drehwinkels des Bildes eine Mehrzahl von Ausschnitten der Fourier-Transformierten auszuwählen und jedem Ausschnitt einen Defokuswert zuzuordnen und durch Übertragen und Speichern der Ausschnitte in ein mit Pixelkoordinaten und Defokuswerten indiziertes Array eine Defokusserie im Fourier-Raum zu generieren.

**[0040]** Das als Defokusserie im Fourier-Raum bezeichnete Array ist in der Regel komplexwertig und mit zwei Pixelkoordinaten und einem Defokuswert, also dreidimensional, indiziert. Durch zweidimensionale Fourier-Transformation, vorzugsweise im Wege eines Fast-Fourier-Transform (FFT) Algorithmus, über die Pixelkoordinaten kann problemlos eine defokussierte Bildserie indiziert mit dem Defokuswert daraus berechnet werden.

**[0041]** Es wird als vorteilhaft angesehen, die Bereitstellung einer Bildserie umfassend astigmatische Bilder und eine Defokusserie im Fourier-Raum oder alternativ defokussierte Bilder von der weiteren Verwendung der Bildserie zu entkoppeln.

**[0042]** Die Weiterverwendung der erfindungsgemäß erzeugten Bildserie wird derzeit vorwiegend in der Anwendung eines Algorithmus zur Phasenwiedergewinnung der Lichtwelle gesehen, ist aber durchaus nicht notwendig darauf beschränkt. Die numerische Auswertung einer Bildserie kann den Zugang zu leistungsstarken Rechnern und einen eigenen Zeitraum für Prozessierung und Nachbearbeitung in Anspruch nehmen. Insbesondere können auch mehrere Auswertalgorithmen herangezogen und deren Ausgaben miteinander verglichen werden. Zwischen der Erfassung der Bildserie und ihrer Auswertung kann ein zeitlicher Abstand liegen.

**[0043]** Es erscheint daher zweckdienlich, die Erzeugung und Bereitstellung der Bildserie von der Verfügbarkeit externer Rechen- und Speicherkapazität unabhängig auszugestalten und in die erfindungsgemäße Vorrichtung eine Bilderfassungseinrichtung und eine Bildkonstruktionseinrichtung zu integrieren. Beide Einrichtungen lassen sich apparativ durch einen – ggf. auch einzelnen – herkömmlichen Mikroprozessor darstellen, der durch Software zur Ausführung der erfassenden und berechnenden Funktionen ertüchtigt wird.

**[0044]** Vom Endanwender der Vorrichtung kann nicht vorausgesetzt werden, dass er sich im Detail mit der Erstellung der Bildserie befasst. Er wird vielmehr eine vollautomatische Erzeugung der nutzbaren Bildserie nach Art einer herkömmlichen Kamera erwarten.

**[0045]** Vor diesem Hintergrund sollen vorteilhafte Ausgestaltungen der Vorrichtung, auch anhand der **Fig. 2**, erläutert werden.

**[0046]** Die Vorrichtung soll ein lichtundurchlässiges Gehäuse (**50**) umfassen, das eine Eintrittsöffnung (**10**) für das zu messende Licht aufweist, die sogenannte Pupille (**10**). Der Pupille (**10**) gegenüberliegend ist ein zweidimensionaler elektronischer Bildsensor (**40**) mit lichtsensitiven Pixeln angeordnet. Zwischen Pupille (**10**) und Bildsensor (**40**) ist die Astigmatismus einführende optische Komponente (**35**), vorzugsweise eine Zylinderlinse (**35**), besonders bevorzugt eine plan-konvexe Zylinderlinse (**35**), in einer Halterung (**30**) angeordnet.

**[0047]** Es ist hier anzumerken, dass es im Rahmen der Erfindung liegt, einen elektronisch ansteuerbaren räumlichen Lichtmodulator zur Einführung des Astigmatismus zu verwenden, der beispielsweise elektro-optische Kristallelemente aufweist und zur Einprägung von Phasenmodulationen geeignet ist. Insbesondere könnte so eine Modulation wie in **Fig. 1** erzeugt und vermöge zeitveränderlicher elektronischer Ansteuerung um die optische Achse rotiert werden. Ein solcher Lichtmodulator ist aber im Vergleich zu einer mechanisch rotierten Zylinderlinse eine teure Komponente.

**[0048]** Es wird daher als vorteilhafte Ausgestaltung angesehen, dass die Rotation des Astigmatismus durch eine Einrichtung zur Drehung der Astigmatismus einführenden Komponente (**35**), bevorzugt einer Zylinderlinse (**35**), hervorgerufen wird, die eine Halterung (**30**) für die Komponente (**35**) und einen elektrischen Antrieb (**60**) zum Bewirken einer Drehung der Halterung (**30**) um die optische Achse um einen vorbestimmten Drehwinkel umfasst. Dabei kann es weiterhin von Vorteil sein, wenn der Antrieb (**60**) zum Bewirken einer kontinuierlichen Drehung der Halterung (**30**) mit einer vorbestimmten Winkelgeschwindigkeit ausgebildet ist.

**[0049]** Es kommt im Detail nicht darauf an, an welcher genauen Stelle entlang der optischen Achse die Astigmatismus einführende Komponente (**35**) zwischen Pupille (**10**) und Bildsensor (**40**) angeordnet ist. Es ist nur dafür Sorge zu tragen, dass das gesamte in die Pupille (**10**) eintretende und auf den Bildsensor (**40**) gelangende Licht durch die Komponente (**35**) treten muss und somit den vorbekannten Astigmatismus eingepreßt bekommt.

