

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES  
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
29. Dezember 2005 (29.12.2005)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 2005/124274 A2**

(51) Internationale Patentklassifikation<sup>7</sup>: **G01B 9/00**,  
11/00

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2005/006577

(22) Internationales Anmeldedatum:  
17. Juni 2005 (17.06.2005)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:  
60/580,112 17. Juni 2004 (17.06.2004) US

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von  
US): **CARL ZEISS SMT AG** [DE/DE]; Carl-Zeiss-Strasse  
22, 73447 Oberkochen (DE).

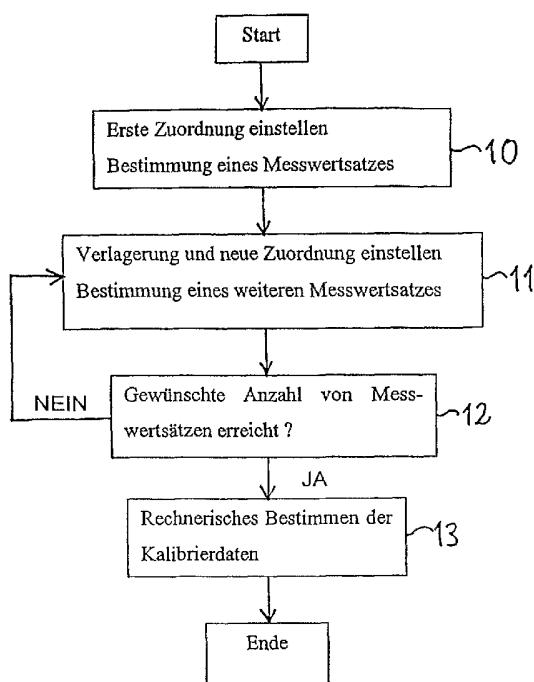
(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **SCHELLHORN, Uwe**  
[DE/DE]; Hegelstrasse 40, 73431 Aalen (DE). **MANGER,**  
**Matthias** [DE/DE]; Silcherstrasse 1, 73430 Aalen (DE).  
**KEIL, Michael** [DE/DE]; Schleiermacherstrasse 25,  
73431 Aalen (DE). **EMER, Wolfgang** [DE/DE]; Han-  
nah-Arendt-Strasse 6, 73431 Aalen (DE).

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: CALIBRATING METHOD, MEASURING METHOD, OPTICAL MEASURING DEVICE AND OPERATING  
METHOD

(54) Bezeichnung: KALIBRIERVERFAHREN, MESSVERFAHREN, OPTISCHE MESSVORRICHTUNG UND BETRIEBS-  
VERFAHREN



10... ESTABLISH FIRST ASSIGNMENT  
DETERMINATION OF A SET OF MEASURING VALUES  
11... DISPLACEMENT AND ESTABLISHMENT OF NEW ASSIGNMENT  
12... HAS DESIRED NUMBER OF SETS OF MEASURING VALUES BEEN ACHIEVED?  
13... ARITHMETICAL DETERMINATION OF CALIBRATION DATA

NEIN = NO  
JA = YES  
ENDE = FINISH

(57) Abstract: The invention relates to a method for calibrating a measuring device comprising a transmitter arrangement consisting of several transmitter elements for transmitting measuring signals to field elements of the item to be examined and a receiver arrangement consisting of several receiver elements for receiving measuring signals from the field elements of the item to be examined. The invention also relates to an associated method for measurement on an item to be examined, to a calibratable optical measurement device for adjustment testing and to a method for operating the measuring device. According to the inventive calibrating method, a first assignment of receiver elements, transmitter elements and field elements of an item to be examined is established and a first measuring process for obtaining a first set of measuring values is carried out. A new assignment is then established until a predefinable number of measuring value sets is provided, whereupon calibration data of the transmitter elements and/or receiver elements is arithmetically determined from a predefinable equation system. Use, for example, for calibrating a wave front measuring device for a projection lens of a microlithography projection illumination device and for calibrating an optical measuring device for adjustment testing.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Kalibrierung einer Messvorrichtung, die eine Senderanordnung mit mehreren Senderelementen zum Aussenden von Messsignalen zu Feldelementen des Prüflings und eine Empfängeranordnung mit mehreren Empfängerelementen zum Empfangen von Messsignalen von den Feldelementen des Prüflings umfasst, auf ein zugehöriges Verfahren zur Messung an einem Prüfling, auf eine damit kalibrierbare optische Messvorrichtung zur Passeprüfung und

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2005/124274 A2

auf ein



(74) **Anwalt: RUFF, WILHELM, BEIER, DAUSTER & PARTNER;** Kronenstrasse 30, 70174 Stuttgart (DE).

(81) **Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) **Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW,

GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

**Veröffentlicht:**

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

Verfahren zum Betrieb der optischen Messvorrichtung. Bei einem erfindungsgemäßen Kalibrierverfahren wird eine erste Zuordnung von Empfängerelementen, Senderelementen und Prüflingsfeldelementen eingestellt und ein erster Messvorgang zur Gewinnung eines ersten Satzes von Messwerten durchgeführt, dann eine neue Zuordnung eingestellt und ein erneuter Messvorgang durchgeführt, bis eine vorgebbare Anzahl von Messwertsätzen vorliegt, wonach rechnerisch Kalibrierdaten der Senderelemente und/oder der Empfängerelemente aus einem vorgebbaren Gleichungssystem bestimmt werden. Verwendung z.B. zur Kalibrierung einer Wellenfrontvermessungsvorrichtung für ein Projektionsobjektiv einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage und zur Kalibrierung einer optischen Messvorrichtung zur Passeprüfung.

BeschreibungKalibrierverfahren, Messverfahren, optische Messvorrichtung  
und Betriebsverfahren

5

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Kalibrierung einer Messvorrichtung, die zum Messen an einem Prüfling eine Senderanordnung mit mehreren Senderelementen zum Aussenden von Messsignalen zu Feldelementen des Prüflings und eine Empfängeranordnung mit mehreren Empfängerelementen zum Empfangen von Messsignalen von den Feldelementen des Prüflings umfasst, auf ein zugehöriges Verfahren zur Messung an einem Prüfling, auf eine damit kalibrierbare optische Messvorrichtung zur Passeprüfung an einer Oberfläche mit einer Sensoranordnung und Auswertemitteln zur Ermittlung von Oberflächenformdaten anhand von durch die Sensoranordnung erfassten Messdaten, auf ein Verfahren zum Betrieb der optischen Messvorrichtung, auf ein Verfahren zur pupillenaufgelösten Bestimmung der Transmission eines optischen Abbildungssystems und auf ein Kalibrierverfahren hierfür.

20

Der Begriff „Feldelement“ bezeichnet hierbei allgemein einen jeweiligen Teilbereich des gesamten wirksamen Erfassungsbereichs des Prüflings, in Anlehnung an den üblichen Begriff „Feld“ für den Erfassungsbereich eines optischen Abbildungssystems. Je nach Systemtyp der vorliegend betrachteten Messvorrichtungen kann die Bestimmung der den Feldelementen eines Prüflings zugeordneten Messwerte sequenziell, parallel oder mittels einer Kombination von parallelen und sequenziellen Messungen durchgeführt werden.

30 Bei Messvorrichtungen mit parallel messenden Kanälen wird die Messgröße an mehreren, vorliegend wie gesagt als Feldelemente bezeichneten Stellen eines Prüflingsfeldes gleichzeitig bestimmt. Solche

**BESTÄTIGUNGSKOPIE**

- Mehrkanalmesssysteme sind z.B. hochauflösende, interferometrische optische Messsysteme, bei denen an einem als Prüfling dienenden optischen Abbildungssystem objektseitig eine periodische Struktur angeordnet wird, welche durch das Abbildungssystem abgebildet und
- 5 mit einer bildseitig angebrachten periodischen Struktur zur Überlagerung gebracht wird, so dass durch Auswertung des Überlagerungsbildes Rückschlüsse auf Bildfehler des optischen Abbildungssystems gezogen werden können. Ein weiterer Typ vorliegend explizit betrachteter Messvorrichtungen mit mehreren parallelen Messkanälen dient zur
- 10 sogenannten Passeprüfung, d.h. zur Vermessung der Topologie beliebig geformter Oberflächen, z.B. von reflektierenden oder streuenden Oberflächen optischer Linsen und Spiegel oder anderer optischer und nicht-optischer Elemente.
- 15 Die Passeprüfung von optischen Oberflächen erfolgt häufig interferometrisch, wobei bislang zur Anpassung des Strahlengangs an die Oberflächenform aufwändige und kostenintensive Anpasstechniken in Form sogenannter Kompensationsoptiken eingesetzt werden, die im Fall von asphärischen Elementen für jede einzelne Oberfläche speziell
- 20 ausgelegt werden müssen. Zudem besteht die Problematik der Asphären-Absolutkalibrierung, die aus dem Design und den Fertigungstoleranzen der Kompensationsoptik abgeleitet wird oder separat an einer absolut kalibrierbaren Vorrichtung erfolgt, wie z.B. an einer abrasternd sequenziell messenden sogenannten Koordinatenmessmaschine.
- 25 Bei sequentiellen Messverfahren braucht zwar nur ein Messkanal kalibriert werden, die Messung dauert jedoch um so länger, je mehr Messwerte erfasst werden müssen. Beim Verschieben des Messkanals kann zudem eine ungenaue Positionierung desselben den Messwert verfälschen.
- 30

Prüflings-Messvorrichtungen bedürfen z.B. meist dann der Kalibrierung, wenn ein neuer Prüfling zu vermessen ist oder eine Messung mit veränderten Parametern oder mit höherer Präzision durchzuführen ist. In diesen Fällen steht häufig kein in der erforderlichen Genauigkeit vermessener Prüfling zur Verfügung, der als Referenz oder Kalibriernormal dienen kann, um durch eine Referenzmessung die gesuchten Kalibrierwerte zu ermitteln. Selbst wenn ein als Referenz dienender Prüfling zur Verfügung steht, erfordert die externe Kalibrierung das Einbringen desselben in die Messvorrichtung.

10

In der Patentschrift US 4,583,298 wird ein Selbstkalibrierverfahren zur Wahl von Parameterwerten einer Kalibrierungsabbildung zwecks Korrektur von Messfehlern beschrieben. Die Koordinaten von Punkten in einem Gitter auf einer unkalibrierten Kalibrierungsplatte werden für unterschiedliche Ausrichtungen der Platte gemessen, die durch Translation und/oder Drehung derselben eingestellt werden. Die Parameter der Kalibrierungsabbildung und die sich auf die Ausrichtungen der Kalibrierungsplatte beziehenden Parameter werden so bestimmt, dass die Abweichung von der Übereinstimmung des mit der Kalibrierungsabbildung erzeugten Bildes des Gitters bei jeder Orientierung minimiert wird. Für die Kalibrierungsabbildung wird ein Polynomansatz gemacht, dessen Koeffizienten durch Lösung eines hochdimensionalen Gleichungssystems aus den Messdaten bestimmt werden. Das Verfahren kann u.a. zur Selbstkalibrierung von Positionsmessungen einer Waferstage in einer Elektronenstrahl-Lithographieanlage verwendet werden.

25

In der Patentschrift US 4.672.201 wird eine Vorrichtung zur Detektion alternierender heller und dunkler Felder, z.B. eines Moiré-Überlagerungsmusters, beschrieben, die eine Vielzahl von paarweise angeordneten Lichtquellen und Lichtdetektoren sowie Mittel zur Steuerung der Lichtrichtung umfasst, die bei einem Kalibriervorgang eine Veränderung

30

der relativen Phase des detektierten Messlichtes unabhängig von dessen Intensität ermöglichen.

5 In der Offenlegungsschrift US 2003/0202174 A1 werden ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Verzeichnungsmessung bzw. Selbstkalibrierung eines Projektionsobjektivs beschrieben, wie es insbesondere in Lithographie-Projektionsbelichtungsanlagen z.B. vom Stepper- und Scanner-Typ eingesetzt wird. Dazu ist ein Messretikel mit wenigstens zwei komplementären, voneinander beabstandet angeordneten Messstrukturen vorgesehen, das wenigstens zwei Mal in unterschiedlichen  
10 Positionen auf ein Substrat, insbesondere einen mit Photoresist beschichteten Wafer, derart belichtet wird, dass sich auf dem Substrat die komplementären Messstrukturbilder überlagern. Der sich aus dem Abbildungsfehler des Projektionsobjektivs ergebende Positionsversatz  
15 der Messstrukturbilder auf dem Substrat wird dann gemessen, um daraus die Verzeichnung des Objektivs zu ermitteln.

Der Erfindung liegt als technisches Problem die Bereitstellung eines Kalibrierungsverfahrens der eingangs genannten Art, mit dem der  
20 Einfluss der Sender-/Empfängeranordnung auf das Messergebnis für den jeweiligen Messkanal ermittelt und das Messergebnis entsprechend kalibriert werden kann, ohne dass hierzu gegenüber einer externen Referenz kalibriert werden muss, eines dieses Kalibrierungsverfahrens nutzenden Messverfahrens sowie einer optischen Messvorrichtung zur  
25 Passeprüfung und eines Verfahrens zum Betrieb der optischen Messvorrichtung zugrunde.

Die Erfindung löst dieses Problem durch die Bereitstellung eines Kalibrierverfahrens mit den Merkmalen des Anspruchs 1 oder 27, eines  
30 Messverfahrens mit den Merkmalen des Anspruchs 21, einer optischen Messvorrichtung mit den Merkmalen des Anspruchs 22, eines Verfahrens zum Betrieb der optischen Messvorrichtung mit den Merkmalen

des Anspruchs 25 oder 26 sowie eines Verfahrens zur pupillenaufgelösten Bestimmung der Transmission eines optischen Abbildungssystems mit den Merkmalen des Anspruchs 30.

- 5 Gemäß einem Aspekt der Erfindung ist ein Kalibrierverfahren vorgesehen, bei dem zunächst eine erste Zuordnung von Empfänger-  
elementen, Senderelementen und Prüflingsfeldelementen vorgenommen wird. Im Anschluss wird ein erster Messvorgang zur Gewinnung eines ersten Satzes von Messwerten in den einzelnen  
10 Messkanälen durchgeführt. Danach wird eine neue Zuordnung von Empfänger-  
elementen, Senderelementen und Prüflingsfeldelementen eingestellt, indem die Senderanordnung und/oder die Empfänger-  
anordnung relativ zum Prüfling verlagert wird. Diese relative Verlagerung  
15 kann durch aktives verlagerndes Bewegen des Senderfeldes und/oder  
des Empfängerfeldes und/oder des Prüflings bewirkt werden. Mit der  
neuen Zuordnung wird ein erneuter Messvorgang zur Gewinnung eines  
weiteren Satzes von Messwerten in den einzelnen Messkanälen  
durchgeführt. Die Neuzuordnung von Messkanälen sowie ein sich daran  
20 anschließender Messvorgang werden so lange fortgesetzt, bis eine  
vorgebbare Anzahl von Messwertsätzen vorliegt. Aus diesen  
Messwertsätzen werden Kalibrierdaten der Senderelement-Empfänger-  
element-Anordnung rechnerisch bestimmt, indem ein vorgegbares  
Gleichungssystem gelöst wird, welches die funktionale Abhängigkeit der  
gewonnenen Messwerte von diesen Kalibrierdaten und von prüflings-  
25 feldelementbedingten Messwertanteilen beschreibt.

- Je nach Bedarf können die Kalibrierdaten so bestimmt werden, dass mit  
ihnen nur der gemeinsame Einfluss von Sender- und Empfänger-  
anordnung kalibriert wird oder separat die Einflüsse von Senderanord-  
30 nung und Empfängeranordnung kalibriert werden oder nur der Einfluss  
der Sensoranordnung oder nur der Einfluss der Empfängeranordnung  
kalibriert wird.

Es ist für das Kalibrierverfahren unerheblich, ob die Messkanäle in einer, zwei oder, wie in tomografischen Messverfahren, drei Dimensionen angeordnet werden. Wesentlich für das Verfahren ist es, dass der  
5 Zusammenhang zwischen Senderfeld, Empfängerfeld und dem Prüfling bei der Neuordnung von Empfängerelementen, Senderelementen und Prüflingsfeldelementen nicht inkohärent zerstört wird. Dadurch wird sichergestellt, dass der Kalibrieranteil, d.h. der sender- und/oder empfängerbedingte Messwertanteil, im wesentlichen unabhängig von  
10 der gewählten Zuordnung zum Messwert beiträgt. Die Neuordnung kann z.B. durch Verschieben, Verkippen, Verdrehen, Permutieren oder durch bestimmte Abbildungen zwischen Senderanordnung, Empfängeranordnung und Prüfling hergestellt werden, wobei für die aufeinanderfolgenden Neuordnungen verschiedene dieser Verlagerungsarten ver-  
15 wendet werden können.

Das Kalibrierverfahren eignet sich für optische Messvorrichtungen ebenso wie für nicht-optische Messvorrichtungen, wie solche vom elektrischen, magnetischen, thermischen, akustischen, mechanischen  
20 und taktilen Typ, vom Kraftmesstyp, Zeit-/Frequenzmesstyp und Kombinationen hiervon.

In einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung werden Fehler in der Neuordnung von Sender-/Empfängeranordnung und Prüfling durch  
25 zugeordnete Zusatzkorrekturterme algorithmisch berücksichtigt, welche die vorhandenen Freiheitsgrade beschreiben.

