(19) Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2011 077 982 A1** 2012.12.27

(12) # Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2011 077 982.5**
(22) Anmeldetag: **22.06.2011**
(43) Offenlegungstag: **27.12.2012**

(51) Int Cl.: ***G01M 11/02*** (2011.01)
G01B 11/30 (2011.01)

(71) Anmelder:
Hochschule Bremen, 28199, Bremen, DE

(74) Vertreter:
Fink Numrich Patentanwälte, 80634, München, DE

(72) Erfinder:
Henning, Thomas, 28201, Bremen, DE;
Fleischmann, Friedrich, 27751, Delmenhorst, DE;
Ceyhan, Ufuk, 28203, Bremen, DE; Hilbig, David, M.Sc., 27580, Bremerhaven, DE

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht gezogene Druckschriften:

EP	**0 954 951**	**B1**
EP	**2 012 102**	**A1**
WO	**00/ 29 835**	**A1**

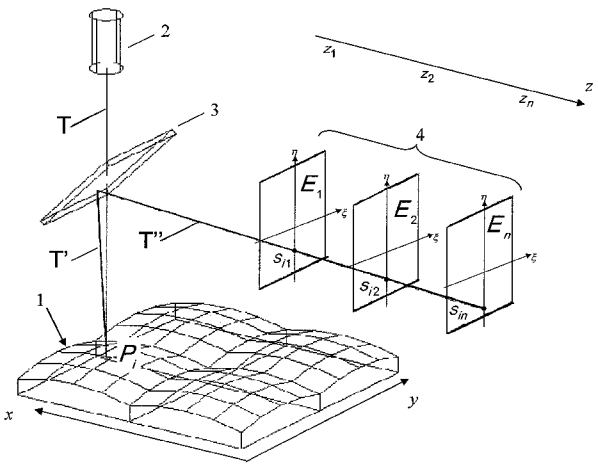
von Finck A.; Duparré A.; Pfeiffer M: Makyoh-Imaging zur Charakterisierung von Oberflächendefekten. In: Fraunhofer IOF Jahresbericht 2008, 2008, 80-81. http://www.iof.fraunhofer.de/content/dam/iof/en/documents/publications/annual-report/2008/jahresbericht-2008.pdf [abgerufen am 09.03.2012]

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur optischen Analyse eines Prüflings**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur optischen Analyse eines Prüflings (1), bei dem ein durch eine Beleuchtungseinrichtung (2) erzeugter Prüfstrahl (T) auf verschiedene Oberflächenpositionen (P_i) auf dem Prüfling (1) gerichtet wird und basierend auf einer Detektion des Prüfstrahls (T), welche über eine Intensitätsmessung mittels einer Sensoreinrichtung (4) erfolgt, für jede Oberflächenposition (P_i) der Strahlverlauf des Prüfstrahls (T) nach Passieren des Prüflings (1) ermittelt wird, wobei zur Ermittlung des Strahlverlaufs die Auftreffpositionen (S_{i1}, S_{i2}, S_{in}) des Prüfstrahls (T) nach Passieren des Prüflings (1) in mehreren, entlang der Richtung des Prüfstrahls (T) zueinander versetzten Ebenen (E_1, E_2, E_n) bestimmt werden. Aus den Strahlverläufen des Prüfstrahls (T) wird eine approximierte Funktion ($S_f(x, y)$) bestimmt, welche die Form einer optischen Wellenfront nach Passieren des Prüflings (1) und/oder die Form der Oberfläche (S) des Prüflings (1) beschreibt. Für jeweilige Oberflächenpositionen (P_i) wird die Phasenverteilung des Prüfstrahls (T) innerhalb seines Querschnitts nach Passieren des Prüflings (1) aus zumindest einer durch die Sensoreinrichtung (4) detektierten Intensitätsverteilung (I_{i1}, I_{i2}) des Prüfstahls (T) in zumindest einer der Ebenen (E_1, E_2, E_n) ermittelt. Basierend auf dieser Phasenverteilung wird eine Korrektur für die approximierte Funktion ($S_f(x, y)$) im Bereich des Querschnitts des Prüfstrahls (T) um die jeweiligen Oberflächenpositionen (P_i) ermittelt.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur optischen Analyse eines Prüflings sowie eine entsprechende Vorrichtung.

[0002] Zur optischen Analyse von Bauteilen, wie z.B. Linsen, Spiegeln, Objekten mit Freiformflächen oder Wafern, sind aus dem Stand der Technik verschiedene Verfahren bekannt. Mithilfe dieser Verfahren können optische Eigenschaften der Bauteile, beispielsweise die durch eine Linse generierte Wellenfront, oder auch die Oberflächentopographie der Bauteile bestimmt werden.

[0003] Ein Standardverfahren zur optischen Analyse von Bauteilen ist die Interferometrie. Dabei wird ein bekanntes, kohärentes Wellenfeld an dem zu analysierenden Prüfling reflektiert oder transmittiert und dadurch verformt. Diese Objektwelle wird mit einer bekannten Referenzwelle überlagert. Das hierbei entstehende Interferenzmuster enthält Informationen über den Prüfling. Bei der Interferometrie ist darauf zu achten, dass die Abweichung zwischen der durch den Prüfling generierten Objektwelle und der Referenzwelle nicht zu groß wird. Deshalb sind in der Regel Referenzoptiken erforderlich, die nahezu die gleiche Topographie wie der Prüfling aufweisen. Interferometrische Messverfahren sind somit aufwändig und benötigen aufgrund der Verwendung von Referenzoptiken hochwertige und teure Messsysteme.

[0004] Ein weiteres Verfahren, das zur Topographiemessung von Prüflingen eingesetzt wird, ist das Abscannen der Oberfläche des Prüflings mit einem optischen Sensor. Hierzu wird ein optischer Abstandssensor relativ zum Prüfling bewegt, um für eine Vielzahl von Oberflächenpunkten auf dem Prüfling den Abstand seiner Oberfläche zu einer Referenzebene zu messen. Scannende Verfahren haben das Problem, dass zum Erzielen einer hohen räumlichen Auflösung sehr viele Punkte auf der Oberfläche des Prüflings angefahren werden müssen.

[0005] Ferner sind aus dem Stand der Technik sog. taktil messende Verfahren bekannt. Dabei werden taktile Abstandssensoren verwendet, bei denen eine Messkugel über die zu vermessende Oberfläche des Prüflings fährt und damit ein Profilschnitt oder auch eine dreidimensionale Oberflächentopographie bestimmt wird. Diese Verfahren haben den Nachteil, dass während des Messprozesses eine mechanische Berührung zwischen der Messkugel und dem Prüfling stattfindet.

[0006] Zur optischen Analyse von Objekten sind darüber hinaus Wellenfrontsensoren, z.B. auf der Basis von Shack-Hartmann-Sensoren, bekannt. In einem Shack-Hartmann-Sensor wird mithilfe eines Mikrolinsenarrays und eines ortsauflösenden Sensors eine optische Komponente analysiert. Ferner gibt es deflektometrische Messverfahren, welche auf dem Prinzip der Streifenreflektion beruhen und über die Deformation eines Linienmusters bei der Abbildung an einem Prüfling Eigenschaften des Prüflings und insbesondere dessen Oberflächentopographie ermitteln.

[0007] In der Druckschrift [1] ist ein Verfahren zur Analyse einer optischen Einrichtung beschrieben, bei dem ein optischer Prüfstrahl auf eine Vielzahl von Oberflächenpositionen der zu analysierenden optischen Einrichtung gerichtet wird und der Prüfstrahl nach Passieren der optischen Einrichtung durch einen ortsauflösenden Sensor in zueinander versetzten Detektionsebenen erfasst wird. Dabei werden der Strahlverlauf der jeweiligen Prüfstrahlen nach Passieren der Einrichtung und hieraus optische Eigenschaften der optischen Einrichtung ermittelt.