**[0050]** Die erfindungsgemäße Vorrichtung ist vorzugsweise zur optischen Verbindung mit einem Mikroskop über einen Bildport oder dergleichen ausgestaltet. Es ist möglich, im Innern des Gehäuses (**50**) eine abbildende Optik (**20**) anzuordnen, die beispielsweise dazu ausgebildet sein kann, dass durch die Pupille (**10**) eintretende Licht – in Abwesenheit der Astigmatismus einführenden Komponente (**35**) – scharf auf den Bildsensor (**40**) abzubilden. Es ist ebenso möglich, dass das Mikroskop mit Bildport bereits eine solche Abbildung in einem

vorbestimmten Abstand des Bildsensors (40) von der Pupille (10) realisiert, so dass keine zusätzliche Optik (20) erforderlich ist.

**[0051]** Weitere notwendige Komponenten sind eine Bilderfassungseinrichtung (70) und eine Bildkonstruktionseinrichtung (80). Die Bilderfassungseinrichtung (70) muss die Messdaten des Bildsensors (40) auslesen und in digitalisierter Form in einem Arbeitsspeicher (nicht dargestellt) bereitstellen und ggf. auch nicht-flüchtig speichern können. Sie muss überdies Protokoll Daten erheben oder entgegennehmen und mit den Messdaten in Bezug bringen, vorzugsweise durch Indizierung der Messdaten mit den Protokoll Daten. Die Bildkonstruktionseinrichtung (80) steht in elektronischer Kommunikation mit der Bilderfassungseinrichtung (70). Die Bildkonstruktionseinrichtung (80) führt Rechenoperationen auf den Datensätzen aus, die die Bilderfassungseinrichtung (70) zur Verfügung stellt, und konstruiert daraus synthetische Datensätze, die sie entweder selbst nicht-flüchtig speichert oder zum Zweck des Speicherns an die Bilderfassungseinrichtung (70) übergibt.

**[0052]** Die Aufgaben von Bilderfassungseinrichtung (70) und Bildkonstruktionseinrichtung (80) lassen sich durch kommerziell erhältliche Mikroprozessoren ausführen, bevorzugt durch einen in die Vorrichtung integrierbaren Mikroprozessor mit nicht-flüchtigem Datenspeicher, kurz einem Computer. Der Computer kann im Innern des Gehäuses (50) oder auch außerhalb angeordnet sein, wobei dann eine datenkommunizierende Kabelverbindung durch eine Durchführung im Gehäuse (50) zum Bildsensor (40) geführt werden kann.

**[0053]** In einer bevorzugten Ausgestaltung ist der Antrieb (60) als Elektromotor und von einer elektronischen Steuereinrichtung (90) ansteuerbar ausgebildet, und die Steuereinrichtung (90) ist dazu ausgebildet, mittels Steuerbefehlen eine vorbestimmte zeitliche Abfolge von Drehwinkeln einzurichten und den vorliegenden Drehwinkel fortlaufend an die Bilderfassungseinrichtung (70) elektronisch zu kommunizieren.

**[0054]** Die Steuereinrichtung (90) kann dabei ein Mikroprozessor sein, der eine Liste von Befehlen z. B. mit einem vorbestimmten Zeittakt oder auch in Abhängigkeit von Signalen etwa der Bilderfassungseinrichtung (70) ausführt bzw. dem Antrieb (60) vorgibt. Der Antrieb (60) kann ein Präzisionsschrittmotor sein, der angewiesen werden kann, eine vorbestimmte Anzahl von Winkelschritten in eine vorbestimmte Drehrichtung mit hoher Genauigkeit auszuführen. Die Steuereinrichtung (90) kann in denselben Computer integriert sein, der auch die Bilderfassungseinrichtung (70) realisiert.

**[0055]** Insbesondere kann die Bilderfassungseinrichtung (70) eine Liste von vorbestimmten Drehwinkeln verarbeiten. Sie kann den Befehl erhalten, zu jedem Drehwinkel der Liste ein Bild zu erfassen und indiziert mit dem Drehwinkel abzuspeichern. Hierfür kann sie der Steuereinrichtung (90) eine Sequenz von Befehlen erteilen, die die Steuereinrichtung (90) veranlasst, den Antrieb (60) zur Ausführung einer Sequenz von Drehungen um die vorbestimmten Drehwinkel anzusteuern. Bei jeder Winkeleinstellung der Sequenz nimmt die Bilderfassungseinrichtung (70) eine Auslesung des Bildsensors (40) vor und erteilt beispielsweise erst nach dem Speichern eines astigmatischen Bildes den nächsten Befehl der Sequenz.

**[0056]** Beispielsweise und bevorzugt mit Blick auf eine spätere Auswertung der Bildserie mit einem Algorithmus zur Phasenwiedergewinnung ist die Bilderfassungseinrichtung (70) dazu ausgebildet, eine astigmatische Bildserie indiziert mit Drehwinkeln aus dem halboffenen Intervall  $[\alpha, \alpha + 180^\circ)$  bezogen auf ein mit dem Bildsensor (40) verbundenes Koordinatensystem zu erfassen, wobei  $\alpha$  eine vorbestimmte Konstante ist. Es sollten wenigstens vier Bilder mit den Drehwinkeln  $\alpha + n \times 45^\circ$  mit  $n = 0, 1, 2, 3$  erfasst werden. Doch ist es im Sinne der Erfindung vorteilhaft, wenigstens acht, vorzugsweise zwölf oder mehr Bilder zu erfassen, wobei das Drehwinkelinkrement beispielsweise und bevorzugt ganzzahlige Bruchteile von  $45^\circ$  betragen kann.

**[0057]** In einer alternativen Ausgestaltung kann die Vorrichtung einen Antrieb (60) zur kontinuierlichen Drehung der Halterung (30) der Zylinderlinse (35) mit einer vorbestimmten Winkelgeschwindigkeit aufweisen. Solche Antriebe sind in der Regel preisgünstiger als präzise Schrittmotoren. In diesem Fall kann womöglich auf eine mit der Bilderfassungseinrichtung (70) kommunizierende Steuereinrichtung (90) des Antriebs (60) verzichtet werden. Insbesondere kann die Winkelgeschwindigkeit des Antriebs (60) ein- oder mehrstufig vorbestimmt sein, und der Antrieb (60) kann durch Betätigen eines Auswahl Schalters oder einfach durch Bestromung direkt aktiviert werden.