In Ausgestaltung der Erfindung wird wenigstens ein Teil der Messkanäle zeitlich seriell ausgelesen, wobei sich vorgebbare Messkanal-Subraster  
30 einzeln kalibrieren lassen. Diese Subraster können bei Bedarf über Schnittmengen verknüpft werden.



In Fällen, in denen die Ermittlung eines jeweiligen Messwertsatzes mehrere Teilmessungen umfasst, ist es von Vorteil, wenn auch bereits die Teilmessungen mit verschiedenen Zuordnungen durchgeführt werden. Dies erhöht zwar den Aufwand für die Verarbeitung der gewonnenen Messdaten, erlaubt aber häufig eine einfachere Eliminierung von Drifteffekten, was der Genauigkeit der Kalibrierung nützt. Bei Bedarf können die Teilmessungen zu Teilkalibrierungen ausgewertet werden. Dies ist z.B. für sogenannte verschränkte Messungen nützlich, bei denen Messungen mit verschiedenen Messkanalsubrasten jeweils alternierend nur für einen Teil aller berücksichtigten Feldpunkte durchgeführt werden.

In einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung wird wenigstens ein Sender- oder Empfängererelement in verschiedenen Messkanälen oder Messkanal-Subrasten verwendet, alternativ zu einer 1:1-Zuordnung.

Von Vorteil ist auch die Maßnahme, nach wenigstens einem Teil der Verlagerungen, mit denen jeweils eine neue Zuordnung eingestellt wird, eine oder mehrere Referenzstellungen anzufahren, womit globale Veränderungen im Prüfling und/oder im Messsystem detektiert und bei der rechnerischen Kalibrierdatenbestimmung berücksichtigt werden können.

Bei Ausfall eines Messkanals, was besonders in hochparzellierten Messsystemen mit gewisser Wahrscheinlichkeit auftreten kann, ist es von Vorteil, die betroffenen Gleichungen aus dem Gleichungssystem zu entfernen, um trotzdem die übrigen Messkanäle kalibrieren zu können. In den meisten Fällen ist das Gleichungssystem trotzdem noch ausreichend konditioniert.

In vielen Fällen ändert ein Messkanal seinen Messwert dann, wenn er bei der Verlagerung des Systems von Senderanordnung, Empfängeranordnung und Prüfling von einem Mittenbereich zu einem Randbereich

oder umgekehrt verlagert wird, oder allgemein dann, wenn sich der Einfluss von seiner Umgebung merklich ändert. Auch in diesem Fall ist es von Vorteil, die betroffenen Gleichungen aus dem Gleichungssystem zu entfernen.

5

In bestimmten Fällen kann es von Vorteil sein, bei Verlagerung eines Messkanals zwecks Neuordnung für eine synchrone Verlagerung der ihn beeinflussenden Umgebung zu sorgen, so dass der Umgebungseinfluss auf den Messkanal konstant gehalten werden kann, auch wenn  
10 er sich ansonsten durch die Verlagerung signifikant ändern würde. Beispielsweise kann durch eine entsprechende Verstellung einer Blende im Beleuchtungsstrahlengang dafür gesorgt werden, dass ein Messkanal, der vor einer Verlagerung in einen Randbereich lag, nach Verlagerung in einen Mittenbereich durch geeignetes Nachführen der  
15 Blende seinen Randkanal-Umgebungseinfluss beibehält.

In Weiterbildung der Erfindung wird eine neue Zuordnung von Empfänger-elementen, Senderelementen und Prüflingsfeldelementen mittels einer Verschiebung und/oder Verdrehung des Senderfeldes, des Empfängerfeldes und/oder des Prüflings relativ zueinander eingestellt. Dies  
20 gewährleistet, dass der Zusammenhang zwischen Senderfeld, Empfängerfeld und Prüfling nicht inkohärent zerstört wird.

In Ausgestaltung der Erfindung werden Kopplungen zwischen Messkanälen, insbesondere benachbarten „Messkanälen“, im vorgebbaren Gleichungssystem berücksichtigt, wodurch sich die Genauigkeit des Verfahrens steigern lässt.  
25

In einer vorteilhaften Weiterbildung der Erfindung wird zum rechnerischen Bestimmen der Kalibrierdaten eine additive, lineare Abhängigkeit der Messwerte von den Kalibrierdaten der Senderelemente und der Empfänger-elemente sowie von den prüflingsfeldelementbedingungen  
30

Messwertanteilen und von Feldverlaufskorrekturtermen oder von aus diesen ableitbaren Größen angenommen, so dass die Kalibrierdaten durch Auflösen eines linearen Gleichungssystems gewonnen werden können. Bei Kombination dieser Maßnahme mit der Verwendung der

5 Zusatzkorrekturterme entsprechen letztere jeweils dem Produkt aus Signalstärke und Feldverlaufskorrekturterm. Ein additiver Zusammenhang zwischen den relevanten Größen ist rechentechnisch vorteilhaft und stellt im Sinne einer Störungsentwicklung meist eine gute Näherung auch für nichtlineare Fälle dar. Durch geschickte Wahl der Zuordnung

10 kann erreicht werden, dass das lineare Gleichungssystem schwach besetzt ist, d.h. dass sehr viele Matrixelemente null werden. Dies führt zur Einsparung von Rechenzeit sowie von Speicherplatzbedarf bei einer numerischen Lösung des Gleichungssystems. Die Feldverlaufskorrekturterme berücksichtigen Ungenauigkeiten bei der Neuzuordnung der

15 Messkanäle. Solche Ungenauigkeiten können beim Verkippen, Verschieben oder Verdrehen der Senderanordnung relativ zum Prüfling oder zur Empfängeranordnung auftreten. Die Abhängigkeit der Feldverlaufskorrekturen von der Zuordnung der Messkanäle ist normalerweise bis auf einige Bestimmungsparameter, z.B. deren Amplituden, im

20 Voraus bekannt. Häufig hängt die Form der Feldverlaufskorrekturen nicht von der jeweiligen Zuordnung der Messkanäle zum Prüfling ab.

In einer vorteilhaften Anwendung wird das Verfahren zur Kalibrierung einer Wellenfrontvermessungsvorrichtung für ein Projektionsobjektiv

25 eingesetzt, wozu eine erste periodische Struktur als Senderanordnung objektseitig und eine zweite periodische Struktur als Empfängeranordnung bildseitig vom Projektionsobjektiv positioniert werden. In einem Fall wird die Wellenfrontmessung zu einem Feldpunkt kalibriert, typischerweise wird die Wellenfront dazu in Zernike-Funktionen zerlegt. In einem

30 zweiten Fall wird ein Array von Wellenfronten, d.h. der Feldverlauf, kalibriert. Insbesondere kann mit dem Verfahren eine Verzeichnungs- oder Bildschalenmessung kalibriert werden. Durch die Verwendung des

erfindungsgemäßen Kalibrierverfahrens kann z.B. die Qualität einer Verzeichnungsmessung mit einer entsprechenden Wellenfrontvermessungsvorrichtung erheblich verbessert werden.

- 5 In weiterer Ausgestaltung dieser Anwendung der Erfindung wird die Neuordnung von Empfänger-elementen, Sender-elementen und Prüf-  
lingsfeldelementen durch Translation der beiden periodischen Strukturen  
relativ zum Projektionsobjektiv um eine oder mehrere Rastereinheiten in  
einer Periodizitätsrichtung derselben und/oder durch Drehung des  
10 Projektionsobjektivs um einen vorgebbaren Symmetriewinkel vorgenom-  
men. Dies ermöglicht die Ermittlung der Kalibrierdaten mit vergleichs-  
weise geringem Aufwand. In einer vorteilhaften Weiterbildung ist speziell  
eine konjugierte Translation der beiden periodischen Strukturen relativ  
zum Projektionsobjektiv vorgesehen.

15

- In einer vorteilhaften Weiterbildung der Erfindung beinhaltet eine  
Kalibriersequenz Messungen bei jeweils entlang zweier nicht-paralleler  
Achsen verschobenen Stellungen oder in Stellungen, die sich durch  
Verschieben längs nur einer Translationsrichtung in Kombination mit  
20 einer Drehung ergeben. Es lässt sich zeigen, dass die letztgenannte  
Methode mit nur einer Verfahrachse in Kombination mit einer Drehung  
der erstgenannten Methode mit zwei nicht-parallelen, z.B. orthogonalen,  
Verfahrachsen vollständig äquivalent ist. Je nach den systemseitig  
bereits vorhandenen Bewegungsfreiheitsgraden kann daher die eine  
25 oder andere Methode verwendet werden. So eignet sich z.B. die  
Methode mit der nur einen Verfahrachse in Kombination mit der  
Drehung besonders gut für die Kalibrierung von Projektionsbelich-  
tungsanlagen vom Scanner-Typ, da dort diese Bewegungsfreiheitsgrade  
bereits vorhanden sind, hingegen meist keine zwei nicht-parallelen,  
30 lateralen Translationsfreiheitsgrade.

In Ausgestaltung des Verfahrens mit der Kalibriersequenz aus einer linearen Verfahrbewegung in Kombination mit einer Drehbewegung ist vorgesehen, die sich aus dieser Kalibrierung ergebenden Messdaten in äquivalente Messdaten zu transformieren, die einer Messsequenz unter Verwendung zweier nicht-paralleler Verfahrachsen entsprechen, wozu die zugehörigen Transformationsbeziehungen zwischen diesen beiden Methoden benutzt werden.

Beim erfindungsgemäßen Verfahren zur Messung an einem Prüfling wird eine Kalibrierung der Messwerte nach dem erfindungsgemäßen Kalibrierverfahren durchgeführt, wodurch die prüflingsfeldelementbedingten Messwertanteile aus den kalibrierten Messwerten bestimmt werden können, ohne dass hierzu gegen eine externe Referenz kalibriert werden muss.

Die erfindungsgemäße optische Messvorrichtung zur Passeprüfung umfasst eine Sensoranordnung mit einer Rasteranordnung von relativ zur Oberfläche beweglichen optischen Sensorelementen zum Senden und Empfangen von Messstrahlung. Vorzugsweise ist wenigstens eine Beweglichkeit der Sensorelemente in einer lateralen und/oder rotatorischen Richtung zur Oberfläche vorgesehen. Dies ermöglicht eine hochgenaue, berührungsfreie Passeprüfung von Oberflächen beliebiger Form mit relativ geringem Aufwand. Hierbei kann es sich z.B. um reflektierende oder streuende Oberflächen handeln.

In einer vorteilhaften Weiterbildung der Messvorrichtung ist das jeweilige optische Sensorelement als in seinem Abstand zur untersuchten Oberfläche veränderliches Fokussensorelement mit einem zugeordneten Lichtleiter ausgebildet. Durch die Verwendung von Fokussensorelementen kann die Abhängigkeit der Messsignale vom Winkel, unter dem die Messstrahlung auf die zu vermessende Oberfläche auftrifft, klein gehalten werden. Geeignete Fokussensoren sind Massenprodukte, die

sich kompakt bauen lassen und kostengünstig auch in großer Zahl in der Sensoranordnung eingesetzt werden können. Sie werden in ihrem Abstand zur untersuchten Oberfläche so lange bewegt, bis ein benutztes Lichtsignal, z.B. Kontrast oder Lichtfleckgröße, einen optimalen Wert annimmt. Der Abstands-Offset wird dann erfindungsgemäß kalibriert.

In einer Weiterbildung der optischen Messvorrichtung zur Passeprüfung an einer rotationssymmetrischen Oberfläche ist die Rasteranordnung von optischen Sensorelementen als lineare Rasterzeile ausgebildet. Bei einer solchen Anordnung ist der zur Herstellung der Sensoranordnung nötige Aufwand stark reduziert, da nur eine eindimensionale Anordnung von Sensorelementen benötigt wird. Mit dieser wird je ein Streifenbereich der Oberfläche gleichzeitig, d.h. parallel, vermessen. Durch Verdrehen der Oberfläche relativ zur linearen Rasterzeile werden sequenziell verschiedene Streifenbereiche erfasst, um die gesamte Oberfläche zu vermessen.

Bei einem erfindungsgemäßen Verfahren zum Betrieb der optischen Messvorrichtung zur Passeprüfung wird die Rasteranordnung für verschiedene Messvorgänge relativ zur Oberfläche zwecks Erhöhung der Dichte der Messpunkte inkommensurabel und/oder zwecks Erweiterung des Erfassungsbereichs kommensurabel verschoben.

Bei einem weiteren erfindungsgemäßen Betriebsverfahren wird die optische Messvorrichtung zur Passeprüfung durch das erfindungsgemäße Kalibrierverfahren kalibriert, wobei die Sensorelemente als Senderelemente und Empfängerelemente sowie Teilbereiche der Oberfläche als Prüflingsfeldelemente fungieren und die Sensorelement-Rasteranordnung zur Einstellung der verschiedenen Zuordnungen von Empfängerelementen, Senderelementen und Prüflingselementen verschoben wird. Durch den Einsatz des erfindungsgemäßen Kalibrierverfahrens

kann die optische Passeprüfvorrichtung ohne Verwendung einer externen Referenz kalibriert werden.

Gemäß einem weiteren Aspekt umfasst die Erfindung ein Verfahren zur  
5 pupillenaufgelösten Bestimmung des Transmissionsvermögens, kurz als  
Transmission bezeichnet, eines optischen Abbildungssystems, wie eines  
Mikrolithographie-Projektionsobjektivs, sowie ein geeignetes Kalibrier-  
verfahren, mit dem relevante Komponenten einer hierzu benutzten  
Messoptik zur Erzielung einer gewünschten, hohen Messgenauigkeit  
10 ausreichend und mit relativ geringem Aufwand kalibriert werden können.  
Das Verfahren lässt sich insbesondere auch in-situ in Mikrolithographie-  
Projektionsbelichtungsanlagen einsetzen, wobei z.B. in einer  
Halbleiterfabrik auch eine Maschine, d.h. Belichtungsanlage, für  
mehrere sequentielle Belichtungsvorgänge eines Wafers bzw. mehrere  
15 Maschinen, die im Produktionsprozess hintereinander eingesetzt  
werden, für mehrere Belichtungen kalibrierbar und damit einstellbar sind  
und so eine Absolutkalibrierung mit übereinstimmenden, zueinander  
passenden Kalibriereinstellungen für die verschiedenen  
Belichtungsvorgänge möglich ist. Vorteilhafte Ausgestaltungen dieses  
20 Erfindungsaspektes betreffen spezielle Kalibrierungsmaßnahmen für  
eine in der zugehörigen optischen Messvorrichtung benutzte  
Punktklichtquelleneinheit und eine in der Messvorrichtung enthaltende  
Detektoreinheit.

25 Vorteilhafte Ausführungsbeispiele der Erfindung sind in den Zeich-  
nungen dargestellt und werden nachfolgend beschrieben. Es zeigen:

Fig. 1 ein Flussdiagramm eines Verfahrens zur Kalibrierung einer  
Messvorrichtung,

30

Fig. 2 eine schematisierte Seitenansicht von Teilen einer mit dem  
Verfahren von Fig. 1 kalibrierbaren optischen Vorrichtung mit

einer Senderanordnung und einer Empfängeranordnung zur Messung an einem Prüfling,

- 5 Fig. 3 eine Ansicht entsprechend Fig. 2 mit einer konjugierten Verschiebung von Senderanordnung und Empfängeranordnung um jeweils eine Rastereinheit,
- 10 Fig. 4 eine schematische Seitenansicht einer mit dem Verfahren von Fig. 1 kalibrierbaren optischen Vorrichtung zur Passeprüfung von Oberflächen mit einer zweidimensionalen Rasteranordnung von Sensorelementen,
- 15 Fig. 5 eine Darstellung des Messprinzips anhand der als Fokussensoren ausgebildeten Sensorelemente der Vorrichtung von Fig. 4,
- Fig. 6 eine Darstellung einer inkommensurablen Verschiebung der Sensorelement-Rasteranordnung von Fig. 4 zur Erhöhung der Zahl der Messpunkte,
- 20 Fig. 7 eine Darstellung einer kommensurablen Verschiebung der Sensorelement-Rasteranordnung von Fig. 4 zur Erweiterung des Erfassungsbereichs oder zur Kalibrierung,
- 25 Fig. 8 eine schematische Seitenansicht einer Variante der Vorrichtung von Fig. 4 mit einer Sensorelement-Rasteranordnung zur Passeprüfung speziell von rotationssymmetrischen Oberflächen,
- 30 Fig. 9 eine schematische Draufsicht auf eine lineare Sensorelement-Rasterzeile zur Verwendung in der Sensoranordnung von Fig. 8,



Fig. 10 eine schematische, perspektivische Seitenansicht einer erfindungsgemäß kalibrierbaren Vermessungsvorrichtung für ein Projektionsobjektiv,

5 Fig. 11 schematische Diagramme zur Veranschaulichung eines Kalibrierverfahrens für die Messvorrichtung von Fig. 10,

Fig. 12 Diagramme der Resultate einer Kalibrierung der Messvorrichtung von Fig. 10 gemäß dem Verfahren von Fig. 11 unter Verwendung nur einer Verschieberichtung in Kombination mit einer  
10 Drehung,

Fig. 13 Diagramme entsprechend Fig. 12, jedoch für eine Kalibrierung unter Verwendung zweier orthogonaler Verschieberichtungen,  
15

Fig. 14 eine schematische Seitenansicht wesentlicher Teile einer optischen Messvorrichtung zur pupillenaufgelösten Bestimmung der Transmission eines optischen Abbildungssystems, die eine Detektoreinheit mit Abbildungsoptik beinhaltet,  
20

Fig. 15 eine Seitenansicht entsprechend Fig. 14 für eine Variante mit einer Detektoreinheit ohne Abbildungsoptik und

Fig. 16 eine Seitenansicht der Messvorrichtung von Fig. 15 während eines Kalibriervorgangs für eine Punktlichtquelleneinheit derselben.  
25

Fig. 1 zeigt im Flussdiagramm den Ablauf des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Selbstkalibrierung einer Messvorrichtung, z.B. einer optischen Messvorrichtung, wie sie in Teilen schematisch in den Fig. 2 und  
30 3 dargestellt ist.