[0008] Das Dokument [2] offenbart ein Verfahren und eine Vorrichtung zur ortsaufgelösten Bestimmung der Phase und Amplitude des elektromagnetischen Feldes in der Bildebene einer Abbildung eines Objekts. Dabei wird das Objekt mit kohärentem Licht beleuchtet und in die Bildebene abgebildet. In einer Pupillenebene zwischen Objekt und Bildebene wird die Phase bzw. Amplitude des Lichts mehrmals gemessen, wobei die Phase bzw. Amplitude des Lichts über eine Ortsfrequenzfilterung modifiziert werden. Aus den Messungen kann die Phase der Strahlung, bspw. mit einem Algorithmus aus der Gerchberg-Saxton-Familie, berechnet werden.

[0009] Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Analyse eines Prüflings zu schaffen, mit denen Eigenschaften des Prüflings mit hoher Genauigkeit erfasst werden können.

[0010] Diese Aufgabe wird durch das Verfahren gemäß Patentanspruch 1 bzw. die Vorrichtung gemäß Patentanspruch 14 gelöst. Weiterbildungen der Erfindung sind in den abhängigen Ansprüchen definiert.

[0011] In dem erfindungsgemäßen Verfahren wird in einem Schritt a) ein durch eine Beleuchtungseinrichtung erzeugter Prüfstrahl auf verschiedene Oberflächenpositionen eines Prüflings gerichtet, wobei der Prüfstrahl aus kohärentem bzw. teilkohärentem Licht derart besteht, dass die weiter unten beschriebene Phasenverteilung bestimmbar ist. Dabei wird basierend auf einer Detektion des Prüfstrahls, welche über eine Intensitätsmessung mittels einer Sensoreinrichtung erfolgt, für jede Oberflächenposition der Strahlverlauf des Prüfstrahls nach Passieren des Prüflings ermittelt. Zur Ermittlung des Strahlverlaufs werden die Auftreffpositionen des Prüfstrahls nach Passieren des Prüflings in mehreren, entlang der Richtung des Prüfstrahls zueinander versetzten Ebenen bestimmt. Zur Durchführung des Schritts a) kann z.B. das in der Druckschrift [1] beschriebene Verfahren bzw. die

dort offenbarte Messanordnung eingesetzt werden. Der gesamte Offenbarungsgehalt dieser Druckschrift wird durch Verweis zum Inhalt der vorliegenden Anmeldung gemacht.

[0012] In einem Schritt b) des erfindungsgemäßen Verfahrens wird aus den Strahlverläufen des Prüfstrahls eine approximierte Funktion bestimmt, welche die Form einer optischen Wellenfront nach Passieren des Prüflings und/oder die Form der Oberfläche des Prüflings beschreibt. Vorzugsweise wird durch die Funktion dabei die Form einer ursprünglich ebenen Wellenfront beschrieben, welche durch den Prüfling verformt wird. Auch für den Schritt b) kann die in der Druckschrift [1] beschriebene Messanordnung verwendet werden. Die approximierte Funktion stellt einen näherungsweisen Verlauf der Wellenfront bzw. der Oberfläche dar, da bei der Bestimmung der Auftreffpositionen über den Strahlquerschnitt des Prüfstrahls gemittelt wird.

[0013] In einem Schritt c) des erfindungsgemäßen Verfahrens wird für jeweilige Oberflächenpositionen die Phasenverteilung des Lichts des Prüfstrahls innerhalb seines Strahlquerschnitts nach Passieren des Prüflings und insbesondere unmittelbar nach Passieren des Prüflings aus zumindest einer durch die Sensoreinrichtung detektierten Intensitätsverteilung des Prüfstrahls in zumindest einer der zueinander versetzten Ebenen bestimmt. Vorzugsweise wird die Phasenverteilung an der Oberfläche des Prüflings bestimmt, an welcher der Prüfstrahl reflektiert wird bzw. aus dem Prüfling heraustritt. Zur Ermittlung der Phasenverteilung können aus dem Stand der Technik bekannte Verfahren eingesetzt werden, mit denen aus Intensitätsverteilungen von Licht auf die entsprechende Phasenverteilung des Lichts geschlossen werden kann. Solche Verfahren werden weiter unten näher beschrieben und werden in der Regel als Phase-Retrieval-Verfahren bezeichnet.

[0014] In Schritt d) des erfindungsgemäßen Verfahrens wird basierend auf der zuvor ermittelten Phasenverteilung eine Korrektur für die approximierte Funktion im Bereich des Strahlquerschnitts des Prüfstrahls um die jeweiligen Oberflächenpositionen ermittelt. Hierzu wird der an sich bekannte Zusammenhang zwischen Phase und räumlicher Distanz genutzt, der über die Wellenlänge gegeben ist. Man macht sich in Schritt d) die Erkenntnis zunutze, dass innerhalb des Strahlquerschnitts über die Phasenverteilung auf die relative Veränderung der Wellenfront bzw. der Oberfläche bezüglich der approximierten Funktion geschlossen werden kann. Über die approximierte Funktion kann diese Veränderung in Beziehung zu den absoluten Verlauf der Wellenfront bzw. Oberfläche im Raum gesetzt werden. Somit können aus der Phasenverteilung für entsprechende Positionen innerhalb des Strahlquerschnitts Korrekturterme in der Form von Abweichungen zwischen der Oberflächen-/Wellenfront-Form, bestimmt durch die approximierte Funktion, und der tatsächlichen bzw. mit höherer Auflösung bestimmten Oberflächen-/Wellenfront-Form ermittelt werden.

[0015] Das erfindungsgemäße Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass über die Messung der Phasenverteilung innerhalb des Strahlquerschnitts von Prüfstrahlen mit deutlich höherer räumliche Auflösung die Form einer durch den Prüfling generierten Wellenform bzw. die Oberflächentopographie des Prüflings bestimmt werden kann. Insbesondere kann dabei neben dem Profil der Oberfläche des Prüflings auch die Welligkeit und die Rauheit der Oberfläche gemessen werden. Das erfindungsgemäße Verfahren kann mit einem einfachen Messaufbau ohne Referenzoptiken realisiert werden, wie er beispielsweise in der Druckschrift [1] beschrieben ist.

[0016] Das erfindungsgemäße Verfahren kann sowohl für gerichtet reflektierende Prüflinge als auch für transmissive Prüflinge eingesetzt werden. Unter gerichtet reflektierenden Prüflingen sind dabei Objekte zu verstehen, an denen die Strahlung nicht gestreut wird, sondern nach Art eines Spiegels reflektiert wird. Unter dem obigen Begriff „Passieren des Prüflings“ ist bei einem reflektierenden Prüfling die Reflektion am Prüfling zu verstehen, wohingegen bei einem transmissiven Prüfling der Begriff des Passierens dem Hindurchtreten des Prüfstrahls durch den Prüfling entspricht. Bei gerichtet reflektierenden Prüflingen wird mit dem erfindungsgemäßen Verfahren insbesondere die Form der Oberfläche des Prüflings bestimmt. Demgegenüber wird bei einem transmissiven Objekt, wie z.B. einer Linse, mit dem Verfahren insbesondere die Form der Wellenfront nach Passieren des transmissiven Objekts ermittelt.

[0017] In einer weiteren Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird zur Bestimmung der Auftreffpositionen des Prüfstrahls die Detektionsfläche der Sensoreinrichtung nacheinander in den zueinander versetzten Ebenen angeordnet. Alternativ oder zusätzlich besteht auch die Möglichkeit, dass mit einer Optik die zueinander versetzten Ebenen virtuell in der Detektionsfläche der Sensoreinrichtung geeignet erzeugt werden. Diese Variante hat den Vorteil, dass durch eine Messung in einer einzigen Detektionsfläche gleichzeitig mehrere Intensitätsverteilungen bzw. Auftreffpositionen des Prüfstrahls aus zueinander versetzten Ebenen ermittelt werden können, ohne dass die Sensoreinrichtung in die zueinander versetzten Ebenen verschoben werden muss.