**[0058]** Es ist jedoch erforderlich, die erfasste Bildserie mit dem aktuellen, beim Erfassen eines Einzelbildes vorliegenden Drehwinkel der Zylinderlinse (35) zu indizieren. Vorzugsweise sollte daher die Vorrichtung eine Einrichtung zur zeitlich mit der Drehung Schritt haltenden Messung des Drehwinkels umfassen, die dazu ausgebildet ist, die gemessenen Drehwinkel fortlaufend an die Bilderfassungseinrichtung (70) elektronisch zu kommunizieren (nicht dargestellt). Eine solche Einrichtung kann dabei als explizit oder implizit Winkel messend

ausgestaltet sein. Beispielsweise kann ein elektronischer Winkelmesser mit der Halterung (30) der Zylinderlinse (35) verbunden sein, der die aktuelle Winkellage in Grad etwa in Bezug auf einen einmalig in Bezug zu den Pixelkoordinaten des Bildsensors (40) ermittelten Anfangswert misst und elektronisch weitermeldet. Eine implizite Messung kann unter der Voraussetzung einer hohen Stabilität der Winkelgeschwindigkeit der Drehung erfolgen, wenn beispielsweise an wenigstens einer Stelle der rotierenden Halterung (30) ein mechanischer oder auch magnetischer Taktgeber angeordnet wird, der beim Vorbeibewegen an einem Signalelement – etwa angeordnet an der Gehäuseinnenwand auf der Höhe der Halterung (30) – ein elektrisches Signal hervorruft. Im einfachsten Fall kann ein kleiner Permanentmagnet an einer Spule vorbeibewegt werden, um einen Spannungspuls zu induzieren, der an die Bilderfassungseinrichtung (70) weitergeleitet wird. Die Bilderfassungseinrichtung (70) kann beim Erfassen des Signals beispielsweise einen Zeitstempel einer internen Uhr abspeichern.

**[0059]** Überdies kann die Bilderfassungseinrichtung (70) auch alle astigmatischen Bilder zum Zeitpunkt des Auslesens aus dem Bildsensor (40) mit einem Zeitstempel versehen. Bei konstanter Winkelgeschwindigkeit kann aus den Zeitstempeln der Bildserie und aus dem Zeitstempel einer vorbekannten Winkellage der Zylinderlinse (35) ohne weiteres eine Indizierung der Bildserie mit den Drehwinkeln errechnet werden.

**[0060]** Die Bilderfassungseinrichtung (70) erstellt während oder nach dem Erfassen einer astigmatischen Bildserie für ein vorbestimmtes Intervall von Drehwinkeln ein numerisches Array enthaltend Farb- oder Grauwerte indiziert durch zwei Pixelkoordinaten des Bildsensors (40) und den jeweiligen Drehwinkel des Erfassungszeitpunkts eines Bildes.

**[0061]** Das numerische Array wird der Bildkonstruktionseinrichtung (80) als Ganzes oder wenigstens bildweise nacheinander zur Weiterverarbeitung übergeben.

**[0062]** Die Bildkonstruktionseinrichtung (80) führt zunächst zu jedem Einzelbild der astigmatischen Bildserie eine Fourier-Transformation mittels eines FFT-Verfahrens aus.

**[0063]** Das FFT-Verfahren geht wie jede Fourier-Transformation grundsätzlich davon aus, dass die zu transformierende Funktion periodisch ist mit einer Periodenlänge, die der Intervallbreite des Trägers der Funktion entspricht, auf dem die Funktion dem FFT-Verfahren übergeben wird. Diese Periodizität ist üblich nicht gegeben, was zu Artefakten in der Fourier-Darstellung führt. Zur Verringerung oder Vermeidung der Artefakte ist es zweckmäßig, vor der Fourier-Transformation der astigmatischen Bilder auf jedes astigmatische Bild ein Verfahren zur Unterdrückung von Randpunkten anzuwenden. Solche Verfahren sind unter dem Begriff „edge tapering“ an sich bekannt. Beispielsweise können die Farb- oder Grauwerte eines Bildes mit einer pixelabhängigen Filterfunktion multipliziert werden, die in einem Randstreifen der Bildpixel schnell auf null abfällt, z. B. wie eine Gauß-Kurve, und überall sonst den Wert eins besitzt.

**[0064]** Als besonders vorteilhaft für die spätere Verwendung der Bildserie zur Phasenwiedergewinnung wird hier eine alternative Möglichkeit der Artefaktvermeidung erkannt: die Vervielfachung eines Bildes durch Spiegelung an zwei Bildkanten. In **Fig. 3** ist ein exemplarisches Bild gezeigt, das durch eine Spiegelung an der rechten Bildkante zunächst verdoppelt und durch Spiegelung des verdoppelten Bildes an der unteren Bildkante dann vervierfacht wird. **Fig. 3** zeigt das ursprüngliche Bild des linken oberen Quadranten auf einem vervierfachten Träger, wobei die durch das Bild repräsentierte Funktion nunmehr periodisch fortsetzbare Randwerte aufweist und somit der Voraussetzung des FFT-Verfahrens genügt. Die Fourier-Transformation wird bevorzugt für vervierfachte Bilder ausgeführt.

**[0065]** Die Fourier-Transformierte eines vervierfachten Bildes zeigt dieselben Komponenten wie die des Ausgangsbildes, denn das Vervielfachen selbst fügt dem Bild keine neue Strukturinformation hinzu. Die ursprünglich vorhandenen Artefakte werden jedoch sehr wirksam unterdrückt, und man bezahlt dies mit der Notwendigkeit der Weiterbehandlung der Fourier-Daten auf dem vervierfachten Träger, d. h. der Rechenaufwand ist durch die größeren Arrays erhöht.