Die in Fig. 2 gezeigte Messvorrichtung 6 ist von einem optischen Typ und dient der Vermessung eines Prüflings 2 mit Hilfe von Messstrahlung, die von Senderelementen 5a bis 5e einer Senderanordnung 3 ausgesandt wird, einen jeweiligen Teilbereich 7a bis 7e, d.h. ein jeweiliges Feldelement, des Prüflings 2 durchläuft und dann von Empfänger-  
5 elementen 4a bis 4e einer Empfängeranordnung 1 detektiert wird. Je ein Senderelement 5a bis 5e bildet mit einem Empfängerelement 4a bis 4e und einem zwischenliegenden Prüflingsfeldelement 7a bis 7e einen Messkanal 5a,7a,4a; 5b,7b,4b etc. Der Prüfling 2 wird im gezeigten  
10 Beispiel entlang gestrichelter Linien in die Prüflingsfeldelemente 7a bis 7e unterteilt, von denen jedes im wesentlichen nur von derjenigen Messstrahlung durchlaufen wird, die vom zugehörigen Senderelement 5a bis 5e ausgesandt wird. Ebenso wird von jedem Empfängerelement 4a bis 4e nur die vom jeweiligen Prüflingsfeldelement 7a bis 7e her  
15 kommende Messstrahlung detektiert, so dass die Messkanäle im wesentlichen unabhängig voneinander sind. Alternativ kann auch ein Übersprechen zwischen den Messkanälen zugelassen werden, was dann bei der Auswertung geeignet berücksichtigt wird.

20 Zu Beginn des Verfahrens wird eine erste Zuordnung von Empfängerelementen, Senderelementen und Prüflingsfeldelementen vorgenommen, wie sie z.B. in Figur 2 dargestellt ist, und ein erster Messvorgang zur Gewinnung eines ersten Satzes von Messwerten in den einzelnen Messkanälen durchgeführt (Schritt 10). Anschließend wird eine neue  
25 Zuordnung von Empfängerelementen, Senderelementen und Prüflingsfeldelementen durch Verlagern der Senderanordnung und/oder der Empfängeranordnung relativ zum Prüfling eingestellt, z.B. durch aktives Bewegen der Sender- und/oder der Empfängeranordnung oder des Prüflings alleine. Dann wird ein erneuter Messvorgang zur Gewinnung  
30 eines weiteren Satzes von Messwerten in den einzelnen Messkanälen durchgeführt (Schritt 11).

Figur 3 zeigt die optische Messvorrichtung von Figur 2 mit einer entsprechenden Verlagerung von Senderanordnung 3 und Empfängeranordnung 1, hier speziell durch entgegengesetztes Verschieben der Senderanordnung 3 und der Empfängeranordnung 1 um je eine Raster-  
5 einheit nach links bzw. rechts relativ zum Prüfling 2. Die Verschiebung der beiden Anordnungen relativ zum Prüfling ergibt eine Neuordnung der Messkanäle, wobei einige am Rand liegende Elemente keinem Messkanal mehr zugeordnet werden können, was bei einer entsprechend großen Anzahl von Elementen jedoch unerheblich ist. In analoger  
10 Weise kann es sein, dass zuvor außerhalb gelegene, inaktive Elemente nun im Messgebiet liegen und aktiv werden. In Fig. 3 sind drei neu gebildete Messkanäle 4c,7d,5e; 4b,7c,5d; und 4a,7b,5c gezeigt.

Nach Abschluss des erneuten Messvorgangs wird geprüft (Schritt 12),  
15 ob die gewünschte Anzahl von Messwertsätzen ermittelt wurde. Je nach Bedarf kann hier eine Redundanz vorgesehen sein, mit der sich die Kalibrierengenauigkeit erhöhen lässt. Wenn die gewünschte Anzahl an Messwertsätzen ermittelt wurde, wird das Verfahren mit Schritt 13 fortgeführt, andernfalls wird zum Schritt 11 zurückgekehrt, um einen nächs-  
20 ten Messwertsatz mit permutierter Zuordnung von Senderelementen, Empfängererelementen und Prüflingsfeldelementen zu ermitteln. Aus den in der gewünschten Anzahl gewonnenen Messwertsätzen werden dann rechnerisch Kalibrierdaten der Senderelemente und/oder der Empfängererelemente aus einem vorgebbaren Gleichungssystem bestimmt,  
25 welches die funktionale Abhängigkeit der gewonnenen Messwerte von diesen Kalibrierdaten und von prüflingsfeldelementbedingten Messwertanteilen beschreibt (Schritt 13), worauf im folgenden näher eingegangen wird.

30 Bei einer parallelen Messung mit einer Anzahl K von Messkanälen, mit K als einer vorgebbaren natürlichen Zahl größer eins, zur Bestimmung eines Messwertsatzes nach Schritt 10 oder 11 sendet jedes Sender-

element  $S_k$  Messsignale aus, die von den Prüflingsfeldelementen  $P_k$  nach einem bestimmten funktionalen Zusammenhang  $F_k$  modifiziert werden. Das modifizierte Messsignal wird von den Empfänger-elementen  $R_k$  empfangen und in entsprechende Messwerte  $M_k$  umgesetzt, für die  
5 folglich gilt:

$$M_k = F_k(P_1, S_1, R_1, \dots, P_K, S_K, R_K); k = 1, \dots, K$$

Wenn sich die prüflingsbedingten Messwertanteile  $P_k$ , die senderbe-  
10 dingten Messwertanteile  $S_k$  sowie die empfängerbedingten Messwert-  
anteile  $R_k$  linear überlagern und darüber hinaus die einzelnen Mess-  
kanäle nicht aneinander koppeln, was in diesem Ausführungsbeispiel  
eine brauchbare Annahme darstellt, vereinfacht sich diese Abhängigkeit  
wesentlich zu:

15

$$M_k = P_k + (S_k + R_k).$$

Ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen Messwerten und Messwert-  
anteilen kann häufig näherungsweise auf eine lineare Abhängigkeit  
20 zurückgeführt werden, z.B. mittels einer Störungsentwicklung. Bei  
Vorhandensein einer Kopplung zwischen den Messkanälen sei diese im  
betrachteten Ausführungsbeispiel vernachlässigbar gering. Ansonsten  
führen solche Übersprecheffekte zu von null verschiedenen, außer-  
diagonalen Beiträgen in der zu lösenden Gleichungssystemmatrix. Bei  
25 Bedarf lässt sich ein multiplikativer Zusammenhang zwischen zwei oder  
mehr Messwertanteilen, z.B. in der Form  $M_k = P_k \cdot S_k \cdot R_k$ , durch Loga-  
rithmieren in einen additiven Zusammenhang überführen. Die sender-  
bedingten und empfängerbedingten Messwertanteile  $S_k, R_k$  stellen die  
gesuchten Kalibrierdaten dar.

30

In einigen Anwendungsfällen kann es vorteilhaft sein, bestimmte Mess-  
wertanteile, die nicht getrennt kalibriert werden müssen, zu Unter-

gruppen zusammenzufassen. Beispielsweise kann es ausreichen, nur die Summe ( $S_k + R_k$ ) der Kalibrierdaten zu bestimmen, um von den Messwerten  $M_k$  über diese Summe direkt auf den Prüfling  $P_k$  zu schließen.

5

Um eine übersichtliche Darstellung zu gewährleisten, wird im folgenden davon ausgegangen, dass sich der Messwert additiv aus einem senderbedingten, empfängerbedingten und prüflingsbedingten Messwertanteil sowie einem Feldverlaufskorrekturterm  $C$  zusammensetzt. Der

10 Korrekturterm berücksichtigt die Ungenauigkeiten, die bei der Einstellung der Neuordnung der Messkanäle, z.B. mittels einer Verschiebung und/oder Drehung, auftreten können. Diese Korrekturen können vom jeweiligen Feldpunkt abhängen, häufig sind sie jedoch von diesem unabhängig. Wesentlich ist, dass die Neuordnung den Zusammen-

15 hang zwischen Sender  $S$ , Empfänger  $R$  und dem Prüfling  $P$  nicht inkohärent zerstört, so dass die einzelnen Kalibrieranteile im wesentlichen unabhängig von der jeweiligen Zuordnung der Messkanäle zum Messwert  $M$  beitragen.

20 Bei der Bestimmung des ersten Messwertsatzes in Schritt 10 wird von der linearen Beziehung  $M = P + S + R$  ausgegangen (der Elementindex  $k$  wird der Übersichtlichkeit halber weggelassen). Der Feldverlaufskorrekturterm  $C$  tritt in obiger Beziehung noch nicht auf, da keine Neuordnung der Messkanäle stattfindet, bei der Ungenauigkeiten auftreten

25 können.

Für jede Permutation, d.h. Neuordnung  $t$  der Messkanäle gemäß Schritt 11 von Fig. 1 wird eine neue Beziehung angesetzt:

30 
$$M^{(t)} = T^{(t)}_P P + T^{(t)}_S S + T^{(t)}_R R + \sum_c \omega^{(t)}_c C^{(t)}_c.$$

Wie daraus ersichtlich, setzen sich die Messwerte jeder Permutation  $t$  aus einem Anteil zusammen, der aus der in Schritt 10 getroffenen ersten Zuordnung durch Anwendung von Permutationsoperatoren  $T^{(t)}_P$ ,  $T^{(t)}_S$  und  $T^{(t)}_R$  hervorgeht. Zusätzlich tritt ein Anteil  $\sum_c \omega^{(t)}_c C^{(t)}_c$  auf, der eine Summe  
5 über alle Feldverlaufskorrekturen  $C^{(t)}_c$ , jeweils gewichtet mit einer Amplitude  $\omega^{(t)}_c$ , darstellt. Die Summe mit Index  $c$  läuft über die bei der Neuordnung auftretenden Positionierungsfehler, deren Feldabhängigkeit im Voraus festliegt. Es versteht sich, dass der Neuordnungs-Operator in alternativen Ausführungsbeispielen auch zur Berücksichti-  
10 gung von Kopplungs-, Verstärkungs- und/oder Dämpfungseffekten erweitert sein kann.

Bekannte Größen sind in obiger Gleichung die Messwerte  $M^{(t)}$ , die Permutationsoperatoren  $T^{(t)}_P$ ,  $T^{(t)}_S$  und  $T^{(t)}_R$  sowie die Feldabhängigkeit  
15 der Feldverlaufskorrekturen  $C^{(t)}_c$ . Zu bestimmende Größen sind die Kalibrierwerte  $S$  und  $R$  sowie die Amplituden  $\omega^{(t)}_c$ . Sind diese bekannt, lassen sich die prüflingsbedingten Messwertanteile  $P$  bestimmen.

Durch geschickte Wahl der Permutationsoperatoren kann erreicht  
20 werden, dass das aus den verschiedenen Permutationen  $t$  resultierende Gleichungssystem schwach besetzt ist, so dass ein Großteil der Matrixelemente null wird, was Rechenzeit und Speicherplatz spart. Die Zahl der Permutationen bzw. Messwertsätze  $t$  wird so gewählt, dass für das Gleichungssystem eine Lösung gefunden werden kann. Das Gleichungs-  
25 system erweist sich häufig als überbestimmt, d.h. es liegt Redundanz vor. In diesen Fällen wird eine approximative Lösung ermittelt, welche eine üblicherweise durch eine Fehlerquadratsumme ausgedrückte Abweichung von der exakten Lösung minimiert. Sollte das Gleichungssystem hinsichtlich der Feldverlaufskorrekturamplituden  $\omega^{(t)}_c$  nicht güns-  
30 tig konditioniert sein, bedeutet dies, dass bei der für die Neuordnung durchgeführte Verschiebung und/oder Verdrehung ein systematischer

Fehler auftritt, dessen Ursache am besten mit einer geeigneten Messapparatur ermittelt wird und anschließend eliminiert werden kann.

In manchen Fällen bleibt das Gleichungssystem auch bei Berücksichtigung aller möglichen Permutationen unterbestimmt. Jedoch sind die bei der Lösung nicht bestimmbaren Konstanten für die Bestimmung der Kalibrierdaten in vielen Fällen, z.B. bei Verzeichnung- oder Bildschale, irrelevant, einzig die Nullteiler der Korrekturwerte können nicht mit dem Selbstkalibrierverfahren bestimmt werden und müssen gegebenenfalls durch externes Kalibrieren ermittelt werden. Dies erfordert aber einen erheblich geringeren Aufwand als eine Bestimmung aller Kalibrierwerte mit Hilfe einer externen Referenz, zumal an die Nullteiler oft nicht so hohe Genauigkeitsanforderungen gestellt werden wie an den übrigen Kalibrierdatensatz.

15

Bei der in Fig. 2 schematisch gezeigten optischen Messvorrichtung kann es sich beispielsweise um eine Einrichtung zur Moiré-Verzeichnungsmessung eines Projektionsobjektivs für die Mikrolithographie als Prüfling 2 handeln, wobei die Senderanordnung 3 eine periodische Moiré-Struktur umfasst, welche mit einer ähnlichen periodischen Moiré-Struktur, die Teil der Empfängeranordnung 1 ist, zu einem Moiré-Muster überlagert wird. Als Moiré-Strukturen sind z.B. übliche Linear-, Parkett-, Kreuz-, Schachbrett- oder andere ein- oder zweidimensional periodische Moiré-Gitterstrukturen verwendbar. Die senderseitige Moiré-Struktur wird vorzugsweise in der Objektebene des Projektionsobjektivs platziert, die empfängerseitige Moiré-Struktur in dessen Bildebene. Es versteht sich, dass zur Senderanordnung 3 außerdem eine zugeordnete Beleuchtung und zur Empfängeranordnung 1 entsprechend ein Detektionssystem gehört. Die Prüflingsfeldelemente entsprechen in diesem Fall Rasterpunkten  $k, l$  im Feld des Objektivs, die Messgröße  $M_{k,l}$  ist die Phase des Moiré-Musters für den jeweiligen Feldpunkt, die mit einem üblichen Verfahren, z.B. dem Phasenschiebungsverfahren, ermittelt wird.

Um auf die zum prüflingsbedingten Messwertanteil  $P_{k,l}$  proportionale Verzeichnung des Objektivs für den jeweiligen Feldpunkt  $k, l$  zu schließen, müssen die Gitterfehler am jeweiligen Feldpunkt bekannt sein, zumindest als Summe aus Objektgitterfehler  $S_{k,l}$  und Bildgitterfehler  $R_{k,l}$ . Daraus resultiert der Bedarf, den Phasenfehler der Moiré-Gitter, der direkt proportional zum Versatz der Gitterlinien von ihrer Idealposition ist, zu kalibrieren.

Dies gelingt mit dem erfindungsgemäßen Selbstkalibrierungsverfahren.

10 Hierzu werden mehrere kommensurable Neuuzuordnungen der Messkanäle vorgenommen. Für den Fall zweidimensionaler periodischer Moiré-Gitter kann z.B. wie folgt vorgegangen werden. Bei einer ersten Neuuzuordnung werden das objektseitige Gitter und das bildseitige Gitter gemeinsam, untersetzt mit dem nominellen Abbildungsmaßstab des zu

15 vermessenden Objektivs, um eine Rastereinheit entlang einer ersten Richtung  $[1,0]$  verschoben. Bei einer zweiten Neuuzuordnung werden die beiden Gitter gemeinsam entlang einer zweiten, zur ersten senkrechten Richtung  $[0,1]$  verschoben. Bei einer dritten Neuuzuordnung wird das Objektiv um  $90^\circ$  gedreht.

20

Bei der Neuuzuordnung der Kanäle können systematische Fehler auftreten, die wie oben beschrieben durch Feldverlaufskorrekturen berücksichtigt werden können. Beim Verschieben des Gitterpaares kann dieses entlang beider Richtungen  $[1,0]$  und  $[0,1]$  fehlpositioniert werden.

