



(10) **DE 10 2018 209 175 A1** 2019.12.12

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2018 209 175.7**  
 (22) Anmeldetag: **08.06.2018**  
 (43) Offenlegungstag: **12.12.2019**

(51) Int Cl.: **G02B 5/32 (2006.01)**  
**G02B 5/18 (2006.01)**  
**G03H 1/08 (2006.01)**  
**G01M 11/00 (2006.01)**  
**G03F 7/20 (2006.01)**  
**G01B 11/24 (2006.01)**  
**G01B 9/023 (2006.01)**

(71) Anmelder:  
**Carl Zeiss SMT GmbH, 73447 Oberkochen, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	10 2010 038 697	B4
DE	10 2012 217 800	A1
DE	10 2015 202 695	A1

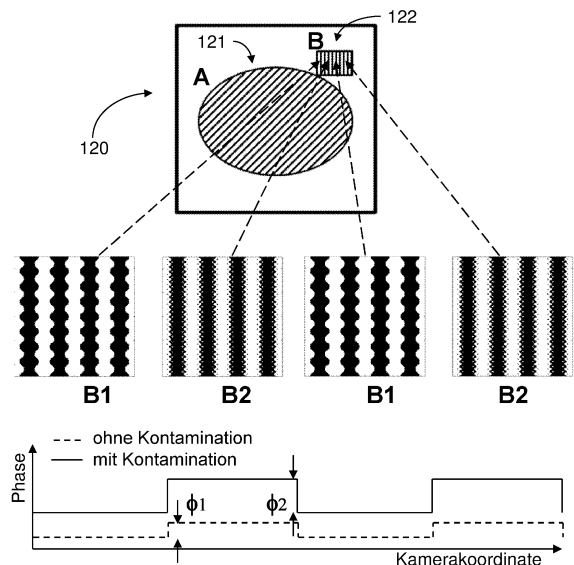
(72) Erfinder:  
**Hetzler, Jochen, 73434 Aalen, DE; Wolf, Alexander, 73457 Essingen, DE**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

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

(54) Bezeichnung: **Computer-generiertes Hologramm (CGH), sowie Verfahren zur Charakterisierung der Oberflächenform eines optischen Elements**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Computer-generiertes Hologramm (CGH) sowie ein Verfahren zur Charakterisierung der Oberflächenform eines optischen Elements. Gemäß einem Aspekt weist ein CGH einen wenigstens einen Nutzstruktur (A) aufweisenden ersten Bereich (121, 321, 421) und einen von diesem ersten Bereich (121, 321, 421) räumlich separierten zweiten Bereich (122, 322, 422) auf, wobei dieser zweite Bereich einen Kontrollbereich zur Detektion einer sich auf dem CGH (120, 320, 420, 520) ausbildenden Kontamination bildet.



**Beschreibung**

## HINTERGRUND DER ERFINDUNG

## Gebiet der Erfindung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Computer-generiertes Hologramm (CGH) sowie ein Verfahren zur Charakterisierung der Oberflächenform eines optischen Elements.

## Stand der Technik

**[0002]** Mikrolithographie wird zur Herstellung mikrostrukturierter Bauelemente, wie beispielsweise integrierter Schaltkreise oder LCD's, angewendet. Der Mikrolithographieprozess wird in einer sogenannten Projektionsbelichtungsanlage durchgeführt, welche eine Beleuchtungseinrichtung und ein Projektionsobjektiv aufweist. Das Bild einer mittels der Beleuchtungseinrichtung beleuchteten Maske (= Retikel) wird hierbei mittels des Projektionsobjektivs auf ein mit einer lichtempfindlichen Schicht (Photoresist) beschichtetes und in der Bildebene des Projektionsobjektivs angeordnetes Substrat (z.B. ein Siliziumwafer) projiziert, um die Maskenstruktur auf die lichtempfindliche Beschichtung des Substrats zu übertragen.

**[0003]** In für den EUV-Bereich ausgelegten Projektionsobjektiven, d.h. bei Wellenlängen von z.B. etwa 13 nm oder etwa 7 nm, werden mangels Verfügbarkeit geeigneter lichtdurchlässiger refraktiver Materialien Spiegel als optische Komponenten für den Abbildungsprozess verwendet. Typische für EUV ausgelegte Projektionsobjektive, wie z.B. aus US 2016/0085061 A1 bekannt, können beispielsweise eine bildseitige numerische Apertur (NA) im Bereich von  $NA = 0.55$  aufweisen und bilden ein (z.B. ringsegmentförmiges) Objektfeld in die Bildebene bzw. Waferebene ab.

**[0004]** Mit der Erhöhung der bildseitigen numerischen Apertur (NA) geht typischerweise eine Vergrößerung der erforderlichen Spiegelflächen der in der Projektionsbelichtungsanlage eingesetzten Spiegel einher. Dies hat wiederum zur Folge, dass neben der Fertigung auch die Prüfung der Oberflächenform der Spiegel eine anspruchsvolle Herausforderung darstellt.