**[0066]** Die Bildkonstruktionseinrichtung (80) kann, wie bereits erwähnt, als Computer realisiert sein, der die vorbeschriebenen Operationen gesteuert durch eine Software durchführt. Weiterhin kann die Software Befehle umfassen, die die Auswahl von Ausschnitten aus den Fourier-Transformierten der astigmatischen Bildserie und die Weiterverwendung der in den Ausschnitten vorliegenden Fourier-Komponenten betreffen.

**[0067]** Es wurde bereits erläutert, dass unterschiedlich gerichtete Geraden durch den Ursprung mit unterschiedlichen Defokuswerten zu assoziieren sind. In der praktischen Anwendung ist es vorteilhaft, die Zuordnung eines Defokuswertes nicht nur auf eine Gerade mit einer festen Richtung, sondern auf eine Gerade und



eine Richtungsumgebung der Gerade vorzunehmen. Anders gesagt ist es vorteilhaft, in der Fourier-Transformierten eines astigmatischen Bildes kreissegmentförmige Ausschnitte auszuwählen, die je einem vorbestimmten Polarwinkelintervall im Pixelkoordinatensystem entsprechen, und aus dem indizierten Drehwinkel des Bildes zu jedem Ausschnitt einen Defokuswert zu bestimmen.

**[0068]** Beispielsweise können die Ausschnitte durch Multiplikationsmasken beschrieben werden. Beispiele für solche Masken sind in **Fig. 4** gezeigt, wobei es sich um Funktionen über den – ggf. vervierfachen – Pixelkoordinaten handelt, die für die Mehrheit der Pixel den Wert null (schwarz) und für die übrigen Pixel den Wert eins (weiß) annehmen. Multipliziert man eine solche Maske mit einer Fourier-Transformierten eines astigmatischen Bildes, so erhält man isoliert die Fourier-Komponenten, die in den weißen Maskenbereichen vorliegen. Die Gesamtheit der Masken überdeckt den Träger vollständig, d. h. jede Fourier-Komponente wird wenigstens einmal – hier: genau einmal – von einer Maske ausgewählt. Keine Information geht verloren.

**[0069]** Den Masken können – ggf. mittlere – Defokuswerte zugeordnet werden. Die Zuordnung ist umso genauer, desto mehr unterschiedlich ausgerichtete Masken mit kleineren Winkelintervallen verwendet werden. Die Kreissegmente der Masken müssen sich zur Überdeckung des Trägers jedoch nicht zwangsläufig mit scharfen Kanten nahtlos aneinander fügen, sondern sie können sich auch in ihren Randbereichen mit benachbarten Kreissegmenten überlappen. In diesem Fall ist darauf zu achten, dass die Maskenfunktion in den Überlappungsregionen Werte zwischen null und eins aufweist und somit eine normerhaltende Gewichtung vornimmt. Um dies zu verdeutlichen: Würde man alle Ausschnitte einer bestimmten Fourier-Transformierten in ein zunächst mit null initialisiertes Pixelarray übertragen durch Addition aller ausgeschnittener Daten unter Beibehaltung der Pixelzuordnung, so muss sich dabei wieder dieselbe Fourier-Transformierte ergeben.

**[0070]** Die den Masken zugeordneten Defokuswerte hängen von den Drehwinkeln der astigmatischen Bildserie ab. Für jedes astigmatische Einzelbild wird jedem Ausschnitt seiner Fourier-Transformierten einmalig ein Defokuswert zugeordnet, beispielsweise in Anlehnung an Gleichung (3). Die Defokuswerte, die während einer Messung einer Bildserie auftreten können, sind in der Regel vorbekannt, weil die Form der Masken und die Drehwinkel, zu denen astigmatische Bilder erfasst werden, vorbestimmt sind.

**[0071]** Die Bildkonstruktionseinrichtung (**80**) initialisiert zunächst ein Array in Abhängigkeit der Pixelkoordinaten und der Defokuswerte zu null. Dann überträgt sie die zuvor bestimmten Ausschnitte sortiert nach den diesen Ausschnitten zugeordneten Defokuswerten in das Array, beispielsweise und bevorzugt im Wege der Addition unter Beibehaltung der Pixelzuordnung. Auf diese Weise entsteht durch Übertragen aller Ausschnitte aus allen Fourier-Transformierten der astigmatischen Bildserie eine Defokusserie im Fourier-Raum. Es ist dabei von Vorteil, aus einer Serie von astigmatischen Bildern eine Defokusserie zu generieren, bei der jedes Arrayelement wenigstens einmal durch Übertragen von Daten aus Ausschnitten mit Daten belegt worden ist.

**[0072]** Die soweit beschriebene Vorrichtung ist in der Lage, eine astigmatische Bildserie zu erfassen und eine Defokusserie im Fourier-Raum daraus zu berechnen und beide Serien in elektronischer Form einer Weiterverarbeitung z. B. in Rechenanlagen zur Verfügung zu stellen. Insbesondere sind diese Daten dazu geeignet, die Grundlage eines Verfahrens zur Phasenwiedergewinnung zu bilden.

**[0073]** Es kann weitere Anwendungen geben, für die man die Ausgabe der astigmatischen Bildserie und einer defokussierten Bildserie wünscht. Eine defokussierte Bildserie lässt sich leicht durch Anwendung einer inversen Fourier-Transformation auf die Defokusserie erhalten. Wenn man – wie hier empfohlen – die Vervielfachung der astigmatischen Bilder vorgenommen hat und somit auch Fourier-Transformierte auf einem vervierfachen Träger in der Defokusserie erhält, dann reicht es zur Erzeugung einer auszugebenden defokussierten Bildserie aus, einen vorbestimmten Pixel-Quadranten der berechneten defokussierten Bildserie zu speichern und einer Weiterverarbeitung bereitzustellen.