25 Für die Verschiebung entlang der ersten Richtung  $[1,0]$  ist eine erste Amplitude  $\omega^{(1)}_1$  in  $[1,0]$ -Richtung und eine zweite Amplitude  $\omega^{(1)}_2$  in  $[0,1]$ -Richtung zu bestimmen. Für die Verschiebung in die zweite Richtung  $[0,1]$  ist ebenso eine erste Amplitude  $\omega^{(2)}_1$  in  $[1,0]$ -Richtung und eine zweite Amplitude  $\omega^{(2)}_2$  in  $[0,1]$ -Richtung zu bestimmen, und zwar für alle

30 Feldpunkte  $k, l$  einheitlich, d.h. die Feldverlaufskorrektur hängt in diesem Fall nicht vom betrachteten Feldpunkt ab. Als weitere Fehlpositionierung kann das Gitter auch gieren, d.h. sich verdrehen. Die Feldverlaufs-



korrektur hängt in diesem Fall vom betrachteten Feldpunkt  $k, l$  ab, mit angenommenen Amplituden  $\omega^{(1)}_3 [k, l]$  und  $\omega^{(2)}_3 [k, l]$ . Der Punkt  $[0,0]$  legt den Feldpunkt fest, an dem die Drehachse die Prüflingsfeldebene schneidet. Alle anderen Bewegungen aus der Gitterebene heraus, wie

5 Defokus, Rollen und Nicken, können als kontrolliert angenommen werden, so dass die Telezentrie des optischen Strahlengangs die Messwerte nicht beeinflusst. Beim Drehen des Objektivs kann die Drehachse geringfügig von der optischen Achse abweichen, wodurch sie dem Phasenfeld eine unbekannte Translation mit zu bestimmenden Amplituden  $\omega^{(3)}_1$  und  $\omega^{(3)}_2$  überlagert. Auch hierbei kann eine Verdrehung des Gitters mit angenommener Amplitude  $\omega^{(3)}_3$  auftreten. Mit obiger Notation lautet somit das Gleichungssystem (nicht explizit gezeigte Spaltenvektorvariablen werden durch Unterstreichungen dargestellt):

10

15  $\underline{M}^{(0)}_{k,l} = \underline{P}_{k,l} + (\underline{S}_{k,l} + \underline{R}_{k,l})$

$$\underline{M}^{(1)}_{k,l} = \underline{P}_{k,l} + (\underline{S}_{k+1,l} + \underline{R}_{k+1,l}) + \omega^{(1)}_1 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \omega^{(1)}_2 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} + \omega^{(1)}_3 \begin{pmatrix} k \\ l \end{pmatrix}$$

$$\underline{M}^{(2)}_{k,l} = \underline{P}_{k,l} + (\underline{S}_{k,l+1} + \underline{R}_{k,l+1}) + \omega^{(2)}_1 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \omega^{(2)}_2 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} + \omega^{(2)}_3 \begin{pmatrix} k \\ l \end{pmatrix}$$

20

$$\underline{M}^{(2)}_{k,l} = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \underline{P}_{k,l} + (\underline{S}_{k,l} + \underline{R}_{k,l}) + \omega^{(3)}_1 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \omega^{(3)}_2 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} + \omega^{(3)}_3 \begin{pmatrix} k \\ l \end{pmatrix}$$

Die Gitterfehleranteile  $(\underline{S}_{k,l} + \underline{R}_{k,l})$  können über das Gleichungssystem aus den vier Permutationsmessungen numerisch berechnet werden, bis

25 auf den Maßstab und irrelevante Translationen und Rotation. Der Maßstabsfehler  $[l,-k]$  muss somit anderweitig ermittelt werden, z.B. indem man ihn mit einem einmal extern kalibrierten Gitterpaar am selben Prüfling vergleicht. Das Gitterpaar kann mit dem geschilderten Selbstkalibrierverfahren auf Nanometer genau kalibriert werden, obwohl die

Gitter im Mikrometerbereich, d.h. viel ungenauer, verschoben bzw. das Objektiv relativ zu den Gittern gedreht wird. Das bedeutet, dass die Maßverkörperung der Verschiebe- und Dreheinheit nicht in die Kalibrierung eingeht.

5

Es versteht sich, dass es bei allen erwähnten Relativbewegungen jeweils nur auf die relative Lageveränderung und nicht darauf ankommt, welches der in ihrer Lage relativ zu verändernden Elemente tatsächlich bewegt wird. Es versteht sich außerdem, dass das gezeigte Verfahren  
10 nicht auf die Kalibrierung von Vorrichtungen zur Verzeichnungsmessung an Projektionsobjektiven beschränkt ist, sondern auch in anderen Vorrichtungen vorteilhaft zu Kalibrierungszwecken angewendet werden kann, z.B. zur Kalibrierung von Messvorrichtungen zur Passeprüfung. Auch die beschriebene Verwendung der Phase als Messgröße ist  
15 lediglich beispielhaft und stellt keine Einschränkung dar, da sich das Verfahren zur Kalibrierung von beliebigen, reellen oder komplexen, skalaren, vektoriellen, tensoriellen oder andersartigen Messgrößen eignet.

Figur 4 zeigt eine weitere, mit dem in Fig. 1 dargestellten Verfahren  
20 kalibrierbare optische Messvorrichtung 20 mit einer Sensoranordnung 21 zur Passeprüfung an einer reflektierenden oder streuenden Oberfläche 22. Die Messvorrichtung 20 kann zur Prüfung beliebig geformter, reflektierender oder streuenden Oberflächen, wie z.B. von optischen Linsen oder Spiegeln für Lithographieobjektive, eingesetzt werden. Zur  
25 Orientierung wird im folgenden auf ein rechtwinkliges xyz-Koordinatensystem Bezug genommen, wie es in Fig. 4 angegeben ist. Die Sensoranordnung 21 weist eine zweidimensionale Rasteranordnung 24 von relativ zur Oberfläche 22 abstandsändernd in z-Richtung beweglichen optischen Fokussensorelementen 23 auf, von der in der Seitenansicht  
30 von Fig. 4 nur eine in x-Richtung liegende Sensorelementreihe zu erkennen ist. Die Sensoranordnung 21 ist mittels einer Drehvorrichtung 25 um die z-Richtung drehbar. Außerdem kann die Sensoranordnung 21

mittels einer Hubvorrichtung 26 entlang der x-Richtung verschoben werden. Der Prüfling mit der zu prüfenden Oberfläche 22 ist an einer Halterung 28 befestigt, welche auf einem in z-Richtung relativ zur Sensoranordnung 21 verfahrbaren Schlitten 27 fest oder drehbar und verschiebbar angebracht ist. Die Abstandsveränderlichkeit der Fokus-  
5 sensorelemente 23 gegenüber der Oberfläche 22 dient primär dazu, die Sensorelemente 23 grob an die Oberflächenform des Prüflings anzupassen, so dass dann ein kleiner Verstellbereich in z-Richtung genügt, um für alle Sensorelemente 23 den Fokusbereich abzudecken. Das  
10 spart Messzeit und verringert die Gefahr von Fehlpositionierungen z.B. durch Verkantung.

Die optische Messvorrichtung 20 zur Passeprüfung gestattet somit eine große Flexibilität bei der Ausrichtung der Sensoranordnung 21 relativ zur  
15 reflektierenden Oberfläche 22. Für die Kalibrierung nach dem anhand von Fig. 1 dargestellten Verfahren ist es außerdem günstig, dass durch Translation und Drehung die Rasteranordnung 24 in verschiedene kommensurable Relativstellungen gefahren werden kann.

20 Fig. 5 zeigt eine Darstellung des Messprinzips der Vorrichtung von Fig. 4 anhand eines der Fokussensorelemente 23. Der Fokussensor 23 weist eine erste, z.B. hochaperturige (numerische Apertur bis 0,7) Asphäre 30 sowie eine zweite hochaperturige Asphäre 31 auf und ist mit einem Einmoden-Lichtleiter 32 verbunden. Der Lichtleiter 32 verzweigt sich an  
25 einem Faser-Verzweiger 33 zu einer Detektoreinheit 24 sowie einer Lichtquelle 35, welche beide mittels einer Sensorsteuerungseinheit 36 angesteuert werden. Die Sensorsteuerungseinheit 36 liefert ein Detektionssignal, welches auf einen y-Kanal 37 einer Oszilloskop-Auswerteeinheit 40 gelegt wird. Die Verschiebung der reflektierenden Ober-  
30 fläche 22 entlang der z-Richtung wird mittels des in Fig. 4 gezeigten verfahrbaren Schlittens 27 gesteuert und an einen x-Kanal 38 der Auswerteeinheit 40 gelegt.

Der Fokussensor 23 bildet ein beugungsbegrenztes abbildendes System und ist so justiert, dass das Ende des Lichtleiters 32 im objektseitigen Fokus zu liegen kommt. Befindet sich die zu prüfende Oberfläche 22 im bildseitigen Fokus, so wird das Laserlicht aus dem Lichtleiter 32 in sich und damit in den Lichtleiter 32 zurückreflektiert (sogenannte „Cat-Eye“-Stellung). In dieser Stellung, die bei entsprechender Auslegung der Optik unabhängig vom Inzidenzwinkel ist, erreicht das Sensorsignal seinen Maximalwert. Bei einer relativen Verschiebung des Fokussensors 23 gegenüber der zu prüfenden Oberfläche in z-Richtung ergibt sich ein weitgehend symmetrischer Signalverlauf mit einem scharfen Maximum bei der „Cat-Eye“-Position, wie schematisch in Form eines Oszillogramms 39 an der Auswerteeinheit 40 angedeutet. Da lediglich die Position des Signalmaximums von Relevanz ist, sind die Anforderungen an den Fokussensor 23 selbst eher gering und beschränken sich auf eine hohe Auflösung in unmittelbarer Nähe seines Fokus. Letztere ergibt sich z.B. bei einer numerischen Apertur der zweiten Asphäre 33 von 0,7 und einer Wellenlänge von 500 nm zu ungefähr  $1\ \mu\text{m}$ . Kompakte Fokussensoren mit einer solchen Auflösung werden bereits in vielen Anwendungen eingesetzt, beispielsweise in CD- und DVD-Leseköpfen oder Autofokussensoren, so dass sie in großen Stückzahlen kostengünstig zur Verfügung stehen. Ein Vorteil des Lichtleiter-Prinzips besteht neben der Kompaktheit der Sensoren darin, dass keine parasitären Wärmequellen in die Tasteranordnung eingebracht werden, so dass keine Probleme wegen thermischer Ausdehnung oder thermischem Driften der Sensoren entstehen.

Die Messwertgewinnung erfolgt über eine Auswertung der Maximumlagen der Sensorsignale. Um diese Lagen festzustellen, wird die zu prüfende Oberfläche 22 relativ zur Sensoranordnung 21 in z-Richtung verfahren. Der Verfahrensweg wird mit der Genauigkeit erfasst, die bei der Passeprüfung erreicht werden soll. Mit dem z.B. luftgelagerten Schlitten

27 und auf Glasmaßstäben basierenden Wegmesssystemen sind Genauigkeiten im nm-Bereich verfügbar.

Der eigentliche Messablauf besteht darin, beim Verfahren des Prüflings  
5 die Sensorsignale der Fokussensoren 23 als Funktion des Fahrwegs  
simultan aufzuzeichnen und daraus die Peakpositionen  $Z_k$  der einzelnen  
Sensoren mit Index  $k$  zu bestimmen. Dabei ist jedem Sensor 23 durch  
vorheriges Vermessen der Rasteranordnung 24, z.B. mittels einer Ko-  
ordinatenmessmaschine, eindeutig eine Position  $[x_k, y_k]$  in der xy-Ebene  
10 zugeordnet. Sind die Fokuslagen  $S_k$  der Sensoren 23 bekannt, so ist die  
interessierende Flächentopographie an den Messpunkten  $T_k = T(x_k, y_k)$   
durch folgende einfache lineare Beziehung gegeben:

$$Z_k = T_k + S_k .$$

15

Fig. 6 zeigt eine Darstellung einer inkommensurablen Verschiebung der  
Rasteranordnung 24 von Fig. 4 zur Erhöhung der Zahl und damit der  
Dichte der Messpunkte. Bei dieser inkommensurablen Verschiebung  
wird die Rasteranordnung 24 in x- und y-Richtung jeweils um den halben  
20 Rasterabstand verschoben, so dass die Positionen der Sensorelemente  
23 in der neuen Stellung 24a der Rasteranordnung 24 genau zwischen  
den ursprünglichen Positionen der Sensorelemente 23 liegen. Durch  
eine solche Verschiebung kann die Dichte der Messpunkte pro Flächen-  
einheit auf das Doppelte erhöht werden. Es versteht sich, dass inkom-  
25 mensurable Verschiebungsabstände und/oder Verschiebungsrichtungen  
je nach Bedarf auch um beliebige andere Bruchteile des Rasterabstands  
statt des beschriebenen Bruchteils 0,5 möglich sind, um die Mess-  
punktanzahl zu steigern.

30 Des weiteren sind kommensurable Verschiebungen der Rasteranord-  
nung 24 um ganzzahlige Vielfache des Rasterabstands zur Erweiterung  
des Erfassungsbereichs und/oder zur Kalibrierung möglich. Fig. 7 zeigt

als Beispiel eine Verschiebung um eine ganze Rastereinheit in x- und y-Richtung. Mit der verschobenen Rasteranordnung 24b wird der Erfassungsbereich um eine Zeile und eine Spalte erweitert. Gleichzeitig geht eine vor der Verschiebung von der Rasteranordnung 24 erfasste Zeile und Spalte verloren. Durch sukzessive Verschiebungen der Rasteranordnung 24 um mehrere Rastereinheiten in x- und/oder y-Richtung kann der Erfassungsbereich der Messung auf die gesamte zu prüfende Oberfläche ausgedehnt werden, wenn letztere größer als die Ausdehnung der Rasteranordnung 24 ist. Als weiterer signifikanter Vorteil kann eine kommensurable Verlagerung auch zur Selbstkalibrierung der optischen Messanordnung 20 durch das erfindungsgemäße Kalibrierverfahren verwendet werden. Mathematisch lässt sich eine solche kommensurable Verlagerung durch einen Positionierungsoperator  $P$  beschreiben. Die Position  $p_k = [x_k, y_k]$  eines Sensorelements vor der Verlagerung wird durch den Positionierungsoperator  $P$  in eine kommensurable Position  $P(p_k) = [x_{k'(p)}, y_{k'(p)}]$  der Rasteranordnung überführt, d.h. abgesehen von Randeffekten in eine Position, an der sich vor der Verschiebung ein anderes Sensorelement befand. Der Index  $k$  bezeichnet hierbei die Position bezüglich der zu prüfenden Fläche. Der Index  $p$  kennzeichnet die Zusammensetzung einer Positionierungsoperation, welche aus einer kommensurablen Verschiebung und/oder einer der Symmetrie angepassten Drehung bestehen kann.

Verfahrensgemäß werden in geeigneten kommensurablen Stellungen  $(p_1, p_2, \dots, p_N)$  Topographiemessungen der Oberfläche durchgeführt, wodurch ein in der Regel überbestimmtes Gleichungssystem erhalten wird, wie folgt:

$$\begin{aligned}
 &Z_k(p_1) = T_k + P(p_1) S_k \\
 30 \quad &Z_k(p_2) = T_k + P(p_2) S_k \\
 &\dots \\
 &Z_k(p_N) = T_k + P(p_N) S_k
 \end{aligned}$$

Die Oberflächentopographie der reflektierenden Oberfläche an den Stützstellen  $[x_k, y_k]$  ist durch die prüflingsbedingten Messwertanteile  $T_k$  gegeben. Diese lassen sich anhand des vorstehenden Gleichungssystems aus den Messwerten  $Z_k$  ermitteln, indem die Sensorwerte  $S_k$ , die sowohl einen sender- als auch einen empfängerbedingten Messwertanteil enthalten, bis auf irrelevante Offsets mit dem erfindungsgemäßen Kalibrierverfahren rekonstruiert werden. Hierbei gegebenenfalls auftretende statische Positionierfehler lassen sich durch eine geeignete Algorithmen (Feldverlaufskorrekturen), wie oben am Beispiel der Moiré-Messtechnik gezeigt, kompensieren.

Fig. 8 zeigt eine weitere, mit dem Verfahren von Fig. 1 kalibrierbare optische Vorrichtung 40, die statt der zweidimensionalen Rasteranordnung 24 der Vorrichtung von Fig. 4 vereinfacht eine Sensoranordnung 41 mit einer eindimensionalen, linearen Rasterzeile 44 von relativ zur Oberfläche beweglichen optischen Fokussensorelementen 43 aufweist und dadurch zur Passeprüfung speziell einer rotationssymmetrischen Oberfläche 42 geeignet ist. Die Sensoranordnung 41 kann mittels einer Hubvorrichtung 46 entlang der x-Richtung verschoben werden. Der Prüfling mit seiner rotationssymmetrischen, reflektierenden Oberfläche 42 ist an einem luftgelagerten Präzisionsdrehtisch 48 befestigt, welcher auf einem in z-Richtung relativ zur Sensoranordnung 41 verfahrbaren Schlitten 47 drehbar angebracht ist. Alternativ kann die Sensoranordnung aktiv gedreht werden. Die Verschiebbarkeit in z-Richtung dient wiederum dazu, die z-Lage der Fokussensorelemente 43 an den Prüfling anzupassen, d.h. in den Fangbereich der z-Verschiebung zu bringen. Danach wird die Lage der Sensoranordnung 41 zur Prüflingsoberfläche 42 in z-Richtung fixiert.

30

Eine Manipulierungsmöglichkeit der Oberfläche 42 in ihrer Halterung ist von Vorteil, wenn es um die Einrichtung der Oberfläche 42 relativ zur

Sensoranordnung 41 geht. Eine Harmonischenanalyse der von der Messvorrichtung 40 aufgenommenen Signale bezüglich des Drehwinkels der Oberfläche bietet weiterhin die Möglichkeit der hochgenauen Passetypenanalyse, der Kalibrierung der Positioniervorrichtungen und/oder der Prüfkörperjustage.

Fig. 9 ist eine Draufsicht auf die lineare Rasterzeile 44 der Sensoranordnung von Fig. 8. Die Sensorelemente 43 können zu Kalibrierzwecken und zur Erweiterung des Erfassungsbereichs kommensurabel, d.h. um ein ganzzahliges Vielfaches des Rasterabstands verschoben werden. Fig. 9 zeigt beispielhaft eine Verschiebung der Rasterzeile 44 um vier Rastereinheiten entlang ihrer Längsachse in eine gestrichelt angedeutete verschobene Stellung. Alternativ oder zusätzlich kann zur Erhöhung der Dichte der Messwerte auch eine inkommensurable Verschiebung der linearen Rasterzeile vorgenommen werden, indem diese um einen Bruchteil bzw. ein nicht ganzzahliges Vielfaches des Rasterabstands verschoben wird.