**[0005]** Hierbei kommen zur hochgenauen Prüfung der Spiegel insbesondere interferometrische Messverfahren unter Verwendung Computer-generierter Hologramme (CGH) zum Einsatz. Dabei ist es u.a. auch bekannt, in ein- und dasselbe CGH zusätzlich zu der für die eigentliche Prüfung benötigten Funktionalität (d.h. der entsprechend der Spiegelform ausgelegten CGH-Struktur zur Formung der mathematisch der Prüflingsform entsprechenden Wellenfront) we-

nigstens eine weitere „Kalibrierfunktionalität“ zur Bereitstellung einer zur Kalibrierung bzw. Fehlerkorrektur dienenden Referenzwellenfront einzukodieren.

**[0006]** Fig. 6 zeigt eine schematische Darstellung zur Erläuterung des möglichen Aufbaus einer interferometrischen Prüfanordnung zur Prüfung eines Spiegels.

**[0007]** Gemäß Fig. 6 tritt die von einer (nicht dargestellten) Lichtquelle erzeugte und aus der Austrittsfläche eines Lichtwellenleiters 601 austretende Beleuchtungsstrahlung als Eingangswelle 605 mit einer sphärischen Wellenfront aus, durchläuft einen Strahlteiler 610 und trifft anschließend auf ein komplex kodiertes CGH 620. Das CGH 620 erzeugt in Transmission im Beispiel gemäß seiner komplexen Kodierung aus der Eingangswelle 605 insgesamt vier Ausgangswellen, von denen eine Ausgangswelle als Prüfwelle auf die Oberfläche des Testobjekts in Form eines Spiegels 640 mit einer an die Sollform der Oberfläche dieses Spiegels 640 angepassten Wellenfront auftrifft. Des Weiteren erzeugt das CGH 620 aus der Eingangswelle 605 in Transmission drei weitere Ausgangswellen, von denen jede auf jeweils ein weiteres reflektives optisches Element 631, 632 bzw. 633 trifft. Mit „635“ ist ein Shutter bezeichnet. Das CGH 620 dient auch zur Überlagerung der vom Testobjekt bzw. Spiegel 640 reflektierten Prüfwelle sowie der von den Elementen 631-633 reflektierten Referenzwellen, welche als konvergente Strahlen wieder auf den Strahlteiler 610 treffen und von diesem in Richtung einer als CCD-Kamera ausgelegten Interferometerkamera 660 reflektiert werden, wobei sie ein Okular 650 durchlaufen. Die Interferometerkamera 660 erfasst ein durch die interferierenden Wellen erzeugtes Interferogramm, aus welchem über eine (nicht dargestellte) Auswerteeinrichtung die tatsächliche Form der optischen Oberfläche des Testobjekts 640 bestimmt wird.

**[0008]** Dabei ist eine Kenntnis des Gitterprofils des bei der interferometrischen Messung eingesetzten CGH sowie die Vorhersage etwaiger Änderungen dieses Gitterprofils erforderlich, um bei Feststellung einer Phasenabweichung in dem interferometrischen Messaufbau eindeutig unterscheiden zu können, ob diese Phasenabweichung auf vorhandene Fehler auf dem CGH oder auf der zu messenden Fläche zurückzuführen ist.

**[0009]** Hierbei tritt in der Praxis das Problem auf, dass Änderungen des Gitterprofils auch durch Kontamination mit z.B. Kohlenwasserstoffen hervorgerufen werden können, wobei etwa in Vakuumanlagen Kontaminationen beispielsweise durch Fette vorhanden sein können. Bei Messungen in Atmosphäre kann sich an der Oberfläche des CGH z.B. ein Wasserfilm mit variierender Dicke ausbilden.

**[0010]** Fig. 7 zeigt in lediglich schematischer und stark vereinfachter Darstellung ein CGH 720 mit einer auf einer Gitterstruktur 821 befindlichen Kontaminationsschicht 722. Die in Fig. 7 angedeutete homogene Flächenkontamination führt auch im Falle einer weitgehenden Übereinstimmung der Brechzahlen von Kontaminationsschicht 722 einerseits und Gitterstruktur 721 bzw. CGH-Substrat andererseits zu einer Änderung des optisch wirksamen Gitterprofils infolge effektiver Verschmälerung der in der Gitterstruktur 721 befindlichen Täler.

**[0011]** Die hochgenaue Ermittlung des Gitterprofils des CGH stellt eine zunehmend anspruchsvolle Herausforderung dar, da in gegenwärtigen und künftigen Messanordnungen eine Reproduzierbarkeit in der Größenordnung von 0.1nm über einen Zeitraum von 1 Jahr (entsprechend der maximal zulässigen Änderung des Messergebnisses bei identischem Prüfling) gefordert sein kann. Das Problem einer hochgenauen Charakterisierung des CGH-Gitterprofils wird dadurch erschwert, dass eine vorübergehende Entnahme des CGH aus der interferometrischen Prüfanordnung im Hinblick auf die zu gewährleistende hohe Reproduzierbarkeit sowie auch aus Zeitgründen nicht wünschenswert ist.