[0018] In einer weiteren Variante des erfindungsgemäßen Verfahrens wird eine jeweilige Auftreffposition des Prüfstrahls über die Ermittlung des Schwerpunkts einer von der Sensoreinrichtung detektierten Intensitätsverteilung des Prüfstrahls bestimmt. Diese Intensitätsverteilung kann dann auch zur Bestim-

mung der Phasenverteilung gemäß Schritt c) des erfindungsgemäßen Verfahrens eingesetzt werden.

[0019] In einer besonders bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens werden die in Schritt a) bestimmten Strahlverläufe durch jeweilige Gradienten der Prüfstrahlen beschrieben, welche beispielsweise durch lineare Regression aus den Auftreffpositionen der Prüfstrahlen in den jeweiligen Ebenen abgeleitet werden. Dabei wird mittels Integration aus diesen Gradienten die approximierte Funktion in an sich bekannter Weise ermittelt.

[0020] In einer weiteren Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird die Phasenverteilung in Schritt c) aus mehreren durch die Sensoreinrichtung detektierten Intensitätsverteilungen des Prüfstrahls in mehreren der Ebenen und insbesondere in zwei Ebenen ermittelt. Dabei wird berücksichtigt, dass zur Bestimmung der Phasenverteilung die Veränderung einer Intensitätsverteilung in verschiedenen Ebenen benötigt wird. Bei der Berechnung der Phasenverteilung über die Intensitätsverteilung in lediglich einer Ebene muss eine Intensitätsverteilung in einer anderen Ebene als vorbekannt angenommen werden.

[0021] Wie bereits oben erwähnt, wird die Phasenverteilung in Schritt c) mit an sich bekannten Verfahren und insbesondere mit einem Phase-Retrieval-Verfahren bestimmt. Eine Ausführungsform eines solchen Phase-Retrieval-Verfahrens wird näher in der detaillierten Beschreibung erläutert. Vorzugsweise wird als Phase-Retrieval-Verfahren ein iteratives Verfahren und insbesondere eine Abwandlung des an sich bekannten Gerchberg-Saxton-Verfahrens verwendet, wobei in dieser Abwandlung anstatt einer Fourier-Transformation ein Propagator für die freie Strahlausbreitung eingesetzt wird.

[0022] In einer weiteren Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens weist der durch die Beleuchtungseinrichtung erzeugte Prüfstrahl eine vorbekannte Intensitätsverteilung im Strahlquerschnitt, insbesondere eine Gaußsche Intensitätsverteilung, auf. In diesem Fall kann zur Bestimmung der Phasenverteilung ggf. nur die gemessene Intensitätsverteilung in einer einzelnen Ebene herangezogen werden, wobei für die andere Ebene die vorbekannte Intensitätsverteilung angenommen werden.

[0023] Vorzugsweise wird der Prüfstrahl in dem erfindungsgemäßen Verfahren mit einem Laser, insbesondere einem fasergekoppelten Diodenlaser, erzeugt. Beispielsweise kann ein fasergekoppelter Diodenlaser mit einer Wellenlänge von 635 Nanometer verwendet werden, wobei vorzugsweise eine Monomodefaser mit einem Kerndurchmesser von 4 Mikrometer benutzt wird.

[0024] Die Wellenlänge des Lichts des Prüfstrahls kann je nach Anwendungsfall verschieden gewählt werden. Vorzugsweise liegt die Wellenlänge im sichtbaren Spektralbereich. Ebenso kann der Strahldurchmesser des Prüfstrahls variiert werden. In bevorzugten Ausführungsformen beträgt der Strahldurchmesser des Prüfstrahls 500 Mikrometer oder weniger, insbesondere 200 Mikrometer, was einem üblichen Strahldurchmesser eines Laserstrahls entspricht.

[0025] In einer besonders bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens wird der Prüfstrahl in einem rasterförmigen Muster auf Oberflächenpositionen auf den Prüfling gerichtet, wobei benachbarte Oberflächenpositionen des rasterförmigen Musters vorzugsweise einen Abstand aufweisen, der dem Strahldurchmesser des Prüfstrahls entspricht oder kleiner als der Strahldurchmesser ist. Auf diese Weise wird die vollflächige Erfassung der Oberfläche des Prüflings bzw. der durch den Prüfling generierten Wellenfront erreicht. Das rasterförmige Muster kann dabei ein matrixförmiges Muster oder auch ein spiralförmiges Muster bzw. ein Muster aus konzentrischen Kreisen sein. Das spiralförmige Muster bzw. das Muster aus konzentrischen Kreisen wird vorzugsweise durch eine Rotation des Prüflings um eine in Richtung des Prüfstrahls verlaufende Achse und durch Bewegung des Prüfstrahls und/oder des Prüflings senkrecht zu dieser Achse erzeugt.

[0026] Neben dem oben beschriebenen Verfahren betrifft die Erfindung eine Vorrichtung zur optischen Analyse eines Prüflings, welche folgende Komponenten umfasst:

– eine Beleuchtungseinrichtung zur Erzeugung eines Prüfstrahls, der im Betrieb der Vorrichtung auf verschiedene Oberflächenpositionen auf den Prüfling gerichtet wird;

– eine Sensoreinrichtung zur Detektion des auf die verschiedenen Oberflächenpositionen auf dem Prüfling gerichteten Prüfstrahls nach Passieren des Prüflings, wobei die Detektion über eine Intensitätsmessung mittels der Sensoreinrichtung erfolgt;

– eine Auswerteeinheit, welche derart ausgestaltet ist, dass sie im Betrieb folgende Schritte durchführt:

i) basierend auf der Detektion des Prüfstrahls durch die Sensoreinrichtung wird für jede Oberflächenposition der Strahlverlauf des Prüfstrahls nach Passieren des Prüflings ermittelt, wobei zur Ermittlung des Strahlverlaufs die Auftreffpositionen des Prüfstrahls nach Passieren des Prüflings in mehreren, entlang der Richtung des Prüfstrahls zueinander versetzten Ebenen bestimmt werden;

ii) aus den Strahlverläufen des Prüflings wird eine approximierte Funktion bestimmt, welche die Form einer optischen Wellenfront nach Passieren des Prüflings und/oder die Form der Oberfläche des Prüflings beschreibt;

iii) für jeweilige Oberflächenpositionen wird die Phasenverteilung des Lichts des Prüfstrahls innerhalb seines Querschnitts nach Passieren des Prüflings aus zumindest einer durch die Sensoreinrichtung detektierten Intensitätsverteilung des Prüfstrahls in zumindest einer der Ebenen ermittelt;
iv) basierend auf der Phasenverteilung wird eine Korrektur für die approximierte Funktion im Bereich des Querschnitts des Prüfstrahls um die jeweiligen Objektpositionen ermittelt.

[0027] Die soeben beschriebene erfindungsgemäße Vorrichtung ist vorzugsweise derart ausgestaltet, dass mit der Vorrichtung eine oder mehrere der oben beschriebenen bevorzugten Varianten des erfindungsgemäßen Verfahrens durchführbar sind.

[0028] Ausführungsbeispiele der Erfindung werden nachfolgend anhand der beigefügten Figuren detailliert beschrieben.

[0029] Es zeigen:

[0030] Fig. 1 eine schematische Darstellung eines Aufbaus zur Durchführung einer Variante des erfindungsgemäßen Verfahrens;

[0031] Fig. 2 eine schematische Darstellung, welche den Zusammenhang zwischen einem einfallenden bzw. reflektierten Prüfstrahl und der Oberflächenform eines Prüflings verdeutlicht; und

[0032] Fig. 3 eine schematische Darstellung, anhand der eine Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Bestimmung der Oberflächentopographie eines reflektierenden Prüflings erläutert wird.