Es versteht sich, dass die optische Messvorrichtung nicht nur mit Fokussensoren, sondern mit beliebigen anderen für diese Messzwecke bekannten Sensoren, z.B. Weißlichtinterferometer, betrieben werden kann.

Die Sensoren können, wenn gewünscht, aus mehreren Sensorelementen zusammengesetzt sein. Sie können zudem bei Bedarf einzeln in z-Richtung beweglich angeordnet sein, um statt oder zusätzlich zu einer z-Bewegung der zu prüfenden Oberfläche für die relative Verschiebung in z-Richtung während der Messung die Sensorelemente einzeln oder gruppenweise oder insgesamt in z-Richtung zu verlagern. Die zu prüfende Oberfläche kann je nach Bedarf relativ zur Sensoranordnung definiert verschoben, verkippt und/oder verdreht sowie gekugelt werden.



Die Positionierungsfreiheitsgrade lassen sich je nach Bedarf beliebig auf die Oberfläche und/oder die Sensoranordnung verteilen.

5 Nachfolgend wird unter Bezugnahme auf die Fig. 10 bis 12 eine weitere vorteilhafte Anwendung des erfindungsgemäßen Kalibrierverfahrens beschrieben, und zwar für eine in Fig. 10 nur schematisch mit ihren hier  
speziell interessierenden Komponenten wiedergegebenen Vermessungsvorrichtung. Diese Vorrichtung dient zur Vermessung eines Projektionsobjektivs 50 für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungs-  
10 anlage z.B. vom Stepper- oder Scanner-Typ hinsichtlich Abbildungsfehlern. Das Projektionsobjektiv 50 ist rotationssymmetrisch mit kreisförmigem Feld ausgelegt und auf einem Luftlagerdrehtisch 51 frei drehbar gelagert, wie mit einem Drehpfeil D symbolisiert.

15 Die Messvorrichtung ist zur Durchführung von Verzeichnungsmessungen nach der sogenannten Parkett-Moiré-Technik ausgelegt, bei der bekanntermaßen objektseitig und bildseitig korrespondierende zweidimensionale Moiré-Strukturen verwendet werden, die nach Art eines Parkettmusters in Substrukturen unterteilt sind. Alternativ ist das nach-  
20 folgend beschriebene Kalibrierverfahren in gleicher Weise für andere parallele Vollfeldmessverfahren oder Zeilenfeldmessverfahren, analog zu Fig. 9, einsetzbar, z.B. für Wellenfrontmesssysteme zur Objektivvermessung auf der Basis eines interferometrischen Prinzips, wie lateraler Scherinterferometrie.

25

Bei diesen parallelen Messtechniken wird die Feldverteilung der interessierenden Messgröße, typischerweise die Phasenverteilung eines Moiré-Überlagerungsmusters oder eines durch laterale Scherinterferometrie erhaltenen Interferogramms, an diskreten Punkten oder Teilflächenbereichen durch geeignet verteilte Messkanäle abgetastet. Die  
30 Eigencharakteristiken dieser Messkanäle, wie kanalabhängige Offsets, überlagern sich dem eigentlich interessierenden Signal und können

durch das erfindungsgemäße Kalibrierverfahren eliminiert werden. Dazu werden, wie schon weiter oben erläutert, mehrere Kalibrierungsmesssequenzen mit kommensurabel gegeneinander verschobenen Signal- und Sensorkanälen durchgeführt und aus den so generierten Mess-  
5 informationen die Eigencharakteristiken des Messsystems bis auf gewisse globale Offsets bestimmt und als Kalibrierdatensatz hinterlegt. Diejenigen globalen Offsets, die zwar im Feld konstant sind, sich aber mit der Drehung transformieren, wie zum Beispiel vektorielle Messdaten, können hingegen ermittelt werden.

10

Wie in Fig. 10 durch ein jeweiliges Doppelpfeilpaar RP, DP symbolisiert, werden für die Verzeichnungsmessung ein in zwei nichtparallelen Richtungen verschiebbares Messretikel 52 und eine ebenfalls in zwei nichtparallelen Richtungen verschiebbare Detektoreinheit 53 benutzt,  
15 wobei die Verschiebeebe jeweils parallel zu einer xy-Ebene eines kartesischen xyz-Koordinatensystems liegt, dessen z-Richtung parallel zur optischen Achse des Projektionsobjektivs 50 ist. Das Messretikel 52 trägt eine zweidimensionale Moiré-Parkettgitterstruktur, deren Luftbild sich mit einer korrespondierenden zweidimensionalen Moiré-Parkett-  
20 gitterstruktur überlagert, die sich auf einem Träger 54 befindet, der an der Eintrittsseite der Detektoreinheit 53 mit dieser in eine Baueinheit integriert ist. Alternativ sind für eine laterale Scherinterferometrie-technik z.B. eine sogenannte Kohärenzmaske als Messretikel und detektorseitig ein Schachbrettgitter einsetzbar.

25

Zur erfindungsgemäßen Kalibrierung werden das Messretikel 52 und die Detektoreinheit 53 mit dem bildseitigen Strukturträger 54 über zugeordnete Bewegungstische, wie eine Retikel- und eine Waferstage, unter Berücksichtigung der Abbildungseigenschaften des Objektivs 50 derart  
30 verschoben, dass sich jeweils eine Zuordnung von Senderelementen, in diesem Fall durch die Substrukturen auf dem Messretikel 52 gegeben, und Empfänger-Elementen, hier gegeben durch die korrespondierenden

Substrukturen auf dem bildseitigen Strukturträger 54 und gegebenenfalls durch die Parzellierung einer dahinter liegenden Detektorfläche, wie eines CCD-Arrays, zu Messkanälen ergibt. Diese Bildung zugeordneter Messkanäle ist in Fig. 10 symbolisch durch Kugeln auf dem Messretikel  
5 52 einerseits und dem bildseitigen Strukturträger 54 andererseits angedeutet.

Die Signalgewinnung beim Vermessungsvorgang erfolgt, wie an sich bekannt, durch definiertes Phasenschieben der bildseitigen Struktur  
10 gegenüber dem Luftbild der objektseitigen Struktur und anschließender numerischer Phasenrekonstruktion. Zur Kalibrierung kann ausgehend davon so vorgegangen werden, dass das Objektiv 50 gegenüber dem Strukturpaar bei angenommener quadratischer Anordnung der Substrukturen und damit auch quadratischer Messkanalanordnung in ganz-  
15 zahligen Vielfachen von  $90^\circ$  gedreht und das Strukturpaar gekoppelt zellenweise verschoben wird.

Wenn Positionierfehler vernachlässigbar sind, reicht es im Prinzip aus, eine zweidimensionale Messkanalanordnung durch eine minimale Kali-  
20 briersequenz bestehend aus einer Messung an einer unverschobenen Nullposition und zwei weiteren Messungen bei jeweils entlang der orthogonalen x- und y-Achsen um eine Zelle verschobenen Stellungen bis auf globale Offsets vollständig zu kalibrieren. Die Verschiebung entlang der orthogonalen x- und y-Achsen korrespondiert mit der  
25 angenommenen quadratischen Messkanalanordnung. Bei Verwendung von Strukturen mit anderem Periodizitätsverhalten erfolgt entsprechend eine Verschiebung jeweils entlang der Strukturwiederholungsrichtung, und in gleicher Weise hängt das Drehinkrement vom Symmetrieverhalten der benutzten Strukturen bezüglich Drehungen ab. So erfolgt  
30 die Objektivdrehung z.B. bei Verwendung von Strukturen mit hexagonaler Aufteilung in Substrukturen in  $60^\circ$ -Schritten, und die Verschiebungen erfolgen in um  $60^\circ$  verdrehten Richtungen. Es sei an dieser

Stelle erwähnt, dass es für die Drehung jeweils nur auf eine Relativdrehung ankommt, d.h. anstelle einer aktiven Drehung des Objektivs 50 kann eine aktive Drehung von Messretikel 52 und bildseitigem Strukturträger 54 vorgesehen sein, was z.B. in einem Scanner leicht realisierbar ist.

Bei Vorhandensein von Positionierfehlern treten entsprechende Anteile in der Feldverteilung hinzu, die in einer verwendeten Rekonstruktionsmatrix als Nullteiler erscheinen und daher generell nicht bestimmbar sind. Jedoch kann ein Teil dieser Einflüsse durch Messungen in Stellungen eliminiert werden, bei denen Sender- und Empfängeranordnung zusätzlich relativ zueinander kommensurabel gedreht werden, d.h. zum Beispiel in 90°-Schritten bei quadratischer Messkanalanordnung und in 60°-Schritten bei hexagonaler Anordnung. Im Fall der Verzeichnungsmessung verbleiben dann von vier ursprünglichen nur noch die zwei rotationssymmetrischen Feldverteilungsparameter Rotation und Maßstab als unbestimmbar übrig. Die Rotation selbst ist nicht weiter von Belang, und der Maßstab kann leicht von einer externen Referenz gewonnen werden. Der zusätzliche Rotationsfreiheitsgrad bewirkt zudem eine deutliche, vorteilhafte Stabilisierung der Rekonstruktionsgleichung für die Kalibrierung gegenüber statistischem Messrauschen und Einflüssen durch höhere systematische Fehler.

In einer vorteilhaften Variante ist das erfindungsgemäße Kalibrierverfahren auch auf eine Messvorrichtung anwendbar, die derjenigen von Fig. 10 mit der Ausnahme entspricht, dass sie nur über eine statt zwei Verschiebeachsen in der xy-Ebene verfügt, wie dies z.B. bei einem Scanner typischerweise der Fall ist. Diese Verfahrensvariante nutzt die Tatsache aus, dass die zuvor erläuterte Kalibrierung mit zwei Verschiebeachsen äquivalent durch eine Kalibrierung mit nur einer Verschiebeachse in Kombination mit einer Objektivdrehung nachgebildet werden kann.

Dies ist in Fig. 11 diagrammatisch veranschaulicht. Das linke Teilbild von Fig. 11 zeigt ein Kreisdiagramm für die Kalibrierung mit zwei Verschiebeachsen in einer bleibenden 0°-Drehstellung des vermessenen Objektivs 50. Dabei sind in den Diagrammen die x- und y-Achsenrichtung des Objektivs 50 mit x-OA bzw. y-OA bezeichnet und die Verschiebungsachsen mit x-SA bzw. y-SA. Wie aus dem linken Kreisdiagramm ersichtlich, ist für die oben zu Fig. 10 beschriebene Kalibrierung eine Verschiebung in x-Richtung, d.h. entlang x-SA, und eine Verschiebung in y-Richtung, d.h. entlang y-SA, möglich. Diese Kalibrierverschiebung entlang der beiden orthogonalen Richtungen ist, wie durch das Gleichheitszeichen in Fig. 11 symbolisiert, äquivalent durch eine Aufeinanderfolge, in Fig. 11 durch ein Pluszeichen repräsentiert, zweier Verschiebungen entlang nur einer Richtung, hier angenommen der y-Richtung, d.h. entlang y-SA, in zwei orthogonalen Objektivdrehstellungen ersetzbar. Das mittlere Kreisdiagramm symbolisiert den Messvorgang in der ungedrehten Objektivstellung mit Kalibrierverschiebung längs y-SA. Das rechte Kreisdiagramm von Fig. 11 repräsentiert eine um 90° gedrehte Objektivstellung und die dann wiederum längs y-SA erfolgende Kalibrierverschiebung. Die relative Objektivdrehung ist durch die Lage einer Justiermarke 55 angedeutet.

Die Äquivalenz der Kalibriervariante mit nur einer Verschiebungsrichtung kombiniert mit einer Relativdrehung des Prüflings mit einer Kalibrierverschiebung längs zweier nichtparalleler Richtungen lässt sich experimentell und auch streng mathematisch zeigen. Fig. 12 veranschaulicht experimentelle Ergebnisse von Kalibriermessungen mit der Kalibriervariante, welche nur eine Verschieberichtung in Kombination mit einer Prüflingsdrehung benutzt. Die beiden Diagramme von Fig. 12 stellen Zernike-Spektren dar, das obere Teilbild für die Mittelwerte, das untere Teilbild für die Standardabweichungen (Sigma) der Koeffizienten. Die gleichen Resultate ergeben sich bei Verwendung des Kalibrierverfahrens.

rens mit den beiden orthogonalen x- bzw. y-Verschiebeachsen, wie ein Vergleich der Fig. 12 mit der Fig. 13 zeigt, welche entsprechende Diagramme für das Kalibrierverfahren mit den zwei orthogonalen Verschiebeachsen darstellt. Im übrigen sind bezüglich der zu den

5 Fig. 10 bis 13 beschriebenen Kalibrierungsbeispiele die oben zu den anderen Ausführungsbeispielen genannten Maßnahmen und Wirkungen in gleicher Weise anwendbar. Mit den Transformationsgleichungen, welche mathematisch den Zusammenhang zwischen der Methode mit einer Verschiebeachse und einer Drehung und der Methode mit zwei

10 nicht-parallelen Verschiebeachsen beschreiben, ist es möglich, die Messdaten aus den Kalibriersequenzen gemäß der einen Methode so zu überführen, dass die ursprünglichen, für die andere Methode entwickelten Algorithmen verwendet werden können. Das erleichtert unter anderem auch die Pflege der Algorithmen bzw. von Computer-

15 programmen zu deren Ausführung, insbesondere wenn diesbezüglich eine ganze Reihe von Korrekturmaßnahmen implementiert sind, wie bezüglich Drift, ungültigen Messkanälen, Randeffekten etc.

In einem weiteren Aspekt beinhaltet die Erfindung eine neuartige

20 pupillenaufgelöste Bestimmung des Transmissionsvermögens, d.h. des Transmissionsgrades oder kurz der Transmission, eines optischen Abbildungssystems als jeweiligem Prüfling, wie eines Mikrolithographie-Projektionsobjektivs. Bekanntermaßen ist durch Angabe einer komplexen Pupillen-Transmissionsfunktion, d.h. einer mathematischen

25 Funktion mit Real- und Imaginärteil, welche den Transmissionsgrad ortabhängig für einen jeweiligen Punkt einer Pupillenebene des Prüflings beschreibt, an einer ausreichend großen Anzahl von Pupillen- und Feldpunkten eine sehr umfassende Spezifizierung der Abbildungseigenschaften des Prüflings möglich. Für den Imaginärteil, d.h. die

30 Phase, dieser Funktion stehen bereits hochgenaue Messverfahren zur Verfügung, wie solche, die auf Wellenfrontmessungen unter Verwendung lateraler Scherinterferometrie beruhen. Für den Realteil

stehen bislang typischerweise nur indirekte Messungen zur Verfügung, bei welchen die von einem Feldpunkt in einer Objekt- bzw. Retikelebene abgestrahlte Intensität integral in einer Bild- bzw. Waferenebene gemessen wird. Das abgestrahlte Winkelspektrum wird hierbei durch das

5 Beleuchtungssetting festgelegt, d.h. es wird nur ein integraler Transmissionswert für diejenigen Pupillenbereiche ermittelt, welche durch die nullte Beugungsordnung ausgeleuchtet werden. Diese Art der sogenannten Uniformity-Messung stößt z.B. zur gewünschten, hochpräzisen Spezifizierung von Mikrolithographie-Projektionsobjektiven

10 an ihre Grenzen. Hier besteht die Anforderung einer ausreichend guten Uniformity bzw. Gleichmäßigkeit der CD (Critical Dimension), deren Schwankung u.a. auch durch die Transmission des Objektivs beeinflusst wird. Hierfür spielen sowohl spatial niederfrequente Effekte, wie Transmissionsabfall zum Rand hin an verschiedenen Feldpunkten, als

15 auch spatial hochfrequente Effekte eine Rolle, wie lokale "Transmissionsdips" oder Gitterstrukturen, die zum Streulicht beitragen. Die nachstehend anhand der Fig. 14 bis 16 für zwei verschiedene zugehörige Messvorrichtungen erläuterte Vorgehensweise ermöglicht eine verbesserte Uniformity-Messung, durch die sich die Transmissions-

20 eigenschaften des Prüflings in ähnlicher Weise wie für Wellenaberrationen bekannt mittels einer nicht-integralen Beschreibung der Transmission pupillen- und feldpunktaufgelöst spezifizieren lassen.

Fig. 14 zeigt eine Realisierung, bei der zur pupillenaufgelösten

25 Bestimmung der Transmission eines hier als Prüfling fungierenden Mikrolithographie-Projektionsobjektivs 60, alternativ eines anderen optischen Abbildungssystems, ein auf einer Objektseite des Prüflings 60 anzuordnendes Source-Modul 61 und ein auf einer Bildseite des Prüflings 60 anzuordnendes Sensor-Modul 62 umfasst. Soweit

30 nachfolgend nichts anderes gesagt, sind die betreffenden Module von an sich bekannter Art. Das Source-Modul 61 ist als Punktlichtquellen-einheit ausgelegt, d.h. sie stellt eine Quasi-Punktlichtquelle bereit, mit

der die gesamte Pupille des Prüflings 60 ausgeleuchtet werden kann. Das Sensor-Modul 62 bildet eine Detektoreinheit und umfasst einen zweidimensionalen Intensitätssensor, d.h. ein zweidimensionales, ortsauflösend messendes Intensitätssensorelement 62a, bei dem es  
5 sich z.B. um ein CCD-Array bzw. einen CCD-Chip mit einem zweidimensionalen Feld strahlungsempfindlicher Sensorflächenelemente bzw. Pixel handelt.