**[0012]** Zum Stand der Technik wird lediglich beispielhaft auf DE 10 2015 209 490 A1, DE 10 2012 217 800 A1 sowie US 2006/0274325 verwiesen.

#### ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

**[0013]** Vor dem obigen Hintergrund ist es eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Computer-generiertes Hologramm (CGH) sowie ein Verfahren zur Charakterisierung der Oberflächenform eines optischen Elements bereitzustellen, welche in einer interferometrischen Prüfanordnung eine erhöhte Messgenauigkeit unter zumindest teilweiser Vermeidung der vorstehend beschriebenen Probleme ermöglichen.

**[0014]** Diese Aufgabe wird durch das Computer-generierte Hologramm (CGH) gemäß den Merkmalen des unabhängigen Patentanspruchs 1 bzw. das Verfahren gemäß den Merkmalen des nebengeordneten Patentanspruchs 11 gelöst.

**[0015]** Gemäß einem Aspekt der Erfindung weist ein Computer-generiertes Hologramm (CGH), insbesondere zur Verwendung in einer interferometrischen Prüfanordnung zum Prüfen eines optischen Elements einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage auf:

- einen wenigstens eine Nutzstruktur aufweisenden ersten Bereich; und
- einen von diesem ersten Bereich räumlich separierten zweiten Bereich;
- wobei dieser zweite Bereich einen Kontrollbereich zur Detektion einer sich auf dem CGH ausbildenden Kontamination bildet.

**[0016]** Gemäß einer Ausführungsform weist der zweite Bereich zwei räumlich voneinander separierte Substrukturen auf, wobei sich diese Substrukturen hinsichtlich der Kontaminationsabhängigkeit ihrer Phasenwirkung auf im Betrieb auf das CGH auftretendes Licht voneinander unterscheiden.

**[0017]** Gemäß einer Ausführungsform unterscheiden sich diese Substrukturen hinsichtlich des Flankenanteils, welcher für jede der Substrukturen jeweils als Quotient aus der mit einem Flankenwinkel von wenigstens 80° strukturbelegten Fläche und der gesamten strukturbelegten Fläche definiert ist, um wenigstens 30%, bezogen auf den jeweils größeren Wert, voneinander.

**[0018]** Die Erfindung betrifft weiter ein computer-generiertes Hologramm (CGH), insbesondere zur Verwendung in einer interferometrischen Prüfanordnung zum Prüfen eines optischen Elements einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage, mit

- einem wenigstens eine Nutzstruktur aufweisenden ersten Bereich; und
- einem von diesem ersten Bereich räumlich separierten zweiten Bereich;
- wobei der zweite Bereich zwei räumlich voneinander separierte Substrukturen aufweist, wobei sich diese Substrukturen hinsichtlich des Flankenanteils, welcher für jede der Substrukturen jeweils als Quotient aus der mit einem Flankenwinkel von wenigstens 80° strukturbelegten Fläche und der gesamten strukturbelegten Fläche definiert ist, um wenigstens 30%, bezogen auf den jeweils größeren Wert, voneinander unterscheiden.

**[0019]** Der Erfindung liegt insbesondere das Konzept zugrunde, zur Detektion und Überwachung einer auf einem CGH befindlichen Kontamination einen von der eigentlichen Nutzstruktur räumlich separierten Kontrollbereich bereitzustellen, welcher seinerseits über die in der interferometrischen Prüfanordnung durchgeführte Wellenfrontmessung einen Rückschluss auf die besagte Kontamination erlaubt.

**[0020]** Hierbei geht die Erfindung von der Überlegung aus, dass eine Sensitivität des CGH bzw. der durch das CGH in der Prüfanordnung gelieferten Messergebnisse im Hinblick auf Kontaminationen dadurch variiert werden kann, dass ausgehend von der

vorstehend diskutierten schematischen Darstellung von **Fig. 7** der Flankenanteil bzw. die zwischen Bergen und Tälern der Gitterstruktur befindliche und als Angriffsfläche für die Kontamination wirkende Flankenfläche variiert wird. Indem nun in besagtem Kontrollbereich auf einem erfindungsgemäßen CGH zwei Bereiche bzw. Substrukturen bereitgestellt werden, welche sich hinsichtlich dieser Flankenfläche voneinander unterscheiden, wird erreicht, dass diese Bereiche auf eine sich auf dem CGH ausbildende Kontamination unterschiedlich reagieren und über die dementsprechend veränderte Phasenwirkung die eindeutige Detektion der betreffenden Kontamination ermöglichen.

**[0021]** Konkret macht sich die Erfindung den Umstand zu Nutze, dass ein im Kontrollbereich befindlicher Bereich in Form einer vergleichsweise feineren Substruktur mit insgesamt größerer Gesamtfläche der zwischen Bergen und Tälern befindlichen Flankenbereiche aufgrund der effektiv größeren Angriffsfläche für Kontamination eine vergleichsweise stärkere Sensitivität der Phasenwirkung auf Kontamination besitzt als ein zweiter Bereich mit vergleichsweise größerer Substruktur.