[0033] Die nachfolgend beschriebenen Ausführungsformen des erfindungsgemäßen Verfahrens basieren auf einem Aufbau, wie er in der Druckschrift [1] beschrieben ist. In diesem Dokument wird über eine Beleuchtungseinrichtung ein Prüfstrahl auf verschiedene Oberflächenpositionen eines zu analysierenden Objekts bzw. Prüflings gerichtet. Der Prüfstrahl bzw. dessen Intensitätsverteilung wird für die verschiedenen Oberflächenpositionen nach Passieren des Objekts durch eine geeignete Sensoreinrichtung in mehreren Ebenen erfasst, und hieraus werden in einer Auswerteeinheit die Strahlverläufe dieser Prüfstrahlen und die Wellenfront nach Passieren des Objekts bestimmt.

[0034] Das nachfolgend beschriebene Verfahren stellt eine Erweiterung des in der Druckschrift [1] beschriebenen Verfahrens dahingehend dar, dass über die detektierte Intensitätsverteilung des Lichts des Prüfstrahls dessen Phasenverteilung nach Passieren des Objekts innerhalb des Prüfstrahldurchmessers bestimmt wird, woraus dann Variationen der ursprünglich bestimmten Wellenfront innerhalb des Strahldurchmessers und somit räumlich hochfrequente Anteile der optischen Wellenfront ermittelt werden. D.h., die Form der Wellenfront wird mit höherer räumlicher Auflösung bestimmt. Die nachfolgend beschriebenen Ausführungsformen des erfindungsgemäßen Verfahrens dienen dabei dazu, die Oberflächentopographie eines gerichtet reflektierenden Objekts über einen am Objekt reflektierten Prüfstrahl zu ermitteln, wobei ein eindeutiger Zusammenhang zwischen einer (am) Objekt reflektierten Wellenfront und der Form der Oberfläche des Objekts besteht. Nichtsdestotrotz kann das erfindungsgemäße Verfahren auch zur Vermessung von transmissiven Objekten, wie z.B. Linsen, eingesetzt werden. In diesem Fall wird mit dem Verfahren die optische Wellenfront nach Durchgang durch die Linse bestimmt, woraus wiederum Eigenschaften der Linse abgeleitet werden können.

[0035] In dem Aufbau der Fig. 1 ist der zu analysierende Prüfling **1** ein gerichtet reflektierendes Objekt mit einer strukturierten Oberfläche, welche sich in die dargestellte x- und y-Richtung erstreckt. Zur Bestimmung der Oberflächentopographie wird ein Prüf- bzw. Teststrahl T, der durch eine Strahlungsquelle **2** in der Form eines Lasers generiert wird, senkrecht auf eine Vielzahl von unterschiedlichen Positionen auf der Oberfläche des Prüflings gerichtet. Es erfolgt somit eine Abrasterung bzw. ein Abscannen der Oberfläche des Prüflings, wobei hierfür der Prüfstahl und der Prüfling zueinander versetzt werden. Das Versetzen kann durch eine Verschiebung des Prüfstrahls und/oder auch durch eine Verschiebung des Prüflings in der durch die x-Achse und y-Achse auf gespannten Ebene erfolgen, wie dies auch in der Druckschrift [1] beschrieben ist.

[0036] In dem Aufbau der Fig. 1 durchläuft der Prüfstrahl einen Strahlteiler **3** und wird anschließend nach Durchgang durch den Strahlteiler an der Oberfläche des Prüflings **1** reflektiert. Der an der Oberfläche reflektierte und zum Strahlteiler **3** zurücklaufende Prüfstrahl ist in Fig. 1 mit T' und der anschließend am Strahlteiler reflektierte und um 90° abgelenkte Prüfstrahl mit T'' bezeichnet. Die Oberflächenposition, an welcher der Prüfstrahl in dem Szenario der Fig. 1 auf den Prüfling **1** auftrifft, ist dabei mit P_i bezeichnet. In dem Aufbau der Fig. 1 wird die Intensität des Prüfstrahls für die jeweilige Oberflächenposition P_i mithilfe einer Sensoreinrichtung **4** detektiert, wobei der Aufbau der Sensoreinrichtung nicht gezeigt ist, sondern lediglich die entsprechenden Ebenen E_1, E_2, ..., E_n, in denen mittels der Sensoreinrichtung die Intensitätsverteilung und hieraus die Auftreffpositionen des Prüfstrahls in diesen Ebenen detektiert wird. Die jeweiligen Auftreffpositionen des Prüfstrahls in den einzelnen Ebenen E_1, E_2 bzw. E_n sind dabei mit S_{i1}, S_{i2} bzw. S_{in} bezeichnet. Die einzelnen Ebenen E_1, E_2, ...,

E_n sind versetzt entlang der Achse z angeordnet, in die sich der Prüfstrahl nach dessen Ablenkung durch den Strahlenteiler **3** erstreckt. Die einzelnen Positionen der Ebenen entlang der Achse z sind dabei mit z_1 für die Ebene E_1, z_2 für die Ebene E_2 und z_n für die Ebene E_n bezeichnet. Die Anzahl n der Ebenen kann je nach Ausführungsform variieren, es müssen jedoch mindestens zwei Ebenen vorgesehen sein. Die horizontalen Achsen der Ebenen sind jeweils mit ξ und die vertikalen Achsen jeweils mit η bezeichnet.

[0037] Als Sensoreinrichtung **4** wird in der Ausführungsform der Fig. 1 eine CCD-Kamera mit einer Detektionsfläche in der Form des CCD-Arrays verwendet. Zur Bestimmung der entsprechenden Auftreffpositionen des Prüfstrahls wird diese Detektionsfläche durch Verschieben der Kamera in die Ebenen E_1, E_2, ..., E_n bewegt. Gegebenenfalls kann auch vor der Sensoreinrichtung eine entsprechende Optik vorgesehen sein, mit der ein Prüfstrahl in mehrere Strahlen aufgeteilt wird, so dass die Strahlen bis zur Detektion auf der Detektionsebene unterschiedliche Wege derart zurücklegen, dass in einer einzigen Detektionsebene virtuell die zueinander versetzten Ebenen E_1, E_2 usw. generiert werden und somit ohne Verschieben der Kamera die Auftreffpositionen der Prüfstrahlen erfasst werden können.

[0038] Zur Bestimmung der Auftreffpositionen S_{i1}, S_{i2}, ..., S_{in} wird die Intensitätsverteilung des Prüfstrahls detektiert und basierend darauf der Schwerpunkt dieser Intensitätsverteilung ermittelt, der dann mit der Auftreffposition gleichgesetzt wird. Aus den einzelnen Auftreffpositionen und der Information über den Versatz der Ebenen wird dann durch lineare Regression der Verlauf des Prüfstrahls für die Oberflächenposition P_i in der Form entsprechender Steigungen $T_{\xi i}$ bzw. $T_{\eta i}$ in ξ-Richtung bzw. η-Richtung gemäß dem Koordinatensystem der Ebenen ermittelt. Diese Steigungen haben aufgrund des Reflexionsgesetzes eine eindeutige Beziehung zum Gradienten der Oberfläche des Prüflings **1**, wie nachfolgend anhand von Fig. 2 verdeutlicht wird.