In der Systemauslegung von Fig. 14 beinhaltet die Detektoreinheit 62  
10 zudem eine eigene Abbildungsoptik 62b, typischerweise eine Relaisoptik, die dem Intensitätssensorelement 62a vorgeschaltet und dabei so positioniert wird, dass sie eine Bild- bzw. Waferebene 64 des Prüflings 60 in das Fernfeld abbildet. Die Punktlichtquelleneinheit 61 wird mit ihrem Punktlichtquellenstrahler entsprechend in oder nahe einer  
15 korrespondierenden Objekt- bzw. Retikelebene des Prüflings 60 positioniert.

Fig. 15 zeigt eine Variante der Messvorrichtung von Fig. 14, deren Detektoreinheit ohne eigene Abbildungsoptik auskommt und bei der das  
20 Intensitätssensorelement 62a in einer zur Pupille des Prüflings 60 bildseitig konjugierten Ebene positioniert wird. In den Fig. 14 und 15 sind die sich durch den jeweiligen Messaufbau ergebenden Strahlverläufe S14, S15 schematisch dargestellt. In beiden Fällen können je nach Bedarf und weiteren Messzwecken zusätzliche Messvorrichtungs-  
25 komponenten vorhanden sein, beispielsweise ein in der Bildebene 64 positioniertes Beugungsgitter 65, wie in Fig. 16 angedeutet, für laterale Scherinterferometriemessungen. Das Beugungsgitter 65 braucht für die Messungen zur pupillenaufgelösten Transmissionsbestimmung nicht unbedingt entfernt werden. Wenn es vorhanden ist, wird die  
30 Transmissionsmessung lediglich insoweit modifiziert, dass anstelle der direkt aufgenommenen Intensität, wie beim Fall ohne Beugungsgitter,



die durch Phasenschieben ermittelte nullte Harmonische ausgewertet wird.

Wie aus den Fig. 14 und 15 und deren obiger Beschreibung ersichtlich, lässt sich mit dem Messaufbau nach Art von Fig. 14 oder 15 eine zweidimensionale Intensitätsinformation gewinnen, wobei sich verschiedene Messpunkte auf dem Intensitätssensorelement 62a verschiedenen Punkten in der Pupillenebene des Prüflings 60 zuordnen lassen. Durch eine simultane Verschiebung von Source- und Sensor-Modul, d.h. der Punktlichtquelleneinheit 61 und der Detektoreinheit 62 bzw. 62a, lassen sich beliebig viele Feldpunkte vermessen. Zur Bestimmung der gesuchten Uniformity-Funktion  $U(x,y,p_x,p_y)$  mit Feldkoordinaten  $x, y$  und Pupillenkoordinaten  $p_x, p_y$  ist dann nur noch eine Umrechnung der gemessenen Intensitätswerte in Transmissionswerte erforderlich, wozu das nachstehend näher erläuterte Kalibrierverfahren dient, mit welchem der Einfluss der verschiedenen Messoptikkomponenten auf die Transmissionsmessresultate kalibriert werden kann. Unter Berücksichtigung des jeweiligen Messaufbaus ergibt sich für die von einem jeweiligen Pixel des Intensitätssensorelements 62a gemessene Intensität  $I_P$  im Fall von Fig. 14 die Beziehung:

$$I_P = I_B(\varphi_x, \varphi_y) \times T_O(p_x, p_y) \times T_R(\varphi_x, \varphi_y) \times S_{S1}(x_s, y_s)$$

bzw. im Fall von Fig. 15:

$$I_P = I_B(\varphi_x, \varphi_y) \times T_O(p_x, p_y) \times S_{S1}(x_s, y_s) \times S_{S2}(\varphi_x, \varphi_y),$$

wobei  $x_s, y_s$  die Ortskoordinaten des Pixelfeldes des Intensitätssensorelements 62a und  $\varphi_x, \varphi_y$  die Strahlwinkelkoordinaten,  $I_B$  die Abstrahlintensität der Punktlichtquelleneinheit 61,  $T_R$  die Transmission der Detektionsabbildungsoptik 62b,  $S_{S1}$  die ortsabhängige Empfindlichkeit und  $S_{S2}$  die winkelabhängige Empfindlichkeit des

Intensitätssensorelements 62a bezeichnen und wobei die Prüflings- bzw. Objektivtransmission  $T_0$  gesucht ist. Letztere kann berechnet werden, wenn alle anderen Terme bekannt sind, was wiederum durch das folgende Kalibrierverfahren geleistet wird. Die prinzipielle Vorgehensweise des Kalibrierverfahrens liegt darin, mehrere Messungen durchzuführen, wobei eine oder mehrere Messoptikkomponenten so geändert werden, dass sich zwischen zwei Messungen jeweils nur einer der Terme definiert ändert. Die Differenz zwischen den Messungen wird dann durch die erste Ableitung des betreffenden ortsabhängigen Terms beschrieben, so dass der Term selbst, d.h. die betreffende ortsabhängige Transmissionseinflussfunktion, durch anschließendes zweidimensionales Aufintegrieren der ermittelten Ableitungen berechnet werden kann, analog zu entsprechenden Rekonstruktionsalgorithmen zur Wellenfrontbestimmung aus lateralen Scherinterferometriemessungen oder zu Kalibrierungen bei sogenannten Parkett-Moiré-Disto-Messungen.

Fig. 16 veranschaulicht, wie beispielsweise die Abstrahlcharakteristik  $I_B$  des Source-Moduls unter Verwendung eines solchen Kalibrierverfahrens ermittelt wird. Dazu wird eine Reihe von Intensitätsmessungen durchgeführt, wobei die Punktlichtquelleneinheit 61 in genau definierten Winkelschritten in mindestens zwei verschiedenen Kipprichtungen verkippt wird, von denen in Fig. 16 eine erste Kipprichtung K1 um eine zur Zeichenebene senkrechte Kippachse gezeigt ist. Die Kippachsen liegen jeweils in oder nahe des Schnittpunkts von optischer Achse und Objektebene des Prüflings 60, wobei in diesem Schnittpunkt auch die abstrahlungsaktive Punktlichtquelle liegt. Es versteht sich, dass das Source-Modul bzw. die Punktlichtquelleneinheit 61 entsprechend kippbeweglich angeordnet wird, wobei im allgemeinen eine Kippbeweglichkeit in der Größenordnung von bis zu etwa  $1^\circ$  ausreicht. In Fig. 16 dient ein größerer gezeigter Kippwinkel  $\varphi$  lediglich der besseren Erkennbarkeit. Die Punktlichtquelleneinheit 61 lässt sich z.B. durch ein

- für Wellenfrontvermessungen mittels lateraler Scherinterferometrie bekanntes Source-Modul mit geeignetem zusätzlichem Kipp-Modul auf einer Retikelstage oder durch ein entsprechend kippbewegliches Lichtfaserende realisieren. Als weiteres Hilfsmittel können ein oder  
5 mehrere kippbewegliche Spiegel vorgesehen sein, die für eine zusätzliche Strahlumlenkung und die Einstellung der gewünschten Kippwinkel sorgen. Bei Verkippung ändert sich die Abstrahlcharakteristik der Punktlichtquelleneinheit 61 nicht.
- 10 Für jedes Pixel sind bei jeder Kippstellung die Abstrahlwinkel der Strahlung bekannt, die auf das betreffende Pixel fällt. Die auf ein bestimmtes Pixel fallende Strahlung durchläuft bei den verschiedenen Abstrahlwinkeln den gleichen Weg durch das Objektiv und trifft unter dem gleichen Winkel auf das Pixel. Dies bedeutet, dass für die  
15 Intensitätsänderung, die bei einem jeweiligen Pixel in verschiedenen Kippstellungen des Source-Moduls 61 gemessen wird, allein die vom Abstrahlwinkel abhängige Intensitätsänderung des Source-Moduls 61, d.h. die Variation von dessen Abstrahlverteilung  $I_B(\varphi x, \varphi y)$ , verantwortlich ist. Wenn beispielsweise, wie in Fig. 16 veranschaulicht, in einer  
20 Nullstellung des Source-Moduls 61 ein erster Lichtstrahl L1 mit kleinerem Abstrahlwinkel auf ein erstes Pixel 63a, ein zweiter Lichtstrahl L2 mit um einen Winkel  $\varphi$  größerem Abstrahlwinkel auf ein zweites Pixel 63b und ein dritter Lichtstrahl L3 mit nochmals um den Winkel  $\varphi$  größerem Abstrahlwinkel auf ein drittes Pixel 63c fällt, so fällt der erste  
25 Lichtstrahl L1 bei Verkappen des Source-Moduls 61 im Uhrzeigersinn um den Winkel  $\varphi$  mit dem zweiten Lichtstrahl L2 der vorherigen Nullstellung zusammen, und in gleicher Weise fällt mit diesem der dritte Lichtstrahl L3 bei Verkippung des Source-Moduls 61 um den Winkel  $\varphi$  im Gegenuhrzeigersinn zusammen.
- 30 Durch Einstellen einer vorgebbaren Anzahl  $m$  verschiedener Kippstellungen lassen sich auf diese Weise für jedes Pixel eine Anzahl

m-1 von unabhängigen Gleichungen aufstellen, die in einem Least-Square-Sinn gelöst werden können, wodurch die Abstrahlcharakteristik  $I_B(\varphi, \chi, \varphi, y)$  des Source-Moduls 61 erhalten werden kann. Durch analoge Kalibriermaßnahmen können die übrigen Einflussgrößen der Messoptik, wie sie in den beiden obigen Beziehungen für die gesuchte Prüflingstransmission  $T_O$  angegeben sind, ermittelt werden. Für den Messaufbau von Fig. 14 sind dies noch die strahlwinkelabhängige Transmission  $T_R$  der Detektionsabbildungsoptik 62b und die ortsabhängige Empfindlichkeit  $S_{S1}$  des im Bildebenen-Fernfeld befindlichen Intensitätssensorelements 62a. Letztere wird dadurch kalibriert, dass eine Messreihe in verschiedenen Lateralstellungen des Intensitätssensorelements 62a bzw. des Sensor-Moduls 62 aufgenommen wird, d.h. unter Verschieben desselben in mindestens zwei nicht-parallelen Lateralrichtungen senkrecht zur optischen Achse des Prüflings 60 und damit auch des Gesamtsystems. Das strahlwinkelabhängige Transmissionsverhalten  $T_R$  der Detektionsabbildungsoptik 62b wird dadurch kalibriert, dass das gesamte Sensor-Modul 62, d.h. der Messkopf mit Abbildungsoptik 62b und Intensitätssensorelement 62a, in mindestens zwei verschiedenen Richtungen um eine jeweilige Kippachse verkippt wird, die in oder nahe der Bild-/Waferebene des Prüflings 60 auf der optischen Systemachse liegt. Wiederum werden dabei Messungen in den verschiedenen Kippstellungen des Source-Moduls 62 aufgenommen.

Im Fall des Messaufbaus von Fig. 15 sind außer der Abstrahlcharakteristik  $I_B$  der Punktlichtquelleneinheit 61 noch die ortsabhängige und die strahlwinkelabhängige Empfindlichkeit bzw. Sensitivität des Intensitätssensorelements 62a zu kalibrieren. Ersteres erfolgt wie oben zu Fig. 14 beschrieben, indem Messungen in unterschiedlichen Lateralpositionen des Intensitätssensorelements 62a ausgeführt werden. Zur Kalibrierung der strahlwinkelabhängigen Empfindlichkeit  $S_{S2}$  wird eine Messreihe unter Verkippen des Intensitätssensorelements 62a um eine

Kippachse durchgeführt, die in oder nahe der sensitiven Oberfläche des Intensitätssensorelements 62a an deren Schnittpunkt mit der Pupillenmitte und damit im allgemeinen der optischen Systemachse liegt. Somit wird sowohl für den Fall von Fig. 15, bei welchem das Intensitäts-  
5 sensorelement 62a im divergenten Strahl liegt, als auch im Fall der Fig. 14, in welchem das Intensitätssensorelement 62a im parallelen Strahl liegt, eine vollständige Kalibrierung des Intensitätssensorelementes 62a erreicht.

10 Damit sind alle Transmissionseinflussgrößen der Messvorrichtung kalibriert, und es können dementsprechend Messwerte aufgenommen und zur Bestimmung der gesuchten, pupillenkoordinatenabhängigen Transmissionsfunktion  $T_O$  des Prüflings 60 ausgewertet werden. Es versteht sich, dass es sich bei dem Prüfling 60 nicht nur um ein  
15 Mikrolithographie-Projektionsobjektiv, sondern auch um irgendein anderes optisches Abbildungssystem handeln kann. Es sei noch erwähnt, dass die erfindungsgemäße pupillenaufgelöste Transmissionsbestimmung, wie aus den Erläuterungen zu den Fig. 14 bis 16 hervorgeht, ohne weiteres in-situ möglich ist, d.h. am Ort und im  
20 Einbauzustand des Prüflings, z.B. in einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage. Dabei können zweckmäßigerweise auch eine oder mehrere Anlagen bzw. Maschinen für verschiedene Belichtungs-  
vorgänge während eines Waferherstellungsprozesses mit zueinander passenden erfindungsgemäßen Kalibrierungen eingestellt werden.

25

Es versteht sich, dass sich die Erfindung zur Kalibrierung nicht nur von optischen Messvorrichtungen eignet, wie oben beschrieben, sondern in gleicher Weise von auf nichtoptischen Prinzipien beruhenden Messvorrichtungen, z.B. solche, die auf einem elektrischen, magne-  
30 tischen, thermischen, akustischen und/oder mechanischen, z.B. taktilen, Messprinzip, einem Kraft- und/oder Frequenzmessprinzip oder auf Kombinationen hiervon beruhen.

### Patentansprüche

1. Verfahren zur Kalibrierung einer Messvorrichtung (6; 20; 40), die zum Messen an einem Prüfling (2; 22; 42) eine Senderanordnung (3; 24; 44) mit mehreren Senderelementen (5a-e; 23; 43) zum Aussenden von Messsignalen zu Feldelementen (7a-e) des Prüflings (2; 22; 42) und eine Empfängeranordnung (1; 24; 44) mit mehreren Empfängerelementen (4a-e; 23; 43) zum Empfangen von Messsignalen von den Feldelementen (7a-e) des Prüflings (2; 22; 42) umfasst, wobei durch Zuordnung von Empfängerelementen (4a-e; 23; 43) zu Senderelementen (5a-e; 23; 43) Messkanäle gebildet werden,  
gekennzeichnet durch folgende Schritte:
  - a) Einstellen einer ersten Zuordnung von Empfängerelementen (4a-e; 23; 43), Senderelementen (5a-e; 23; 43) und Prüflingsfeldelementen (7a-e) und Durchführen eines ersten Messvorgangs zur Gewinnung eines ersten Satzes von Messwerten in den Messkanälen,
  - b) Einstellen einer neuen Zuordnung von Empfängerelementen (4a-e; 23; 43), Senderelementen (5a-e; 23; 43) und Prüflingsfeldelementen (7a-e) durch relatives Verlagern von Senderanordnung (3; 24; 44) und/oder Empfängeranordnung (1; 24; 44) einerseits und Prüfling (2; 22; 42) andererseits und Durchführen eines erneuten Messvorgangs zur Gewinnung eines weiteren Satzes von Messwerten in den Messkanälen,
  - c) Wiederholen von Schritt b, bis eine vorgebbare Anzahl n von Messwertsätzen vorliegt, und
  - d) Rechnerisches Bestimmen von Kalibrierdaten der Senderelement-Empfängerelement-Anordnung aus einem vorgebbaren Gleichungssystem, welches die funktionale Abhängigkeit der gewonnenen Messwerte von diesen Kalibrierdaten und von prüflingsfeldelementbedingten Messwertanteilen beschreibt.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass Verla-  
gerungsfehler durch Zusatzkorrekturterme im Gleichungssystem,  
welche die entsprechenden Freiheitsgrade beschreiben, berück-  
sichtigt werden, insbesondere als Produkt einer Messsignalstärke  
mit einem Feldverlaufskorrekturterm.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass  
wenigstens zwei der Messkanäle seriell und/oder wenigstens zwei  
der Messkanäle parallel ausgelesen werden und/oder verschiedene  
Messkanal-Subraster einzeln kalibriert und über überlappende  
Schnittmengen verknüpft werden.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekenn-  
zeichnet, dass für die Ermittlung wenigstens eines Messwertsatzes  
mehrere Teilmessungen mit verschiedenen Zuordnungen von Emp-  
fänger-, Sender- und Prüflingsfeldelementen durchgeführt werden.
5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die  
Teilmessungen zu Teilkalibrierungen für die verschiedenen Zuord-  
nungen ausgewertet werden.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekenn-  
zeichnet, dass wenigstens ein Senderelement und/oder wenigstens  
ein Empfängerelement in mehreren Messkanälen verwendet wird.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekenn-  
zeichnet, dass zwischen wenigstens zwei Neuzuordnungsvorgän-  
gen eine oder mehrere Referenzstellungen eingestellt werden, um  
in diesen globale Veränderungen des Prüflings und/oder der Mess-  
vorrichtung zu detektieren.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass für einen ausgefallenen Messkanal oder für einen Messkanal, dessen Umgebungseinfluss sich bei einer Neuordnung ändert, die eine oder mehreren zugehörigen Gleichungen des Gleichungssystems aus dem Gleichungssystem für die betreffende Neuordnung eliminiert werden.
9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Änderung des Umgebungseinflusses durch eine Neuordnung bedingt wird, bei dem der betreffende Messkanal von einem Mittenbereich zu einem Randbereich des Prüflings oder vom Randbereich zum Mittenbereich verlagert wird.
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass bei einer Verlagerung eines Messkanals durch eine Neuordnung eine Messkanal-Umgebung zur Konstanthaltung des Umgebungseinflusses mitverlagert wird.
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass das Einstellen einer neuen Zuordnung von Empfänger-elementen (4a-e; 23; 43), Sender-elementen (4a-e; 23; 43) und Prüflingsfeld-elementen (7a-e) durch Verschiebung und/oder Verdrehung der Senderanordnung (3; 24; 44), der Empfängeranordnung (1; 24; 44) und/oder des Prüflings (2; 22; 42) relativ zueinander durchgeführt wird.
12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass Kopplungen zwischen Messkanälen in dem vorgebbaren Gleichungssystem berücksichtigt werden.