**[0022]** Hierbei ist zu beachten, dass ungeachtet der im Kontrollbereich des erfindungsgemäßen CGH vorhandenen unterschiedlichen Substrukturen insofern eine „übereinstimmende Grundfunktionalität“ für den Kontrollbereich bzw. die unterschiedlichen Substrukturen vorliegt, als gewährleistet bleibt, dass auch die von dem Kontrollbereich bzw. besagten Substrukturen ausgehenden Wellen im Interferometeraufbau erfasst und vermessen werden. Diese „übereinstimmende Grundfunktionalität“ kann in Ausführungsformen der Erfindung insbesondere dadurch erreicht werden, dass eine Übereinstimmung in der Gitterperiode oder in einer der mehrfach kodierten Gitterperioden vorliegt. In weiteren Ausführungsformen kann besagte „übereinstimmende Grundfunktionalität“ auch dadurch erreicht werden, dass die im Kontrollbereich vorhandene, die Substrukturen umfassende Struktur so ausgelegt ist, dass zumindest ein Teil des einfallenden Lichts (entsprechend der Littrow-Bedingung) in die Einfallrichtung zurückgelenkt wird.

**[0023]** Mit anderen Worten bleibt auch für die erfindungsgemäß in einem separaten Kontrollbereich vorhandenen, unterschiedlich kontaminationssensitiven Substrukturen die prinzipielle Hauptfunktionalität des CGH bestehen, da diese Substrukturen lediglich den Zweck haben, unterschiedlich auf Kontamination zu reagieren und eine diesbezügliche Berücksichtigung in den letztlich in der interferometrischen Prüfanordnung erhaltenen Messergebnissen zu ermöglichen.

**[0024]** Infolge der Existenz von wenigstens zwei unterschiedlich kontaminationssensitiven Bereichen auf

dem erfindungsgemäßen CGH ist es dabei auch möglich, kontaminationsbedingte Änderungen des Messsignals von Signaländerungen, welche z.B. aus Lagetoleranzen der unterschiedlichen optischen Elemente resultieren können, zuverlässig zu unterscheiden.

**[0025]** Gemäß einer Ausführungsform gehen die Substrukturen hinsichtlich des Flankenanteils sukzessive ineinander über.

**[0026]** Gemäß einer Ausführungsform ist das Computer-generierte Hologramm (CGH) dazu ausgelegt, zusätzlich zu einer Prüfwelle eine Referenzwelle zur interferometrischen Überlagerung mit der Prüfwelle nach Reflexion der Referenzwelle an einem Referenzspiegel zu erzeugen.

**[0027]** Gemäß einer Ausführungsform weist das Computer-generierte Hologramm (CGH) zur Bereitstellung der Referenzwelle eine komplexe Kodierung auf.

**[0028]** Gemäß einer Ausführungsform weist der zweite Bereich eine in ihrer Gitterperiode mit der Nutzstruktur übereinstimmende Grundstruktur auf.

**[0029]** Gemäß einer Ausführungsform weist der zweite Bereich eine als Littrow-Gitter ausgestaltete Grundstruktur auf.

**[0030]** Die Erfindung betrifft weiter eine interferometrische Prüfanordnung zum Prüfen eines optischen Elements, insbesondere eines optischen Elements einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage, wobei die Prüfanordnung ein Computer-generiertes Hologramm aufweist und wobei eine Prüfung zumindest einer Teilfläche des optischen Elements durch interferometrische Überlagerung einer von diesem Computer-generierten Hologramm auf das optische Element gelenkten Prüfwelle und einer Referenzwelle durchführbar ist, wobei das Computer-generierte Hologramm gemäß den vorstehend beschriebenen Merkmalen ausgelegt ist.

**[0031]** Die Erfindung betrifft weiter ein Verfahren zur Charakterisierung der Oberflächenform eines optischen Elements, unter Verwendung einer interferometrischen Prüfanordnung, wobei diese Prüfanordnung ein Computer-generiertes Hologramm mit den vorstehend beschriebenen Merkmalen aufweist.

**[0032]** Gemäß einer Ausführungsform weist das Verfahren die Schritte auf:

- Ermitteln eines Modellparameters auf Basis einer anhand des Kontrollbereichs des CGH durchgeführten interferometrischen Messung; und

- Korrigieren von bei interferometrischer Messung anhand des die Nutzstruktur aufweisenden ersten Bereichs des CGH erhaltenen Messergebnissen auf Basis dieses Modellparameters.

**[0033]** Gemäß einer Ausführungsform erfolgt das Ermitteln des Modellparameters auf Basis eines Vergleichs einer für den Kontrollbereich des CGH modellbasiert berechneten Wellenfront mit bei interferometrischer Messung anhand des Kontrollbereichs des CGH in der Prüfanordnung erhaltenen Messergebnissen.