[0039] Fig. 2 zeigt eine Detailansicht eines Teils der Oberfläche S des Prüflings **1** im Bereich der Oberflächenposition P_i, an welcher der Prüfstrahl T nach Durchgang durch den Strahlteiler **3** auftrifft. Der Prüfstrahl ist dabei im Schnitt gezeigt, wobei dessen Durchmesser mit D bezeichnet ist. Der an der Oberfläche reflektierte Prüfstrahl ist wiederum mit T' wiedergegeben, wobei die Ausbreitungsrichtungen der Prüfstrahlen über gestrichelte Linien angedeutet sind. In Fig. 2 ist für die Auftreffposition P_i die Tangentialebene TE an der Oberfläche S sowie das Lot L auf dieser Tangentialebene wiedergegeben. Dabei entspricht der Winkel des Prüfstrahls der Ablenkung um die Summe aus Einfallswinkel und Ausfallswinkel, d.h. dem Winkel $2\cdot\alpha$ in Fig. 2. Der Gradient der Oberflächenform S an der Stelle P_i ist dabei identisch mit dem Tangens des Einfalls- bzw. Ausfallswinkel α, wie aus Fig. 2 ersichtlich ist. Somit beschreibt der Gradient des Prüfstrahls den doppelten Winkel gegenüber dem Gradienten der Oberfläche, so dass aus den Strahlverläufen des Prüfstrahls in einfacher Weise die Gradienten der Oberfläche des Prüflings ermittelt werden können. Durch eine entsprechende, an sich bekannte modale oder zonale Integration kann hieraus die Oberflächenfunktion $S_f(x, y)$ zur Beschreibung der Oberfläche S abgeleitet werden.

[0040] Die Oberflächenfunktion $S_f(x, y)$ ist dabei eine Mittelung über den Bereich des Strahlquerschnitts D des Prüfstrahls auf der Oberfläche des Prüflings. D.h., die maximale Raumfrequenz, mit der die Oberflächentopographie des Prüflings **1** erfasst werden kann, hängt vom Strahldurchmesser D am Ort der Reflexion ab. Dies bedeutet, dass die Bestimmung der Oberflächenfunktion $S_f(x, y)$, die durch das Scannen der gesamten Oberfläche des Prüflings bestimmt werden kann, durch ein Tiefpassverhalten charakterisiert ist, dessen Grenzfrequenz durch den Strahldurchmesser gegeben ist. Durch die Funktion $S_f(x, y)$ wird somit die (gemittelte) Form der Oberflächentopographie, jedoch nicht die Welligkeit und Rauheit der Oberfläche mit Auflösungen kleiner als der Strahldurchmesser wiedergegeben. Die Rauheit von optischen Funktionsflächen bezieht sich dabei auf räumliche Auflösungen von 20 Mikrometer oder weniger, wohingegen die Welligkeit Raumfrequenzen mit typischen Perioden im Bereich von 20 Mikrometer bis 1 Millimeter betrifft. Durch Raumfrequenzen mit Perioden größer als 1 Millimeter wird demgegenüber die Form der Oberfläche beschrieben.

[0041] Das erfindungsgemäße Verfahren schafft in der hier beschriebenen Ausführungsform nunmehr die Möglichkeit, auch die Welligkeit bzw. die Rauheit der Oberfläche eines Prüflings zu erfassen. Hierzu wird ein an sich bekanntes Phase-Retrieval-Verfahren verwendet, welches eine Abwandlung des Gerchberg-Saxton-Verfahrens darstellt und im Folgenden anhand von Fig. 3 näher erläutert wird. In Fig. 3 ist wiederum die Oberfläche S des Objekts im Bereich der Oberflächenposition P_i wiedergegeben. Diese Oberfläche wird durch die gemittelte Funktion $S_f(x, y)$ beschrieben und berücksichtigt nicht die Welligkeit bzw. Rauheit der Oberfläche, welche durch die Linie S angedeutet ist. Die Linie S' entspricht dabei der Oberfläche unter Berücksichtigung der Welligkeit bzw. Rauheit. Die Abweichungen zwischen der Oberfläche S und der Oberfläche S' werden für die entsprechenden Positionen innerhalb des Strahldurchmessers D mit $\Delta S_i(x, y)$ bezeichnet.

[0042] In Fig. 3 ist der an der Oberflächenposition P_i reflektierte Teststrahl T'' bei Hindurchtreten durch die Ebenen E_1 und E_2 wiedergegeben, wobei diese Ebenen in Fig. 3 senkrecht zur Blattebene verlaufen. Aus Übersichtlichkeitsgründen wurde die Refle-

xion des Prüfstrahls am Strahlteiler **3** weggelassen. Im Rahmen der Ermittlung der Auftreffpositionen S_{i1} und S_{i2} werden entsprechende Leistungsdichte- bzw. Intensitätsverteilungen I_{i1} für die Ebene E_1 bzw. I_{i2} für die Ebene E_2 ermittelt. In Fig. 3 wurde als Prüfstrahl ein Laserstrahl mit Gaußscher Intensitätsverteilung verwendet. Diese Intensitätsverteilung ist unmittelbar nach der Reflexion am Prüfling in der Ebene E_1 noch vorhanden. Aufgrund der durch die Reflexion veränderten Phase des Prüfstrahls verändert sich die Intensitätsverteilung jedoch bei größeren Abständen vom Prüfling, was durch die Intensitätsverteilung I_{i2} der Fig. 3 angedeutet ist.

[0043] Die Intensitätsverteilungen I_{i1} und I_{i2} werden nunmehr dazu benutzt, um basierend auf einem Phase-Retrieval-Verfahren die Phasenverteilung des Prüfstrahls innerhalb des Strahldurchmessers an der Oberfläche S zu bestimmen. Wie bereits oben erwähnt, beruht dieses Phase-Retrieval-Verfahren auf einer Abwandlung des in der Druckschrift [3] beschriebenen Gerchberg-Saxton-Verfahrens. Gemäß dem Gerchberg-Saxton-Verfahren wird aus mindestens zwei bekannten bzw. gemessenen Intensitätsverteilungen die zugehörige Phasenverteilung durch einen Iterationsalgorithmus bestimmt. In dem ursprünglichen Verfahren gemäß Druckschrift [3] wurden hierbei die Intensitätsverteilungen in der Pupillen- und Fokalebene eines optischen Elements herangezogen. In diesem Fall sind die entsprechenden Amplitudenverteilungen über eine Fourier-Transformation miteinander verknüpft. Der Iterationsalgorithmus kann jedoch auch zwischen beliebigen anderen Ebenen durchgeführt werden, welche entlang der optischen Achsen gegeneinander verschoben sind. D.h., anstelle der Fourier-Transformation wird in einem solchen abgewandelten Verfahren der Propagator für die freie Strahlausbreitung verwendet. Zwecks näherer Beschreibung von Phase-Retrieval-Verfahren wird auch auf die Dokumente [4] und [5] verwiesen.

[0044] In der hier beschriebenen Ausführungsform der Erfindung wird ein Phase-Retrieval-Algorithmus eingesetzt, der im Wesentlichen auf der iterativen Abfolge von vier Schritten besteht (siehe auch Dokument [5]). Zunächst wird in einer ersten Ebene eine Amplitudenverteilung aus der in dieser Ebene gemessenen Intensitätsverteilung und einer geschätzten, willkürlich gewählten Phasenverteilung gebildet. Die gemessene Intensitätsverteilung ist in der Ausführungsform der Fig. 3 dabei die Intensitätsverteilung I_{i1}. Die Amplitudenverteilung wird unter Verwendung des Propagators der freien Strahlausbreitung in eine zweite Ebene propagiert, welche gemäß Fig. 3 der Ebene E_2 entspricht. Nun erfolgt eine für den Algorithmus typische Manipulation derart, dass bei Erhaltung der Phasenverteilung der numerisch berechnete Betrag der Amplitudenverteilung durch die Wurzel der in der zweiten Ebene gemessenen Intensitätsverteilung ersetzt wird. Die gemessene Intensitätsverteilung in der zweiten Ebene ist in Fig. 3 die Intensitätsverteilung I_{i2}. Die auf diese Weise synthetisch generierte Amplitudenverteilung wird anschließend zurück in die Ausgangsebene, d.h. die Ebene E_1 der Fig. 3, propagiert. In dieser Ebene erfolgt wiederum die zuvor beschriebene Manipulation der Amplitudenverteilung mit dem einzigen Unterschied, dass jetzt die in der Ausgangsebene gemessene Intensitätsverteilung (Verteilung I_{i1} gemäß Fig. 3) herangezogen wird. Der Algorithmus wird so lange wiederholt, bis die propagierten Verteilungen möglichst gut den gemessenen Intensitätsverteilungen entsprechen. In diesem Fall ist in den beiden Ebenen die Phase aus den Intensitätsmessungen rekonstruiert. Durch Anwendung des Propagators kann nunmehr die Phasenverteilung in einer anderen Ebene bestimmt werden, wobei hierfür der Abstand zwischen der Ausgangsebene und der anderen Ebene bekannt sein muss.