13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass zum rechnerischen Bestimmen der Kalibrierdaten eine additive, lineare Abhängigkeit der Messwerte von den Kalibrierdaten der Senderelemente (4a-e; 23; 43) und der Empfängererelemente (4a-e; 23; 43) sowie von den prüflingsfeldelementbedingten Messwertanteilen und von Feldverlaufskorrekturtermen oder von aus diesen ableitbaren Größen als lineares Gleichungssystem angesetzt wird und die Kalibrierdaten durch entsprechendes Auflösen des linearen Gleichungssystems gewonnen werden.
14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass es zur Kalibrierung einer Wellenfrontvermessungsvorrichtung für ein Projektionsobjektiv dient, wobei eine erste periodische Struktur als Senderanordnung objektseitig und eine zweite periodische Struktur als Empfängeranordnung bildseitig vom Projektionsobjektiv positioniert werden.
15. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass es zur Kalibrierung einer optischen Messvorrichtung zur Bestimmung von Aberrationen, insbesondere von Verzeichnungs- und/oder Bildschalenfehlern, verwendet wird.
16. Verfahren nach Anspruch 14 oder 15, dadurch gekennzeichnet, dass die Neuordnung von Empfängererelementen (4a-e; 23; 43), Senderelementen (4a-e; 23; 43) und Prüflingsfeldelementen (7a-e) durch Translation der beiden periodischen Strukturen relativ zum Projektionsobjektiv um eine oder mehrere Rastereinheiten in einer oder mehreren Periodizitätsrichtungen derselben und/oder durch Drehung des Projektionsobjektivs um einen vorgebbaren Symmetriewinkel vorgenommen wird.

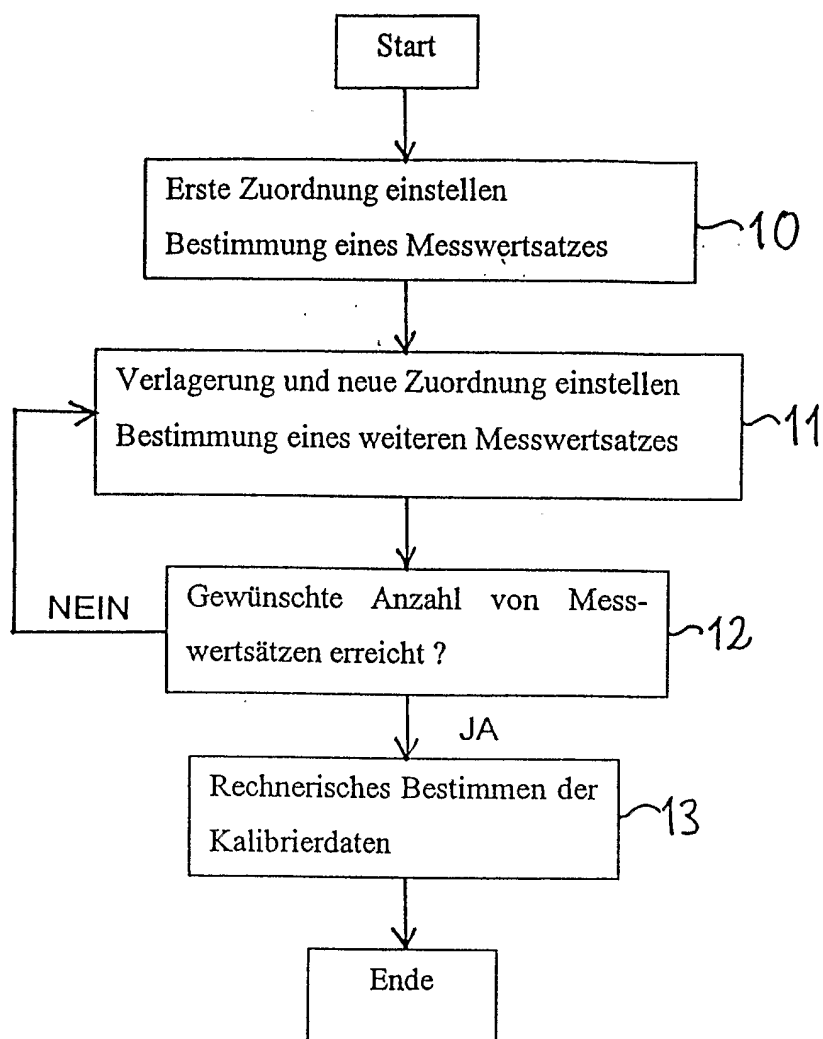
17. Verfahren nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, dass als Translation der beiden periodischen Strukturen eine konjugierte Translation verwendet wird.
18. Verfahren nach Anspruch 16 oder 17, dadurch gekennzeichnet, dass eine Kalibriersequenz mit Messungen bei unterschiedlichen Stellungen verwendet wird, die sich durch Verschiebung längs zweier nicht-paralleler Verfahrachsen oder durch Verschiebung entlang nur einer Verfahrachse in Kombination mit einer Drehbewegung ergeben.
19. Verfahren nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, dass die Messdaten einer Kalibriersequenz, die aus dem Verschieben längs nur einer Verfahrachse in Kombination mit einer Drehung gewonnen wurden, in äquivalente Messdaten, die einer Verschiebewegung längs zweier nicht-paralleler Verfahrachsen entsprechen, transformiert werden, wobei die Transformation aus der Beziehung zwischen der Verschiebewegung längs der zwei nicht-parallelen Verfahrachsen und der Verschiebewegung längs nur einer Verfahrachse in Kombination mit der Drehbewegung abgeleitet wird.
20. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 19, dadurch gekennzeichnet, dass die Neuordnung von Empfängerelementen (4a-e; 23; 43), Senderelementen (4a-e; 23; 43) und Prüflingsfeldelementen (7a-e) durch Translation einer Rasteranordnung (24; 44) von Sensorelementen (23; 43) einer integrierten Sender- und Empfängeranordnung relativ zu einer als Prüfling dienenden Oberfläche (22; 42) um eine oder mehrere Rastereinheiten und/oder durch Drehung der Oberfläche (22; 42) um einen vorgebbaren Symmetriewinkel vorgenommen wird.

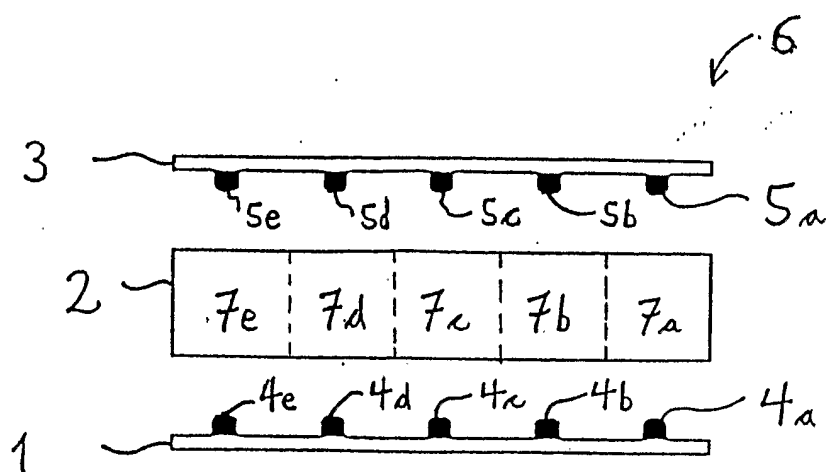
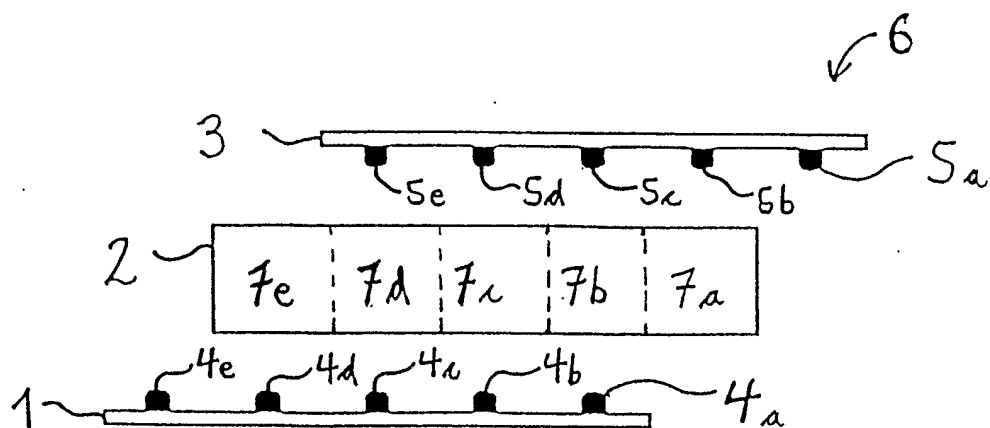
21. Verfahren zur Messung an einem Prüfling, dadurch gekennzeichnet, dass eine Kalibrierung von Messwerten nach dem Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 20 durchgeführt wird und prüflingsfeldelementbedingte Messwertanteile aus den kalibrierten Messwerten bestimmt werden.
22. Optische Messvorrichtung (20; 40) zur Passeprüfung an einer Oberfläche, mit
- einer Passeprüfungs-Sensoranordnung (21; 41) und
  - Auswertemitteln (40) zur Ermittlung von Oberflächenformdaten anhand von durch die Sensoranordnung (21; 41) erfassten Messdaten,
- dadurch gekennzeichnet, dass
- die Sensoranordnung (21; 41) eine Rasteranordnung (24; 44) von optischen Sensorelementen (23; 43) zum Senden und Empfangen von Messstrahlung umfasst, die relativ zur Oberfläche (22; 42) beweglich sind.
23. Optische Messvorrichtung nach Anspruch 22, dadurch gekennzeichnet, dass das jeweilige optische Sensorelement als abstandsvariables Fokussensorelement (23) mit einem zugeordneten Lichtleiter (32) ausgebildet ist.
24. Optische Messvorrichtung nach Anspruch 22 oder 23 zur Passeprüfung einer rotationssymmetrischen Oberfläche (42), dadurch gekennzeichnet, dass die Rasteranordnung (44) von Sensorelementen (43) als lineare Rasterzeile (44) ausgebildet ist.
25. Verfahren zum Betrieb der optischen Messvorrichtung nach einem der Ansprüche 22 bis 24, dadurch gekennzeichnet, dass zur Erhöhung der Dichte der Messpunkte die Rasteranordnung (24; 44) für verschiedene Messvorgänge inkommensurabel und/oder zur

Erweiterung des Erfassungsbereichs kommensurabel relativ zur Oberfläche (22; 42) verschoben wird.

26. Verfahren zum Betrieb der optischen Messvorrichtung nach einem der Ansprüche 22 bis 25, dadurch gekennzeichnet, dass die optische Messvorrichtung (20; 40) durch ein Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14 kalibriert wird, wobei die Sensorelemente (23; 43) als Senderelemente und Empfängerelemente sowie jeweilige Teilbereiche der Oberfläche (22; 42) als Prüflingsfeldelemente fungieren und die Sensorelement-Rasteranordnung (24; 44) zur Einstellung der verschiedenen Zuordnungen von Empfängerelementen, Senderelementen und Prüflingsfeldelementen kommensurabel verlagert wird.
27. Verfahren zur Kalibrierung einer optischen Messvorrichtung zur pupillenaufgelösten Bestimmung der Transmission eines optischen Abbildungssystems (60), die eine Punktlichtquelleneinheit (61) zur quasi-punktlichtförmigen Ausleuchtung einer Pupille des optischen Abbildungssystems und/oder eine Detektoreinheit mit einem zweidimensionalen, ortsauflösend messenden Intensitätssensorelement (62a) umfasst, das in einer zu der Pupille konjugierten Ebene oder in einem Bildebenen-Fernfeld des optischen Abbildungssystems zu positionieren ist, dadurch gekennzeichnet, dass
- die Punktlichtquelleneinheit (61) hinsichtlich winkelabhängiger Intensitätsabstrahlung kalibriert wird, indem mehrere Messungen bei unterschiedlichen Kippwinkeln ( $\varphi$ ) der Punktlichtquelleneinheit ausgeführt werden und/oder
  - die Detektoreinheit hinsichtlich ortsabhängiger Empfindlichkeit kalibriert wird, indem mehrere Messungen bei unterschiedlichen Lateralpositionen der Detektoreinheit ausgeführt werden.

28. Verfahren nach Anspruch 27, dadurch gekennzeichnet, dass zur Kalibrierung der für eine Messung in einer pupillenkonjugierten Ebene ausgelegten Detektoreinheit hinsichtlich winkelabhängiger Empfindlichkeit mehrere Messungen bei unterschiedlichen Kippwinkeln der um eine sensorelementnahe Kippachse kippbeweglich angeordneten Detektoreinheit ausgeführt werden.
29. Verfahren nach Anspruch 27, dadurch gekennzeichnet, dass zur Kalibrierung einer Abbildungsoptik (62b) der für eine Messung im Bildebenen-Fernfeld ausgelegten Detektoreinheit hinsichtlich winkelabhängiger Transmission mehrere Messungen bei unterschiedlichen Kippwinkeln der um eine prüflingsbildebenenennahe Kippachse kippbeweglich angeordneten Detektoreinheit ausgeführt werden.
30. Verfahren zur pupillenaufgelösten Bestimmung der Transmission eines optischen Abbildungssystems mit einer optischen Messvorrichtung, die eine Punktlichtquelleneinheit (61) zur quasipunktlichtförmigen Ausleuchtung einer Pupille des optischen Abbildungssystems und eine Detektoreinheit mit einem zweidimensionalen, ortsauflösend messenden Intensitätssensorelement (62a) umfasst,  
gekennzeichnet durch folgende Schritte:
- objektseitiges Positionieren der Punktlichtquelleneinheit (61) und bildseitiges Positionieren der Detektoreinheit derart, dass das Intensitätssensorelement (62a) in einer zu der Pupille konjugierten Ebene oder in einem Bildebenen-Fernfeld des optischen Abbildungssystems liegt, und
  - Kalibrieren der Punktlichtquelleneinheit und/oder Kalibrieren der Detektoreinheit gemäß dem Verfahren nach einem der Ansprüche 27 bis 29 und Gewinnung entsprechend kalibrierter Messwerte.