**[0034]** Weitere Ausgestaltungen der Erfindung sind der Beschreibung sowie den Unteransprüchen zu entnehmen.

**[0035]** Die Erfindung wird nachstehend anhand von in den beigefügten Abbildungen dargestellten Ausführungsbeispielen näher erläutert.

#### Figurenliste

**[0036]** Es zeigen:

**Fig. 1-5** schematische Darstellungen zur Erläuterung beispielhafter Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung;

**Fig. 6** eine schematische Darstellung eines möglichen Aufbaus einer interferometrischen Prüfanordnung;

**Fig. 7** eine schematische Darstellung zur Erläuterung eines bei Einsatz eines CGHs in einer interferometrischen Prüfanordnung auftretenden möglichen Problems;

**Fig. 8** eine schematische Darstellung einer für den Betrieb im EUV ausgelegten Projektionsbelichtungsanlage.

#### DETAILLIERTE BESCHREIBUNG BEVORZUGTER AUSFÜHRUNGSFORMEN

**[0037]** **Fig. 8** zeigt zunächst eine schematische Darstellung einer beispielhaften für den Betrieb im EUV ausgelegten Projektionsbelichtungsanlage, welche mit einem erfindungsgemäßen Verfahren prüfbare Spiegel aufweist.

**[0038]** Gemäß **Fig. 8** weist eine Beleuchtungseinrichtung in einer für EUV ausgelegten Projektionsbelichtungsanlage **10** einen Feldfacettenspiegel **3** und einen Pupillenfacettenspiegel **4** auf. Auf den Feldfacettenspiegel **3** wird das Licht einer Lichtquelleneinheit, welche eine Plasmalichtquelle **1** und einen Kollektorspiegel **2** umfasst, gelenkt. Im Lichtweg nach dem Pupillenfacettenspiegel **4** sind ein erster Teleskopspiegel **5** und ein zweiter Teleskopspiegel **6** angeordnet. Im Lichtweg nachfolgend ist ein Umlenkspiegel **7** angeordnet, der die auf ihn treffende Strah-

lung auf ein Objektfeld in der Objektebene eines sechs Spiegel **21-26** umfassenden Projektionsobjektivs lenkt. Am Ort des Objektfeldes ist eine reflektive strukturtragende Maske **31** auf einem Maskentisch **30** angeordnet, die mit Hilfe des Projektionsobjektivs in eine Bildebene abgebildet wird, in welcher sich ein mit einer lichtempfindlichen Schicht (Photoresist) beschichtetes Substrat **41** auf einem Wafertisch **40** befindet.

**[0039]** Bei dem in einer interferometrischen Prüfanordnung (z.B. mit dem anhand von **Fig. 6** bereits beschriebenen Aufbau) und unter Verwendung eines erfindungsgemäßen CGHs geprüften optischen Element kann es sich z.B. um einen beliebigen Spiegel der Projektionsbelichtungsanlage **10** handeln.

**[0040]** Im Weiteren werden Ausführungsformen der Erfindung unter Bezugnahme auf die schematischen Abbildungen in **Fig. 1-5** beschrieben.

**[0041]** **Fig. 1** zeigt eine schematische Darstellung zur Erläuterung des prinzipiellen Aufbaus und der Funktionsweise eines erfindungsgemäßen CGHs **120**.

**[0042]** Das CGH **120** weist, wie in **Fig. 1** in stark vereinfachter Weise dargestellt, zusätzlich zu einem die eigentliche Nutzstruktur **A** zur Erzeugung der Prüfwelle bei der interferometrischen Messung umfassenden ersten Bereich **121** einen hiervon räumlich getrennten zweiten Bereich **122** auf, welcher als Kontrollbereich zur Detektion einer sich auf dem CGH **120** ausbildenden Kontamination dient.

**[0043]** Um die von dem Kontrollbereich **122** in der interferometrischen Prüfanordnung ausgehenden Wellen ebenfalls bei der interferometrischen Messung erfassen zu können, stimmt die Gitterperiode der im Kontrollbereich **122** befindlichen Gitterstruktur (Grundstruktur **B**) mit derjenigen der Nutzstruktur **A** überein. Um jedoch erfindungsgemäß innerhalb des Kontrollbereichs **122** eine kontaminationssensitive Funktionalität bereitzustellen, sind in besagtem Kontrollbereich **122** wie im Weiteren beschrieben wenigstens zwei voneinander verschiedene Substrukturen **B1** und **B2** vorhanden.

**[0044]** Die erfindungswesentliche Wirkung dieser Substrukturen **B1** und **B2** ist dabei, dass infolge der voneinander verschiedenen Sensitivitäten der Substrukturen **B1** und **B2** gegenüber einer sich auf dem CGH **120** bzw. dem Kontrollbereich **122** ausbildenden Kontamination eine eindeutige (z.B. von Lage-toleranzen der optischen Elemente unterscheidbare) Detektion der betreffenden Kontamination ermöglicht wird.