**[0074]** **Fig. 5a)** zeigt exemplarisch ein defokussiertes Bild, das durch inverse FFT einer vervierfachen Fourier-Transformierten berechnet worden ist. Es weist erwartungsgemäß periodisch fortsetzbare Randwerte auf. Unter Hinweis auf die Spiegelungen, die in **Fig. 3** zur Vervielfachung eines astigmatischen Bildes benutzt wurden, ist klar, dass der linke obere Quadrant von **Fig. 5a)**, noch einmal gezeigt in **Fig. 5b)**, das korrespondierende defokussierte Bild sein muss, das auszugeben ist.

**[0075]** Zusammenfassend ermöglicht die erfindungsgemäße Vorrichtung das elektronische Bereitstellen einer Bildserie, welche astigmatische Bilder mit unterschiedlichen, typisch äquidistant verteilten Drehwinkeln der astigmatischen Hauptachsen und defokussierte Bilder – ohne Astigmatismus – mit unterschiedlichen Abständen

zur Brennebene vor und hinter der Brennebene umfasst. Die astigmatischen Bilder sind Messwerte, während die defokussierten Bilder aus den astigmatischen errechnet werden.

## ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

*Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.*

### Zitierte Patentliteratur

- EP 1230576 B2 [0005]
- WO 2010/050909 A1 [0005]
- WO 2008/025433 A2 [0006]
- EP 1505376 B1 [0010]
- WO 2005/083377 A1 [0010]
- WO 2015/002614 A1 [0010]

### Zitierte Nicht-Patentliteratur

- Druckschrift von Allen et al., „Computational Aberration Correction for an Arbitrary Linear Imaging System“, Phys. Rev. Lett., Vol. 87, Nr. 12, S. 123902–1 ff, 2001 [0012]
- Petersen und Keast, „Astigmatic intensity equation for electron microscopy based Phase retrieval“, Ultramicroscopy 107, S. 635–643, 2007 [0013]
- Masterarbeit von Müller „Entwicklung einer optischen Methode zur Charakterisierung von Oberflächen mittels astigmatischer inline Holografie“, Universität Ulm, 2015 [0014]

### Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Erzeugung einer Bildserie aufweisend ein Gehäuse (50) mit einer Pupille (10) zum Lichteintritt in die Vorrichtung und einen elektronischen Bildsensor (40) im Gehäuse (50), der eine zweidimensionale Anordnung lichtsensitiver Pixel umfasst, gekennzeichnet durch
  - a. eine einen vorbestimmten Astigmatismus einführende optische Komponente (35) angeordnet auf der optischen Achse zwischen Pupille (10) und Bildsensor (40) im Gehäuse;
  - b. eine Einrichtung (30, 60) zur Drehung der Astigmatismus einführenden Komponente (35) um die optische Achse um vorbestimmte Drehwinkel;
  - c. eine Bilderfassungseinrichtung (70) zur Erfassung einer Bildserie, wobei die Bilderfassungseinrichtung (70) die dazu ausgebildet ist, die auf den Pixeln des Bildsensors (40) gemessenen Lichtintensitäten auszulesen und als astigmatische Bildserie, indiziert mit dem bei der Bilderfassung vorliegenden Drehwinkel der Astigmatismus einführenden Komponente (35), zu speichern; und
  - d. eine Bildkonstruktionseinrichtung (80), die dazu ausgebildet ist, für jedes Bild der astigmatischen Bildserie eine Fourier-Transformierte zu berechnen und in Abhängigkeit des indizierten Drehwinkels des Bildes eine Mehrzahl von Ausschnitten der Fourier-Transformierten auszuwählen und jedem Ausschnitt einen Defokuswert zuzuordnen und durch Übertragen und Speichern der Ausschnitte in ein mit Pixelkoordinaten und Defokuswerten indiziertes Array eine Defokusserie im Fourier-Raum zu generieren.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Bildkonstruktionseinrichtung (80) dazu ausgebildet ist, aus der Defokusserie im Fourier-Raum durch eine inverse Fourier-Transformation eine defokussierte Bildserie zu berechnen und zu speichern.
3. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Bildkonstruktionseinrichtung (80) dazu ausgebildet ist, vor der Fourier-Transformation der astigmatischen Bilder auf jedes astigmatische Bild ein Verfahren zur Unterdrückung von Randpunkten anzuwenden.
4. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Bildkonstruktionseinrichtung (80) dazu ausgebildet ist, vor der Fourier-Transformation der astigmatischen Bilder zu jedem astigmatischen Bild ein vervierfaches Bild mit periodisch fortsetzbaren Randwerten zu berechnen und die Fourier-Transformation für das vervierfachte Bild durchzuführen.
5. Vorrichtung nach den Ansprüchen 2 und 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Bildkonstruktionseinrichtung (80) dazu ausgebildet ist, einen vorbestimmten Pixel-Quadranten der berechneten defokussierten Bildserie zu speichern und einer Weiterverarbeitung bereitzustellen.
6. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Bildkonstruktionseinrichtung (80) dazu ausgebildet ist, in der Fourier-Transformierten eines astigmatischen Bildes kreissegmentförmige Ausschnitte auszuwählen, die je einem vorbestimmten Polarwinkelintervall im Pixelkoordinatensystem entsprechen, und aus dem indizierten Drehwinkel des Bildes zu jedem Ausschnitt einen Defokuswert zu bestimmen.
7. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Bildkonstruktionseinrichtung (80) dazu ausgebildet ist, aus einer Serie von astigmatischen Bildern eine Defokusserie zu generieren, bei der jedes Arrayelement wenigstens einmal durch Übertragen von Daten aus Ausschnitten mit Daten belegt worden ist.
8. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch eine Datenkommunikationseinrichtung zur Übermittlung der astigmatischen Bildserie und der berechneten Daten an eine elektronische Datenverarbeitungseinheit.
9. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Astigmatismus einführende optische Komponente (35) als eine Zylinderlinse, vorzugsweise als eine plan-konvexe Zylinderlinse, ausgebildet ist.
10. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Einrichtung zur Drehung der Astigmatismus einführenden Komponente (35) eine Halterung (30) für die Komponente (35) und einen elektrischen Antrieb (60) zum Bewirken einer Drehung der Halterung (30) um die optische Achse um einen vorbestimmten Drehwinkel umfasst.