[0045] Gemäß Fig. 3 wird die Phasenverteilung $\varphi_i(x, y)$ an der Oberfläche S des Prüflings unmittelbar nach der Reflexion am Prüfling bestimmt. In dieser Phasenverteilung sind die Höhenunterschiede der Oberfläche innerhalb des Strahldurchmessers D codiert, wobei die Phasenverteilung jedoch keine Informationen hinsichtlich der Lage des Prüfstrahls in Bezug auf die Oberfläche S enthält. Diese Information ist jedoch durch die gemittelte Form der Oberfläche gemäß der Funktion $S_f(x, y)$ gegeben. Somit kann über die Phasenunterschiede innerhalb der Phasenverteilung und die Funktion $S_f(x, y)$ die Abweichung $\Delta S_i(x, y)$ gemäß Fig. 3 ermittelt werden. Es wird somit ein entsprechender Korrekturterm ΔS_i für entsprechende Positionen innerhalb des Strahldurchmessers bestimmt, der die Welligkeit bzw. Rauheit der Oberfläche innerhalb des Strahlquerschnitts des Prüfstrahls beschreibt.

[0046] Bei einer hinreichenden Abtastung des Prüfstrahls in den entsprechenden Ebenen E_1 und E_2 kann mit dem soeben beschriebenen Verfahren die Auflösung der Messung und damit die Auflösung der ermittelten Oberflächentopographie um einen Faktor von 20 bis 100 erhöht werden. Insbesondere wird neben der Form der Oberfläche des Prüflings auch dessen Welligkeit und Rauheit erfasst. Wie bereits oben erwähnt, kann das Verfahren auch zur Vermessung von transmissiven Prüflingen und insbesondere von Linsen eingesetzt werden. In diesem Fall wird die Form einer Wellenfront ebenfalls mit einer deutlich höheren Genauigkeit bestimmt.

[0047] Die im Vorangegangenen beschriebenen Ausführungsformen des erfindungsgemäßen Verfahrens zeichnen sich durch eine Kombination eines Gradientenverfahrens mit einem Phase-Retrieval-Verfahren aus. Gemäß dem Gradientenverfahren wird in an sich bekannter Weise der Strahlverlauf von Prüfstrahlen ermittelt und hierdurch die räum-

lich niederfrequenten Anteile der Oberflächentopographie eines Prüflings bestimmt. Hierdurch wird eine virtuelle Referenzoberfläche generiert, welche die über den Strahlquerschnitt gemittelte Form der Oberfläche des Prüflings beschreibt. Mit dem Phase-Retrieval-Verfahren werden aus den gemessenen Leistungsdichteverteilungen des Prüfstrahls in mehreren Ebenen die räumlich hochfrequenten Abweichungen der tatsächlichen Oberflächentopographie von der virtuellen Referenzoberfläche im Bereich des Prüfstrahls abgeleitet. Das Verfahren entspricht insofern prinzipiell der Interferometrie mit einer variablen, dem jeweiligen Prüfling anpassbare Referenzfläche.

[0048] Das erfindungsgemäße Verfahren weist eine Reihe von Vorteilen auf. Insbesondere kann die Oberflächentopographie eines Prüflings bzw. die durch einen Prüfling generierte optische Wellenfront mit hoher Dynamik und hoher Raumfrequenz gemessen werden. Die vertikale Auflösung liegt dabei im Subwellenbereich entsprechend der Wellenlänge des einfallenden Prüfstrahls. Das liegt daran, dass Aberrationen in diesem Bereich bereits signifikanten Einfluss auf das Propagationsverhalten kohärenter Strahlung haben. Insofern kann prinzipiell durch Messung der Intensitätsverteilungen auf Aberrationen und damit auf die hochfrequente Oberflächentopographie des Prüflings geschlossen werden. Aufgrund der Bestimmung der virtuellen Referenzfläche durch das Gradientenverfahren können nahezu beliebig geformte Oberflächentopographien vermessen werden. Insbesondere ist es möglich, die Topographien asphärischer Prüflinge oder von Freiformflächen zu erfassen, die mit herkömmlichen Methoden nur sehr schwer oder gar nicht messbar sind. Darüber hinaus kann das erfindungsgemäße Verfahren mit einem kompakten und kostengünstigen Aufbau, z.B. basierend auf dem Aufbau der Druckschrift [1], realisiert werden. Es werden keine teuren Referenzoptiken oder spezielle Optiken zur Anpassung der Messapertur oder der Apertur des Prüflings benötigt. Aufgrund der Tatsache, dass Gradienten und nicht absolute Abstände gemessen werden, ist der Aufbau robust gegenüber Umwelteinflüssen, wie z.B. Erschütterungen.

Literaturverzeichnis:

[1] DE 10 2007 003 681 A1
[2] WO 2008/025433 A2
[3] R. W. Gerchberg und W. O. Saxton, “A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures”, Optik, vol. 35, no. 2, Seiten 237–246, April 1972
[4] L.J. Allen und M.P. Oxley, “Phase retrieval from series of images obtained by defocus variation”, Optics Communications 199 (2001), Seiten 65–75
[5] J.R. Fienup, “Phase retrieval algorithms: a comparison”, Applied Optics, vol. 21, no. 15, August 1982

Patentansprüche

1. Verfahren zur optischen Analyse eines Prüflings (**1**), bei dem
a) ein durch eine Beleuchtungseinrichtung (**2**) erzeugter Prüfstrahl (T) auf verschiedene Oberflächenpositionen (P_i) auf dem Prüfling (**1**) gerichtet wird und basierend auf einer Detektion des Prüfstrahls (T), welche über eine Intensitätsmessung mittels einer Sensoreinrichtung (**4**) erfolgt, für jede Oberflächenposition (P_i) der Strahlverlauf des Prüfstrahls (T) nach Passieren des Prüflings (**1**) ermittelt wird, wobei zur Ermittlung des Strahlverlaufs die Auftreffpositionen (S_{i1}, S_{i2}, S_{in}) des Prüfstrahls (T) nach Passieren des Prüflings (**1**) in mehreren, entlang der Richtung des Prüfstrahls (T) zueinander versetzten Ebenen (E_1, E_2, E_n) bestimmt werden;
b) aus den Strahlverläufen des Prüfstrahls (T) eine approximierte Funktion ($S_f(x, y)$) bestimmt wird, welche die Form einer optischen Wellenfront nach Passieren des Prüflings (**1**) und/oder die Form der Oberfläche (S) des Prüflings (**1**) beschreibt;
c) für jeweilige Oberflächenpositionen (P_i) die Phasenverteilung des Prüfstrahls (T) innerhalb seines Querschnitts nach Passieren des Prüflings (**1**) aus zumindest einer durch die Sensoreinrichtung (**4**) detektierten Intensitätsverteilung (I_{i1}, I_{i2}) des Prüfstahls (T) in zumindest einer der Ebenen (E_1, E_2, E_n) ermittelt wird;
d) basierend auf der Phasenverteilung eine Korrektur für die approximierte Funktion ($S_f(x, y)$) im Bereich des Querschnitts des Prüfstrahls (T) um die jeweiligen Oberflächenpositionen (P_i) ermittelt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem der Prüfling (**1**) ein gerichtet reflektierendes Objekt umfasst und mit dem Verfahren insbesondere die Form der Oberfläche (S) des Objekts ermittelt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, bei dem der Prüfling (**1**) ein transmissives Objekt, insbesondere eine Linse, umfasst und mit dem Verfahren insbesondere die Form der Wellenfront nach Passieren des transmissiven Objekts ermittelt wird.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem zur Bestimmung der Auftreffpositionen (S_{i1}, S_{i2}, S_{in}) des Prüfstrahls (T) die Detektionsfläche der Sensoreinrichtung (**4**) in den zueinander versetzen Ebenen (E_1, E_2, E_n) angeordnet wird und/oder mit einer Optik die zueinander versetzten Ebenen (E_1, E_2, E_n) virtuell in der Detektionsfläche der Sensoreinrichtung (**4**) erzeugt werden.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem eine jeweilige Auftreffposition (S_{i1}, S_{i2}, S_{in}) des Prüfstrahls (T) über die Ermittlung des Schwerpunkts einer von der Sensoreinrichtung (**4**) detektierten Intensitätsverteilung des Prüfstrahls (T) bestimmt wird.