**[0045]** Mit anderen Worten reagieren die Bereiche **B1** und **B2** unterschiedlich auf Kontamination, was

sich im schematisch dargestellten Ausführungsbeispiel von **Fig. 1** dadurch äußert, dass die vergleichsweise feinere Substruktur **B2** im Vergleich zur Substruktur **B1** eine effektiv größere Oberfläche bildet und damit eine entsprechend größere Angriffsfläche für Kontamination darstellt mit der Folge, dass auch die Abhängigkeit der Phasenwirkung von der Kontamination bei der eigentlichen interferometrischen Messung (wie in dem im unteren Abschnitt von **Fig. 1** dargestellten Diagramm erkennbar) unterschiedlich ist.

**[0046]** Als quantitatives Kriterium zur Beschreibung der vorstehend genannten Oberflächenvariation zwischen den Substrukturen **B1** und **B2** kann insbesondere die für die betreffenden Bereiche gebildete effektive Flankenfläche herangezogen werden, wobei wiederum als „Flanke“ diejenigen Wandungsbereiche mit einer Steigung größer als  $80^\circ$  angesehen werden können. Dabei ändert sich die so definierte Flankenfläche zwischen den Substrukturen **B1** und **B2** vorzugsweise um wenigstens 30% (bezogen auf den jeweils größeren Wert).

**[0047]** **Fig. 2** zeigt ein Flussdiagramm zur Erläuterung einer möglichen Vorgehensweise zur Korrektur der bei der interferometrischen Messung anhand der im ersten Bereich **121** des CGHs **120** befindlichen Nutzstruktur **A** erhaltenen Messergebnisse mit Hilfe der mit Hilfe des Kontrollbereichs **122** bzw. der dort befindlichen Substrukturen **B1**, **B2** erfolgten Kontaminationsdetektion.

**[0048]** Gemäß **Fig. 2** erfolgt nach interferometrischer Messung anhand der eigentlichen Nutzstruktur **A** (Schritt **S210**) eine Korrektur der erhaltenen Messergebnisse im Schritt **S270** auf Basis eines im Schritt **S260** bestimmten Modellparameters **P**, bei welchem es sich insbesondere um die Schichtdicke  $h$  der Kontamination handeln kann. Die Bestimmung des Modellparameters **P** erfolgt wiederum basierend auf der anhand des Kontrollbereichs bzw. der dort befindlichen Substrukturen **B1**, **B2** durchgeführten interferometrischen Messung (Schritt **S220**), wobei die hieraus erhaltenen Messergebnisse im Schritt **S230** mit einer im Schritt **S240** modellbasiert berechneten Wellenfront für Bereich **B** verglichen werden. Der Modellparameter **P** (**S260**) und die modellbasiert berechnete Wellenfront für den Bereich **A** (**S250**) liefern die Korrektur der Messergebnisse im Schritt **S270**.

**[0049]** **Fig. 3** und **Fig. 4** zeigen beispielhafte mögliche Konfigurationen einer interferometrischen Messanordnung unter Einsatz eines erfindungsgemäßen (jeweils in **Fig. 3b** und **Fig. 4b** schematisch dargestellten und mit „**320**“ bzw. „**420**“ bezeichneten) CGH.

**[0050]** **Fig. 3a** zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Fizeau-Interferometers. Dabei tritt die von einer (nicht dargestellten) Lichtquelle erzeugte und aus der Aus-

trittsfläche eines Lichtwellenleiters **301** austretende Beleuchtungsstrahlung als Eingangswelle **305** durch einen Strahlteiler **310** und durchläuft einen Kollimator **335** sowie eine Fizeau-Platte **325**, woraufhin die Beleuchtungsstrahlung auf ein erfindungsgemäßes CGH **320** auftrifft. Das CGH **320** erzeugt über seine in einem ersten Bereich befindliche Nutzstruktur **A** eine Prüfwelle mit an die Sollform der Oberfläche des Prüflings **340** angepasster Wellenfront, wohingegen ein die Substrukturen **B1**, **B2** aufweisender zweiter (Kontroll-) Bereich **322** des CGHs **320** in Littrow-Reflexion verwendet wird. Das an diesem Kontrollbereich **322** bzw. Littrow-Gitter auftreffende Licht wird somit in sich zurückreflektiert und interferiert mit dem an der Fizeau-Platte **325** reflektierten Licht mit der Folge, dass nach Reflexion an dem Strahlteiler **310** anhand der über ein Okular **350** zur Interferometerkamera **360** gelangenden Strahlung eine Phasenbestimmung sowohl für die im Kontrollbereich des CGHs befindlichen Substrukturen als auch für die eigentliche Nutzstruktur des CGHs **320** erfolgen kann.