11. Vorrichtung nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Antrieb (60) zum Bewirken einer kontinuierlichen Drehung der Halterung (30) mit einer vorbestimmten Winkelgeschwindigkeit ausgebildet ist.

12. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 10 oder 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Vorrichtung eine Einrichtung zur zeitlich mit der Drehung Schritt haltenden Messung des Drehwinkels umfasst, die dazu ausgebildet ist, die gemessenen Drehwinkel fortlaufend an die Bilderfassungseinrichtung (70) elektronisch zu kommunizieren.

13. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 10 oder 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Antrieb (60) von einer elektronischen Steuereinrichtung (90) ansteuerbar ausgebildet ist und die Steuereinrichtung (90) dazu ausgebildet ist, mittels Steuerbefehlen eine vorbestimmte zeitliche Abfolge von Drehwinkeln einzurichten und den vorliegenden Drehwinkel fortlaufend an die Bilderfassungseinrichtung (70) elektronisch zu kommunizieren.

14. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Bilderfassungseinrichtung (70) dazu ausgebildet ist, eine astigmatische Bildserie indiziert mit Drehwinkeln aus dem halboffenen Intervall  $[\alpha, \alpha + 180^\circ)$  bezogen auf ein mit dem Bildsensor (40) verbundenes Koordinatensystem zu erfassen, wobei  $\alpha$  eine vorbestimmte Konstante ist und wenigstens vier Bilder mit den Drehwinkeln  $\alpha + n \times 45^\circ$  mit  $n = 0, 1, 2, 3$  erfasst werden.