6. Verfahren nach einem der vorhergehende Ansprüche, bei dem die in Schritt a) bestimmten Strahlverläufe durch jeweilige Gradienten der Prüfstahlen (T) beschrieben werden, wobei mittels Integration aus diesen Gradienten die approximierte Funktion ($S_f(x, y)$) ermittelt wird.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Phasenverteilung in Schritt c) aus mehreren durch die Sensoreinrichtung (**4**) detektierten Intensitätsverteilungen des Prüfstahls (T) in mehreren der Ebenen (E_1, E_2, E_n) und insbesondere in zwei Ebenen ermittelt wird.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Phasenverteilung in Schritt c) über ein Phase-Retrieval-Verfahren ermittelt wird.

9. Verfahren nach Anspruch 8, bei dem als Phase-Retrieval-Verfahren ein iteratives Verfahren und insbesondere eine Abwandlung des Gerchberg-Saxton-Verfahrens eingesetzt wird, bei der anstatt einer Fourier-Transformation ein Propagator für die freie Strahlausbreitung eingesetzt wird.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem der durch die Beleuchtungseinrichtung (**2**) erzeugte Prüfstahl (T) eine vorbekannte Intensitätsverteilung im Strahlquerschnitt, insbesondere eine Gaußsche Intensitätsverteilung, aufweist.

11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem der Prüfstrahl (T) mit einem Laser, insbesondere einem fasergekoppelter Diodenlaser, erzeugt wird.

12. Verfahren nach eine der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Wellenlänge des Lichts des Prüfstahls (T) im sichtbaren Spektralbereich liegt und/oder der Strahldurchmesser der Prüfstrahls 500 Mikrometer oder weniger, insbesondere 200 Mikrometer, beträgt.

13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem der Prüfstahl (T) in einem rasterförmigen Muster auf Oberflächenpositionen (P_i) auf dem Prüfling (**1**) gerichtet wird, wobei benachbarte Oberflächenpositionen des rasterförmigen Musters vorzugsweise einen Abstand aufweisen, der dem Strahldurchmesser des Prüfstrahls (T) entspricht oder kleiner als der Strahldurchmesser ist, wobei das rasterförmige Muster vorzugsweise ein matrixförmiges Muster und/oder ein spiralförmiges Muster und/oder ein Muster aus konzentrischen Kreisen ist, wobei das spiralförmige Muster und/oder das Muster aus konzentrischen Kreisen insbesondere durch eine Rotation des Prüflings (**1**) um eine in Richtung des Prüfstrahls (T) verlaufende Achse und durch Bewegung des Prüfstrahls (T) und/oder des Prüflings (**1**) senkrecht zu dieser Achse erzeugt wird.

14. Vorrichtung zur optischen Analyse eines Prüflings (**1**), umfassend:
– eine Beleuchtungseinrichtung (**2**) zur Erzeugung eines Prüfstrahls (T), der im Berieb der Vorrichtung auf verschiedene Oberflächenpositionen (P_i) auf dem Prüfling (**1**) gerichtet wird;
– eine Sensoreinrichtung (**4**) zur Detektion des auf die verschiedenen Oberflächenpositionen (P_i) auf dem Prüfling (**1**) gerichteten Prüfstrahls (T) nach Passieren des Prüflings (**1**), wobei die Detektion über eine Intensitätsmessung mittels der Sensoreinrichtung (**4**) erfolgt;
– eine Auswerteeinheit, welche derart ausgestaltet ist, dass sie im Betrieb folgende Schritte durchführt:
i) basierend auf der Detektion des Prüfstahls durch die Sensoreinrichtung (**4**) wird für jede Oberflächenposition (P_i) der Strahlverlauf des Prüfstrahls (T) nach Passieren des Prüflings (**1**) ermittelt, wobei zur Ermittlung des Strahlverlaufs die Auftreffpositionen (S_{i1}, S_{i2}, S_{in}) des Prüfstrahls (P) nach Passieren des Prüflings (**1**) in mehreren, entlang der Richtung des Prüfstrahls (**1**) zueinander versetzten Ebenen (E_1, E_2, E_3) bestimmt werden;
ii) aus den Strahlverläufen des Prüfstrahls (T) wird eine approximierte Funktion ($S_f(x, y)$) bestimmt, welche die Form einer optischen Wellenfront nach Passieren des Prüflings (**1**) und/oder die Form der Oberfläche des Prüflings (**1**) beschreibt;
iii) für jeweilige Oberflächenpositionen (P_i) wird die Phasenverteilung des Prüfstrahls (T) innerhalb seines Querschnitts nach Passieren des Prüflings (**1**) aus zumindest einer durch die Sensoreinrichtung (**4**) detektierten Intensitätsverteilung (I_{i1}, I_{i2}) des Prüfstahls (T) in zumindest einer der Ebenen (E_1, E_2, E_n) ermittelt;
iv) basierend auf der Phasenverteilung wird eine Korrektur für die approximierte Funktion ($S_f(x, y)$) für den Bereich des Querschnitts des Prüfstrahls (T) um die jeweiligen Oberflächenpositionen (P_i) ermittelt.

15. Vorrichtung nach Anspruch 14, welche derart ausgestaltet ist, dass mit der Vorrichtung ein Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 13 durchführbar ist.