Fig. 1

Fig. 2Fig. 3

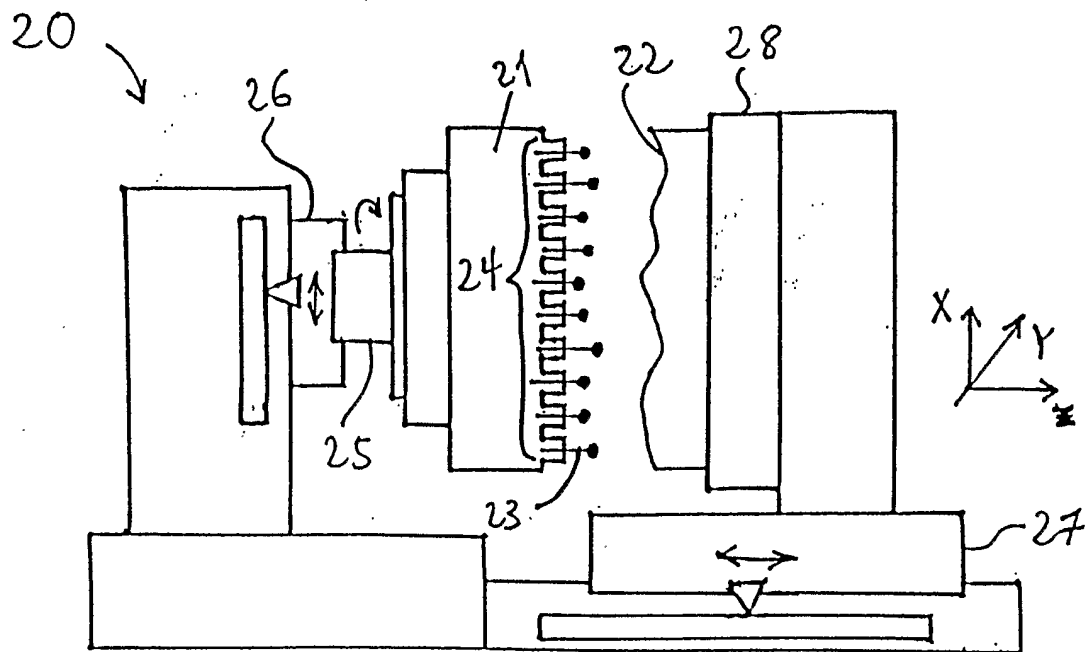


Fig. 4

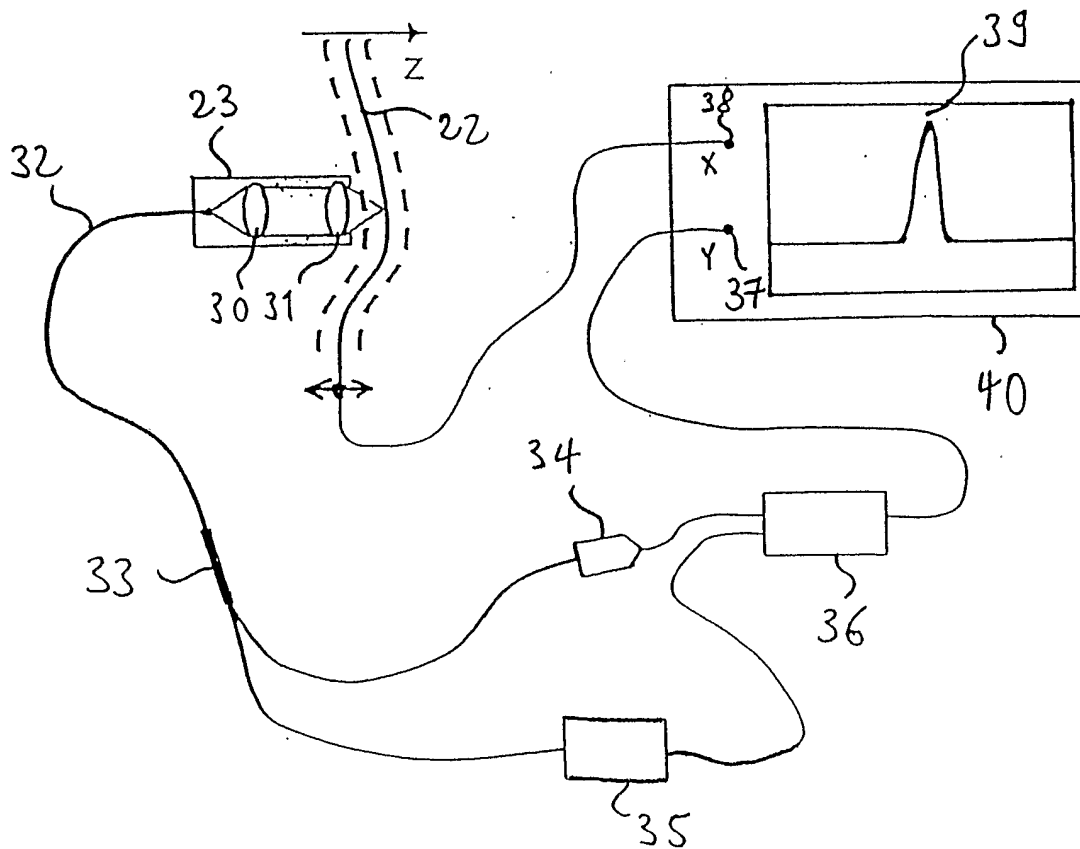


Fig. 5



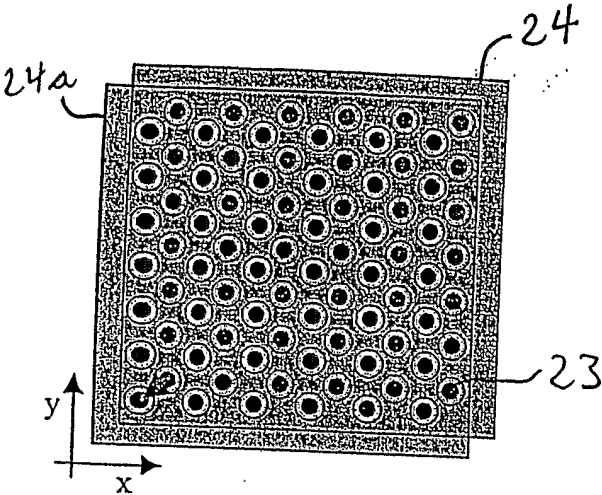


Fig. 6

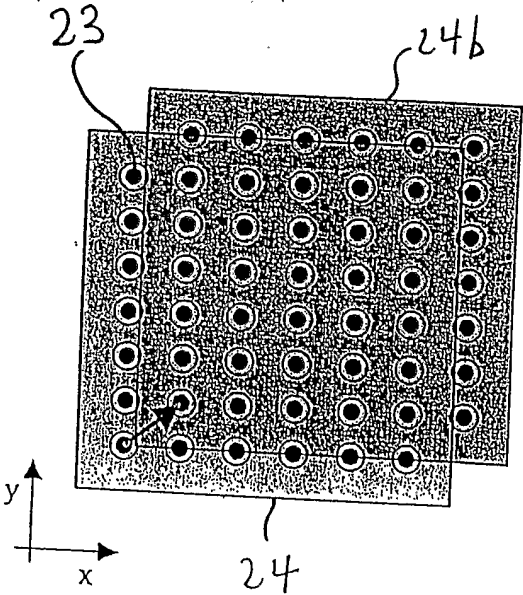


Fig. 7

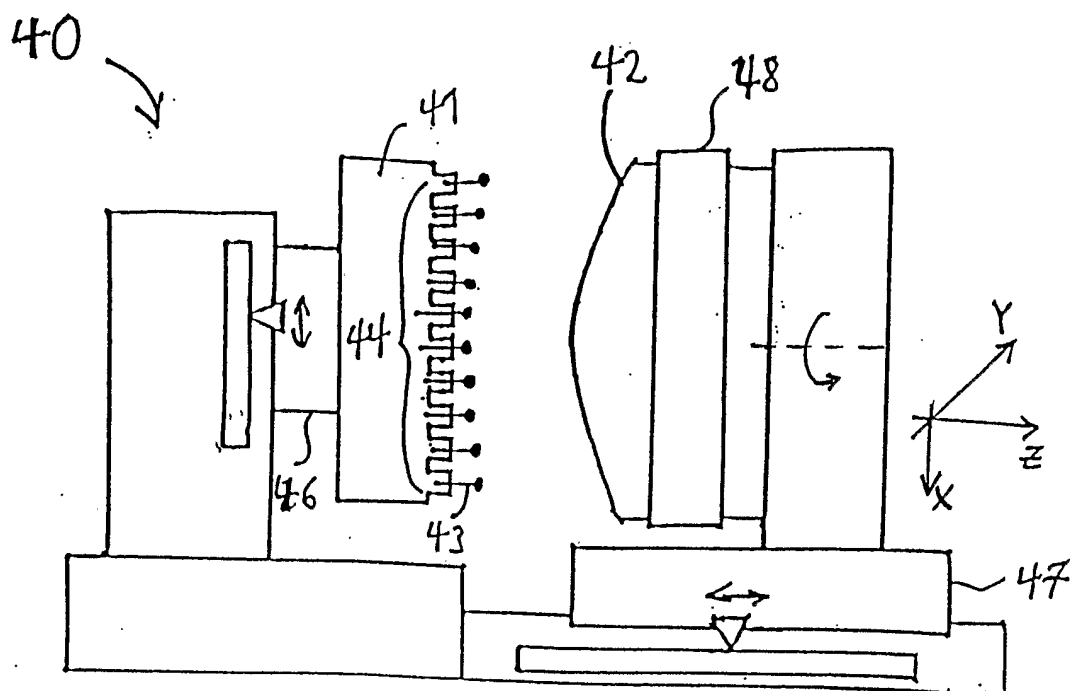


Fig. 8

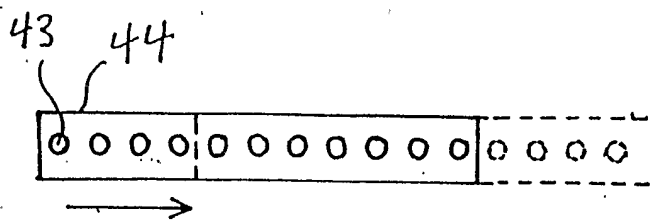


Fig. 9

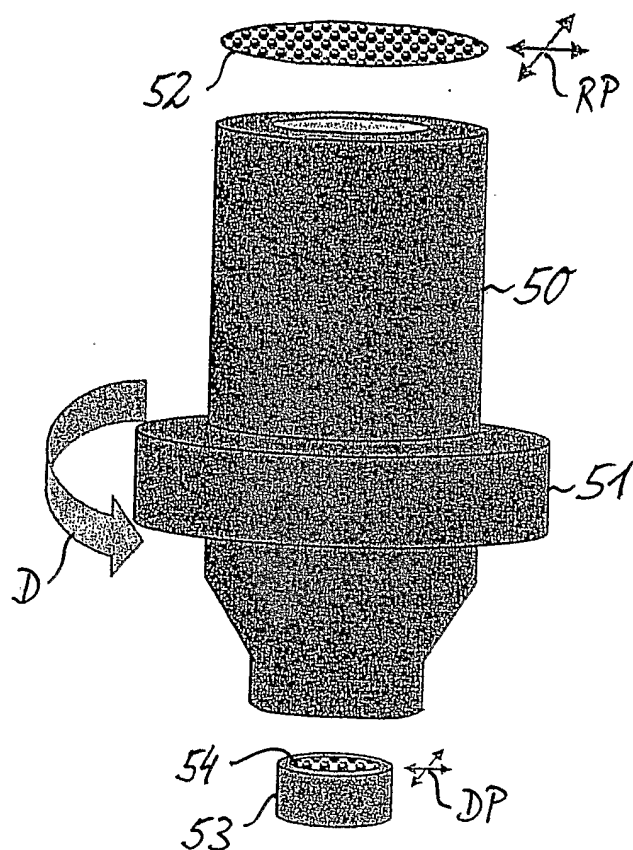


Fig. 10

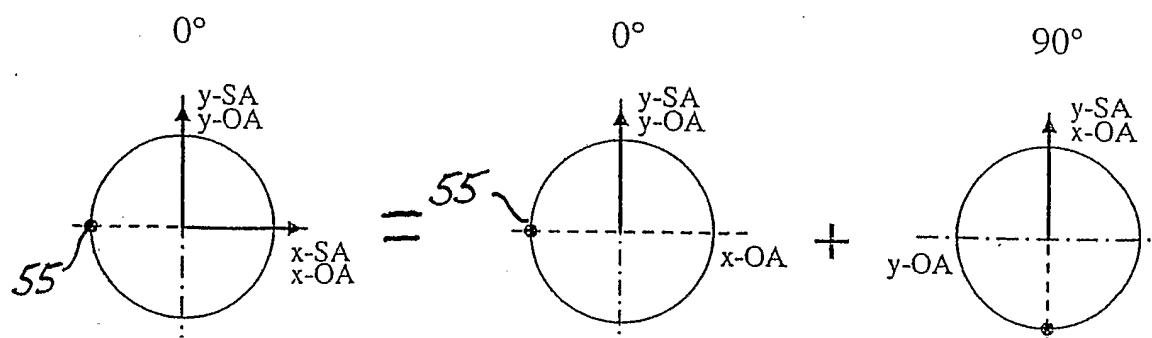


Fig. 11

Fig. 12

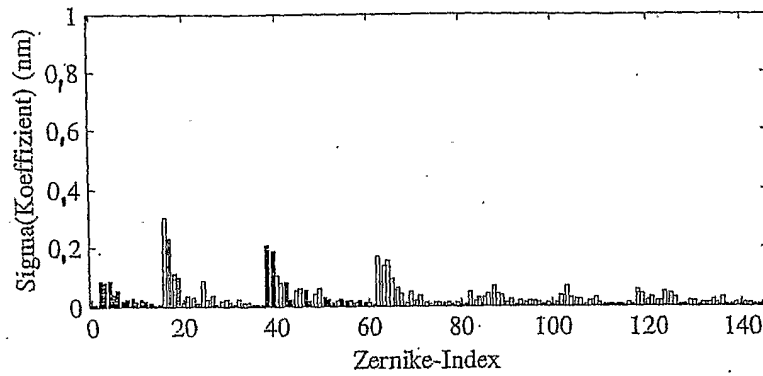
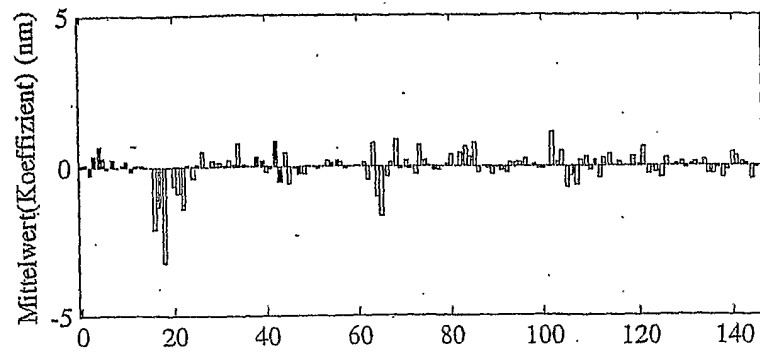
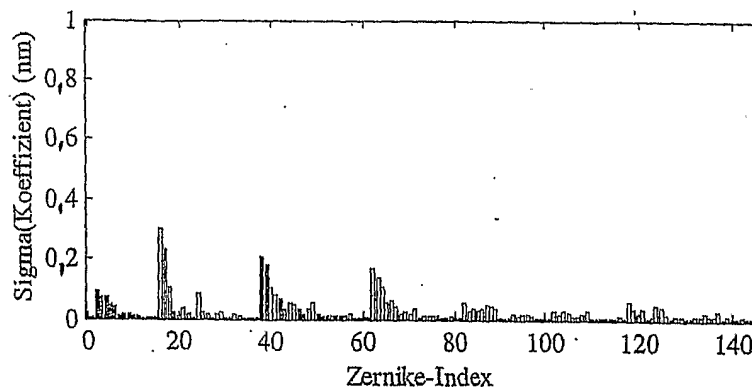
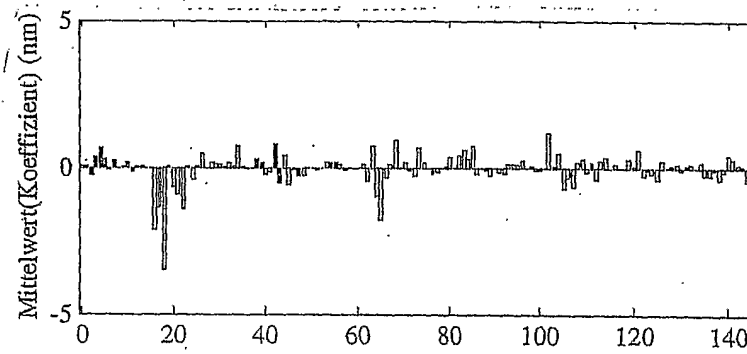


Fig. 13



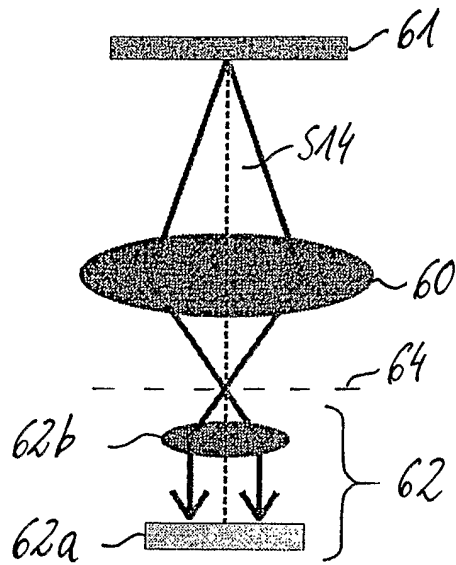


Fig. 15

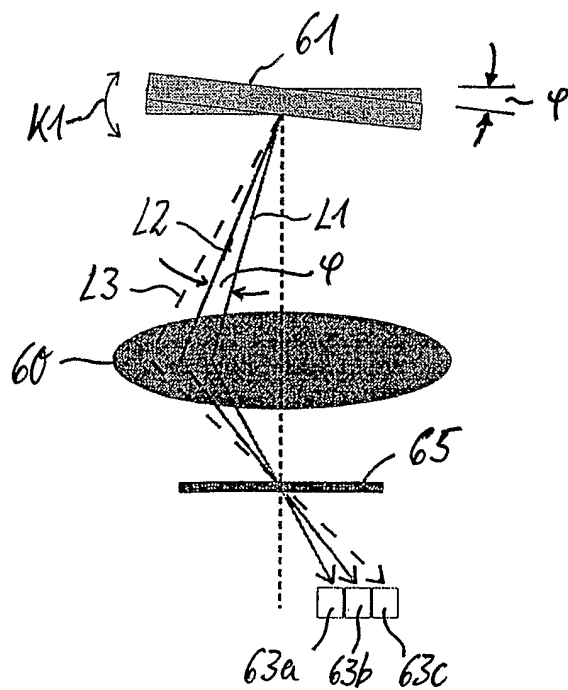
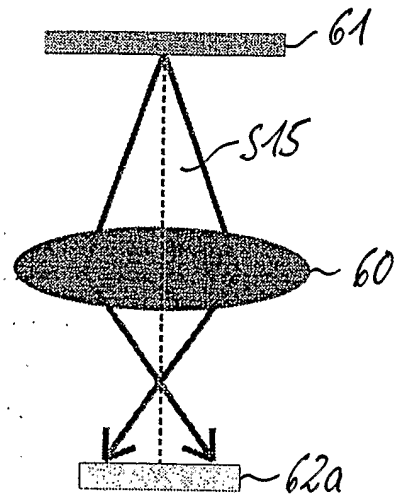


Fig. 16