Es folgen 5 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

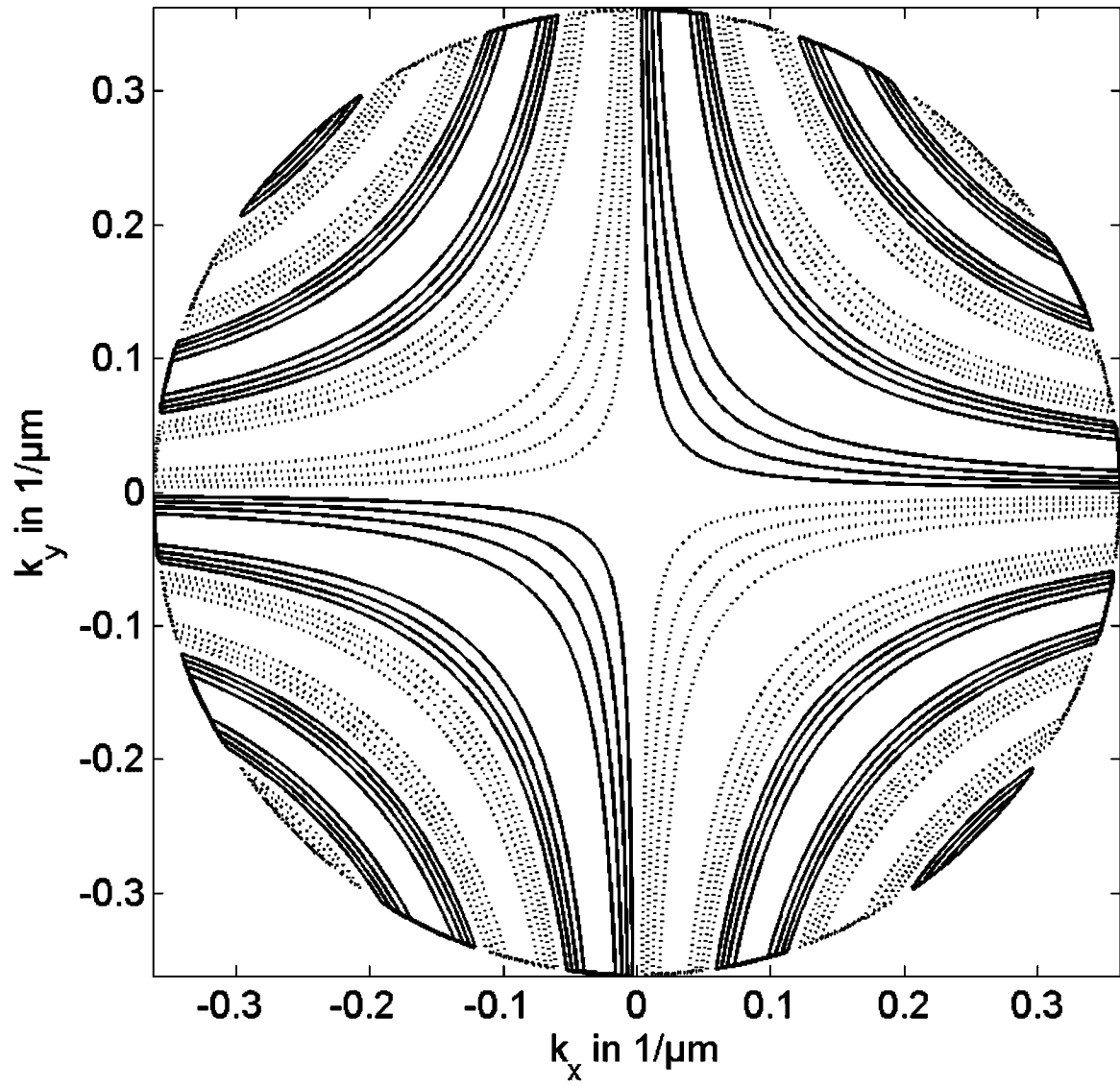


Fig. 1

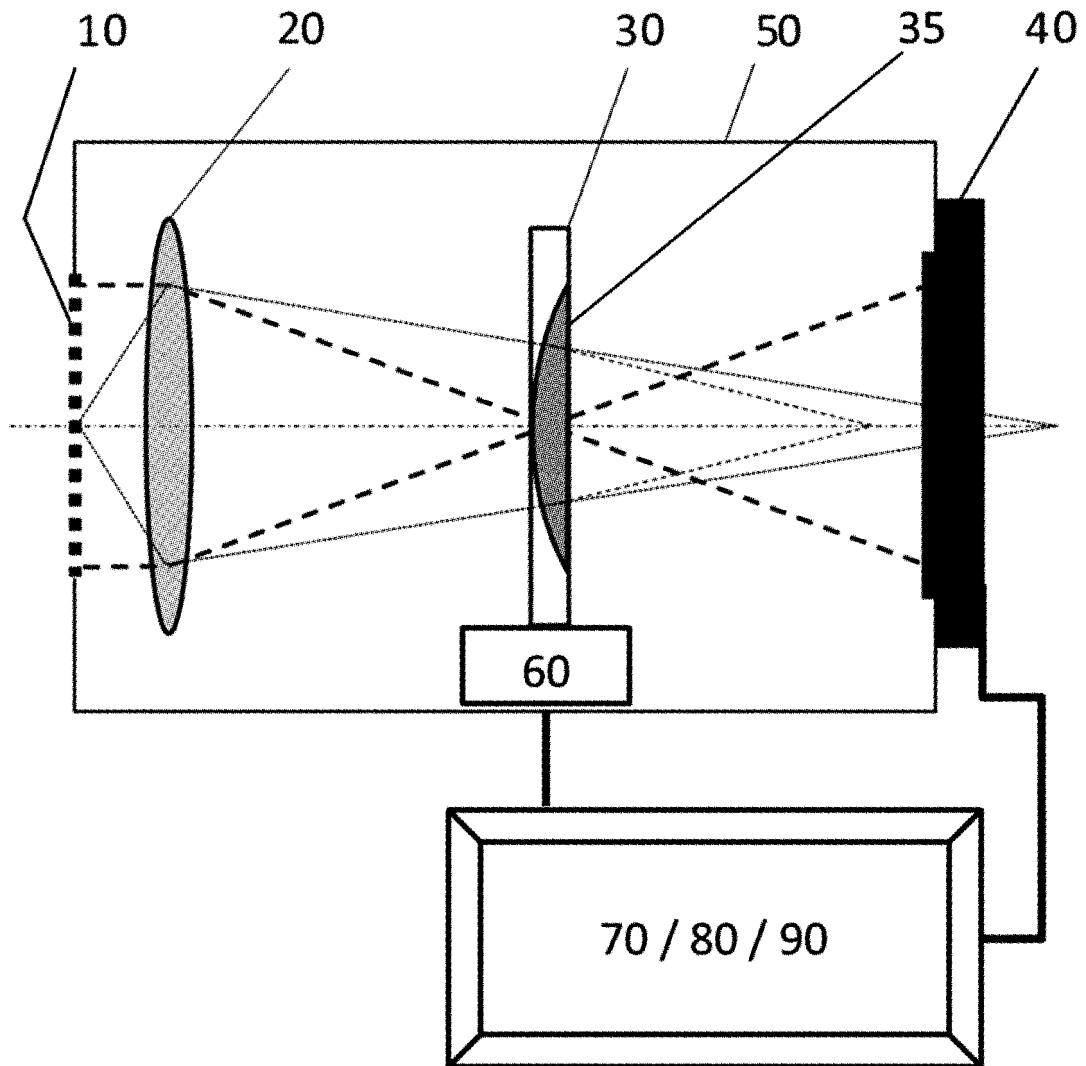