Es folgen 3 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

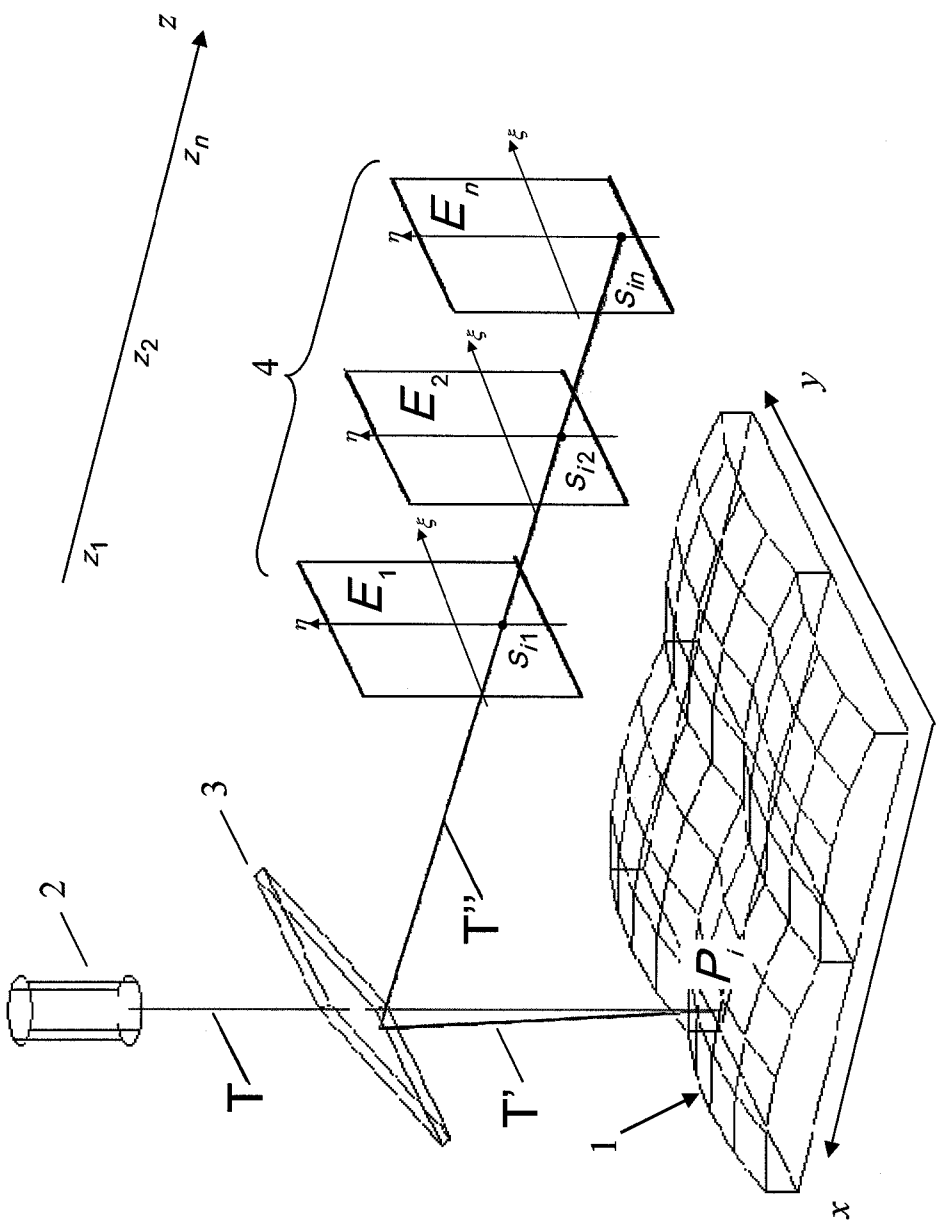


Fig. 1

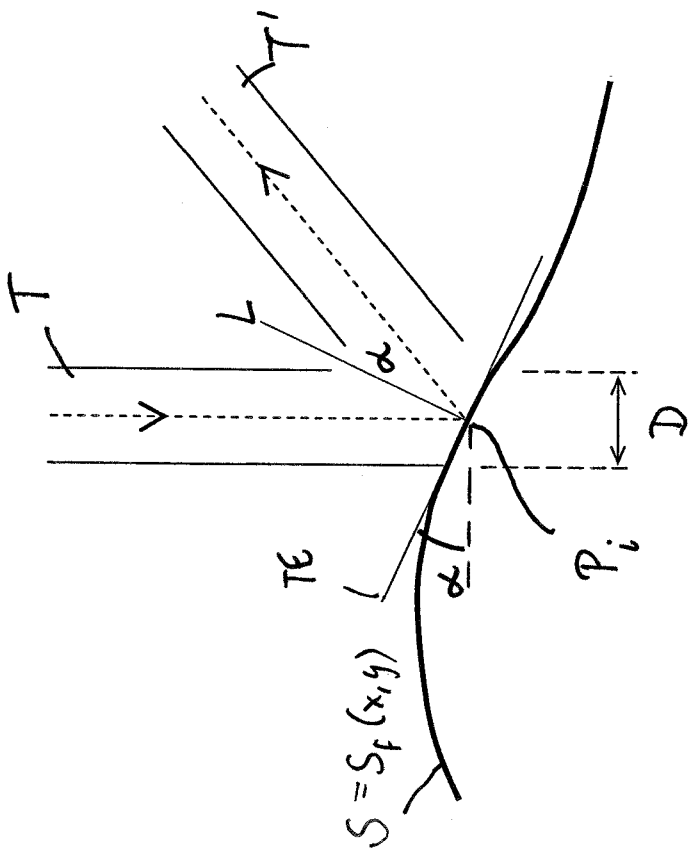


Fig. 2

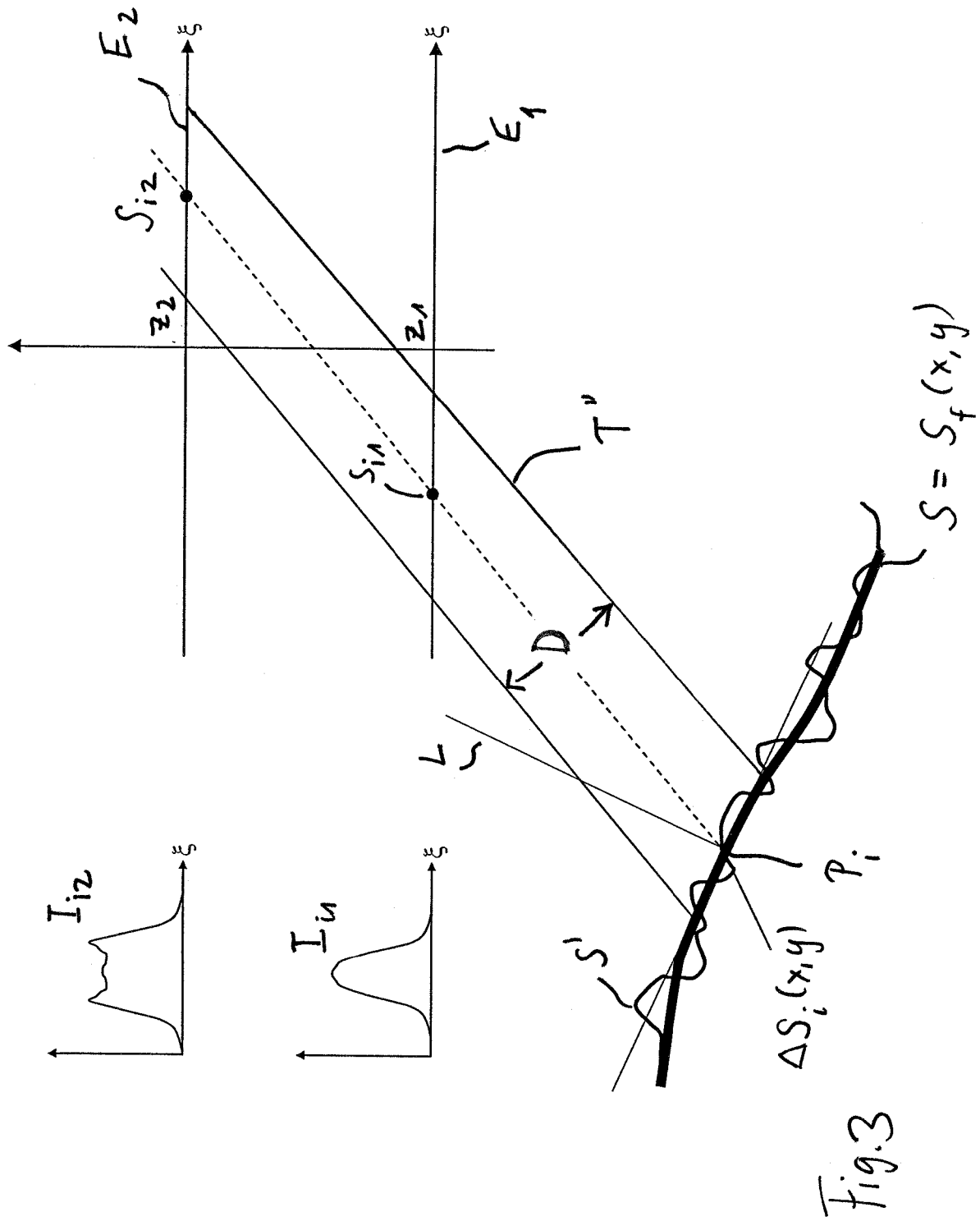


Fig.3