Fig. 2



Fig. 3



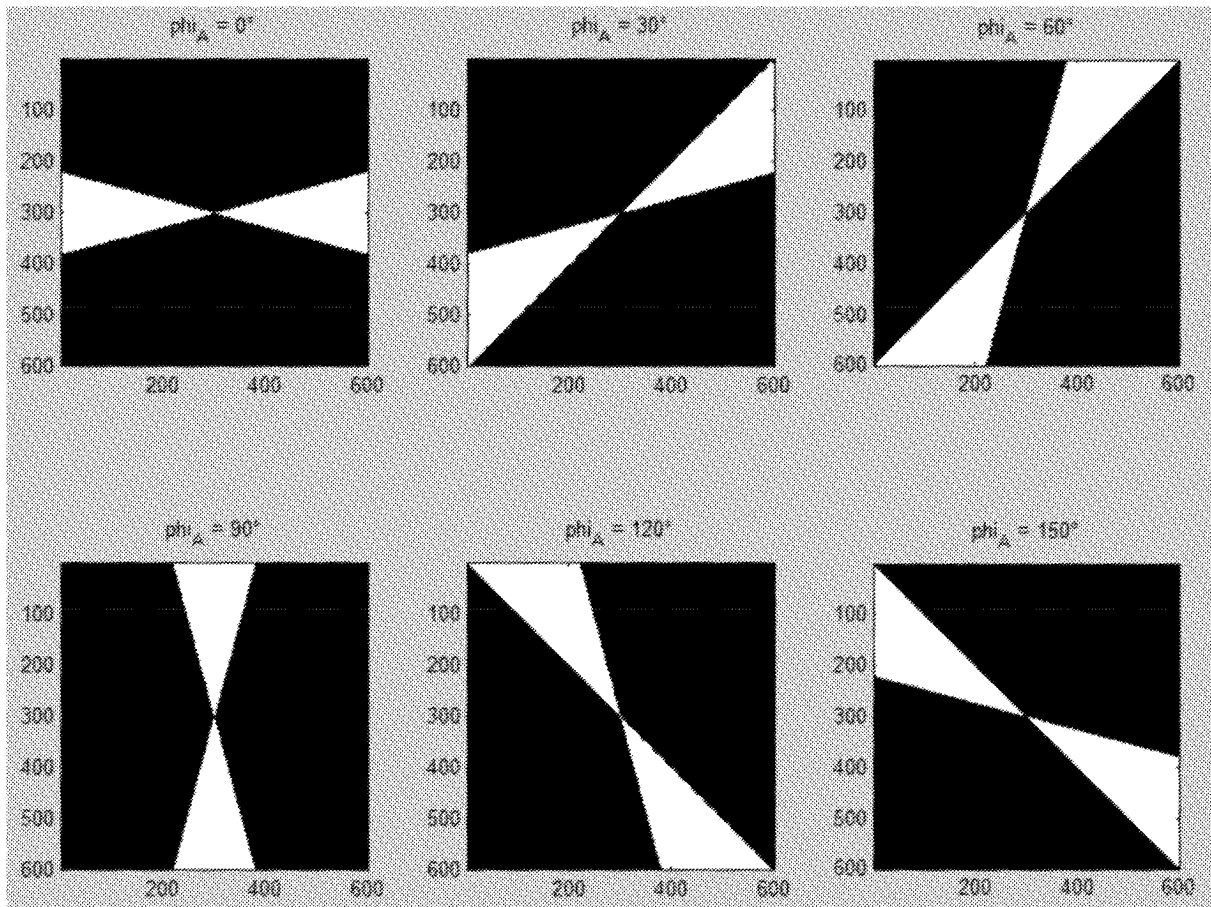


Fig. 4

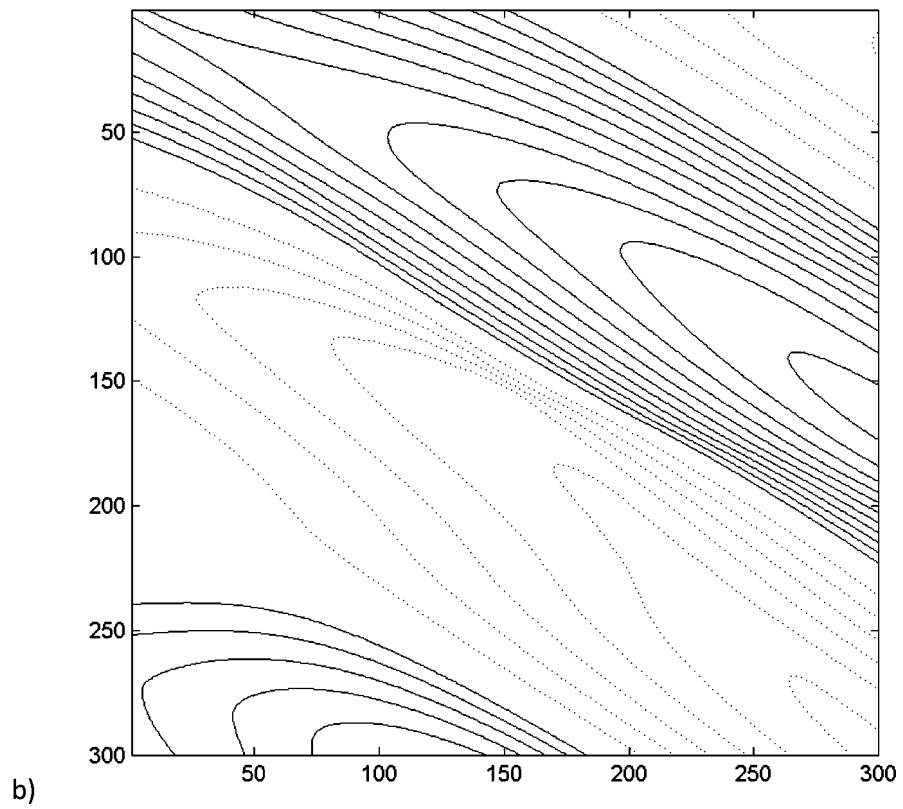
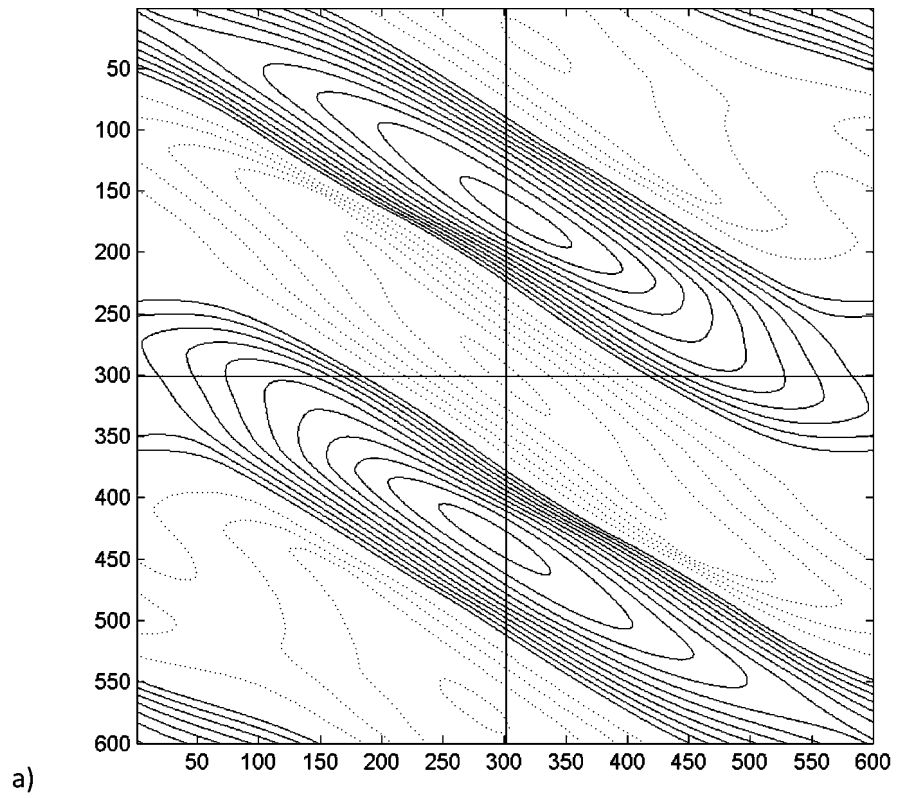


Fig. 5