**[0051]** Anhand der Substrukturen **B1**, **B2** wird wiederum wie vorstehend unter Bezugnahme auf **Fig. 1** und **Fig. 2** beschrieben eine eindeutige Detektion der Kontamination vorgenommen und zur Korrektur der anhand der Nutzstruktur **A** erzielten Messergebnisse verwendet. Gemäß **Fig. 3** erzeugt die Nutzstruktur **A** nur eine Welle in Transmission und der die Substrukturen **B1**, **B2** umfassende Bereich nur eine Welle in Reflexion. Jedoch bleibt gewährleistet, dass auch die von dem Kontrollbereich bzw. den Substrukturen **B1**, **B2** ausgehenden Wellen im Interferometeraufbau erfasst und vermessen werden

**[0052]** **Fig. 4a** zeigt eine weitere mögliche Konfiguration eines interferometrischen Messaufbaus, wobei zu **Fig. 3a** analoge bzw. im Wesentlichen funktionsgleiche Komponenten mit um „100“ erhöhten Bezugsziffern bezeichnet sind.

**[0053]** Im Unterschied zu **Fig. 3a** wird bei dem Messaufbau von **Fig. 4a** der Kontrollbereich **422** auf dem erfindungsgemäßen CGH **420** nicht nur in (Littrow-) Reflexion sondern auch in Transmission bzw. zur Beugung in Richtung eines Referenzspiegels **431** verwendet. Das an den Substrukturen **B1**, **B2** des Kontrollbereichs des CGHs **420** reflektierte Licht interferiert somit mit Licht, welches in zweifacher Transmission durch diese Substrukturen **B1**, **B2** gebeugt und am Referenzspiegel **431** reflektiert wurde. Zur Erzeugung der Referenzwelle ist die auf dem CGH **420** befindliche Gitterstruktur (insoweit analog zu der zuvor anhand von **Fig. 6** beschriebenen herkömmlichen Konfiguration) komplex kodiert, so dass im Unterschied zu der Ausführungsform von **Fig. 3a** die erfindungsgemäßen Substrukturen **B1** und **B2** auf einem im Beispiel von **Fig. 4a-4b** zweifach komplex kodierten Trägergitter ausgebildet sind.

**[0054]** Fig. 5a-5b zeigen schematische Darstellungen zur Veranschaulichung eines konkreten Ausführungsbeispiels eines erfindungsgemäßen CGHs 520. Dabei entspricht Fig. 5a im oberen Teil einem vergrößerten Ausschnitt aus Fig. 4a und zeigt im mittleren Teil zwei unterschiedliche, voneinander entfernte Bereiche bzw. Substrukturen eines Kontrollbereichs 522 auf dem CGH 520. Die komplexe Kodierung umfasst zwei Grundgitter mit Gitterperioden von 478 Linien/mm bzw. 1373 Linien/mm, wobei unter Ausnutzung dieser komplexen Kodierung eine Littrow-Reflexion bei 478 Linien/mm und einer zweifache Transmission bei 1373 Linien/mm erfolgt. Zur Kontaminationsdetektion erfolgt auf diesem über den gesamten Kontrollbereich des CGH 520 komplex kodierten Grundgitter die Überlagerung der erfindungsgemäßen Substrukturen als zusätzliche Funktionalität, was vorliegend durch Überlagerung eines dritten Gitters mit einer Periode von 547 Linien/mm bzw. 774 Linien/mm realisiert ist. Wie im mittleren Teil von Fig. 5a angedeutet ist die rechts dargestellte Substruktur (entsprechend der Periode von 774 Linien/mm) gegenüber der links dargestellten Substruktur (entsprechend der Periode von 547 Linien/mm) vergleichsweise feiner und stellt eine effektiv größere Oberfläche als Angriffsfläche für eine Kontamination bereit.

**[0055]** Eine quantitative Betrachtung ausgehend von der schematischen Darstellung in Fig. 5b zeigt, dass anhand des erfindungsgemäßen Konzepts auch vergleichsweise geringe Kontaminationen bzw. Kontaminationsschichtdicken detektierbar sind. Während sich die Füllfaktoränderung berechnet als  $(b_0 - b_1)/p$ , gilt für die Schichtdicke  $d = (b_0 - b_1)/2$ , so dass für die Beziehung zwischen Schichtdicke und Füllfaktoränderung gilt:

$$\text{Schichtdicke} = \text{Füllfaktoränderung} * p/2$$

**[0056]** Eine kontaminationsbedingte Füllfaktoränderung um den Faktor 0.005 entspricht somit einer Kontaminationsschichtdicke von 3nm bei Annahme einer mittleren Gitterperiode von  $p = 1.2\mu\text{m}$ , welches einem Signal in der Größe von 6nm in der interferometrischen Prüfanordnung entspricht.

**[0057]** Wenn die Erfindung auch anhand spezieller Ausführungsformen beschrieben wurde, erschließen sich für den Fachmann zahlreiche Variationen und alternative Ausführungsformen, z.B. durch Kombination und/oder Austausch von Merkmalen einzelner Ausführungsformen. Dementsprechend versteht es sich für den Fachmann, dass derartige Variationen und alternative Ausführungsformen von der vorliegenden Erfindung mit umfasst sind und die Reichweite der Erfindung nur im Sinne der beigefügten Patentansprüche und deren Äquivalente beschränkt ist.

**ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG**

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

**Zitierte Patentliteratur**

- US 2016/0085061 A1 [0003]
- DE 102015209490 A1 [0012]
- DE 102012217800 A1 [0012]
- US 2006/0274325 [0012]



## Patentansprüche

1. Computer-generiertes Hologramm (CGH), insbesondere zur Verwendung in einer interferometrischen Prüfanordnung zum Prüfen eines optischen Elements einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage, mit

- einem wenigstens eine Nutzstruktur (A) aufweisenden ersten Bereich (121, 321, 421); und
- einem von diesem ersten Bereich (121, 321, 421) räumlich separierten zweiten Bereich (122, 322, 422), wobei dieser zweite Bereich einen Kontrollbereich zur Detektion einer sich auf dem CGH (120, 320, 420, 520) ausbildenden Kontamination bildet.

2. Computer-generiertes Hologramm (CGH) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass der zweite Bereich (122, 322, 422) zwei räumlich voneinander separierte Substrukturen (B1, B2) aufweist, wobei sich diese Substrukturen (B1, B2) hinsichtlich der Kontaminationsabhängigkeit ihrer Phasenwirkung auf im Betrieb auf das CGH (120, 320, 420, 520) auftreffendes Licht voneinander unterscheiden.

3. Computer-generiertes Hologramm (CGH) nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass sich diese Substrukturen (B1, B2) hinsichtlich des Flankenanteils, welcher für jede der Substrukturen (B1, B2) jeweils als Quotient aus der mit einem Flankenwinkel von wenigstens 80° strukturbelegten Fläche und der gesamten strukturbelegten Fläche definiert ist, um wenigstens 30%, bezogen auf den jeweils größeren Wert, voneinander unterscheiden.

4. Computer-generiertes Hologramm (CGH), insbesondere zur Verwendung in einer interferometrischen Prüfanordnung zum Prüfen eines optischen Elements einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage, mit

- einem wenigstens eine Nutzstruktur (A) aufweisenden ersten Bereich (121, 321, 421); und
- einem von diesem ersten Bereich (121, 321, 421) räumlich separierten zweiten Bereich (122, 322, 422);
- wobei der zweite Bereich (122, 322, 422) zwei räumlich voneinander separierte Substrukturen (B1, B2) aufweist, wobei sich diese Substrukturen (B1, B2) hinsichtlich des Flankenanteils, welcher für jede der Substrukturen (B1, B2) jeweils als Quotient aus der mit einem Flankenwinkel von wenigstens 80° strukturbelegten Fläche und der gesamten strukturbelegten Fläche definiert ist, um wenigstens 30%, bezogen auf den jeweils größeren Wert, voneinander unterscheiden.

5. Computer-generiertes Hologramm (CGH) nach Anspruch 3 oder 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Substrukturen (B1, B2) hinsichtlich des Flankenanteils sukzessive ineinander übergehen.

6. Computer-generiertes Hologramm (CGH) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass dieses dazu ausgelegt ist, zusätzlich zu einer Prüfwelle eine Referenzwelle zur interferometrischen Überlagerung mit der Prüfwelle nach Reflexion der Referenzwelle an einem Referenzspiegel (431, 531) zu erzeugen.

7. Computer-generiertes Hologramm (CGH) nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass dieses zur Bereitstellung der Referenzwelle eine komplexe Kodierung aufweist.

8. Computer-generiertes Hologramm (CGH) nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass der zweite Bereich (122, 422) eine in ihrer Gitterperiode mit der Nutzstruktur (A) übereinstimmende Grundstruktur (B) aufweist.

9. Computer-generiertes Hologramm (CGH) nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass der zweite Bereich (322) eine als Littrow-Gitter ausgestaltete Grundstruktur aufweist.

10. Interferometrische Prüfanordnung zum Prüfen eines optischen Elements, insbesondere eines optischen Elements einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage, wobei die Prüfanordnung ein Computer-generiertes Hologramm (CGH) aufweist und wobei eine Prüfung zumindest einer Teilfläche des optischen Elements durch interferometrische Überlagerung einer von diesem Computer-generierten Hologramm auf das optische Element gelenkten Prüfwelle und einer Referenzwelle durchführbar ist, wobei das Computer-generierte Hologramm (CGH) nach einem der Ansprüche 1 bis 9 ausgelegt ist.

11. Verfahren zur Charakterisierung der Oberflächenform eines optischen Elements, unter Verwendung einer interferometrischen Prüfanordnung nach Anspruch 10.

12. Verfahren nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass dieses die Schritte aufweist:

- Ermitteln eines Modellparameters auf Basis einer anhand des Kontrollbereichs des CGH (120, 320, 420, 520) durchgeführten interferometrischen Messung; und
- Korrigieren von bei interferometrischer Messung anhand des die Nutzstruktur (A) aufweisenden ersten Bereichs (121, 321, 421) des CGH (120, 320, 420, 520) erhaltenen Messergebnissen auf Basis dieses Modellparameters.

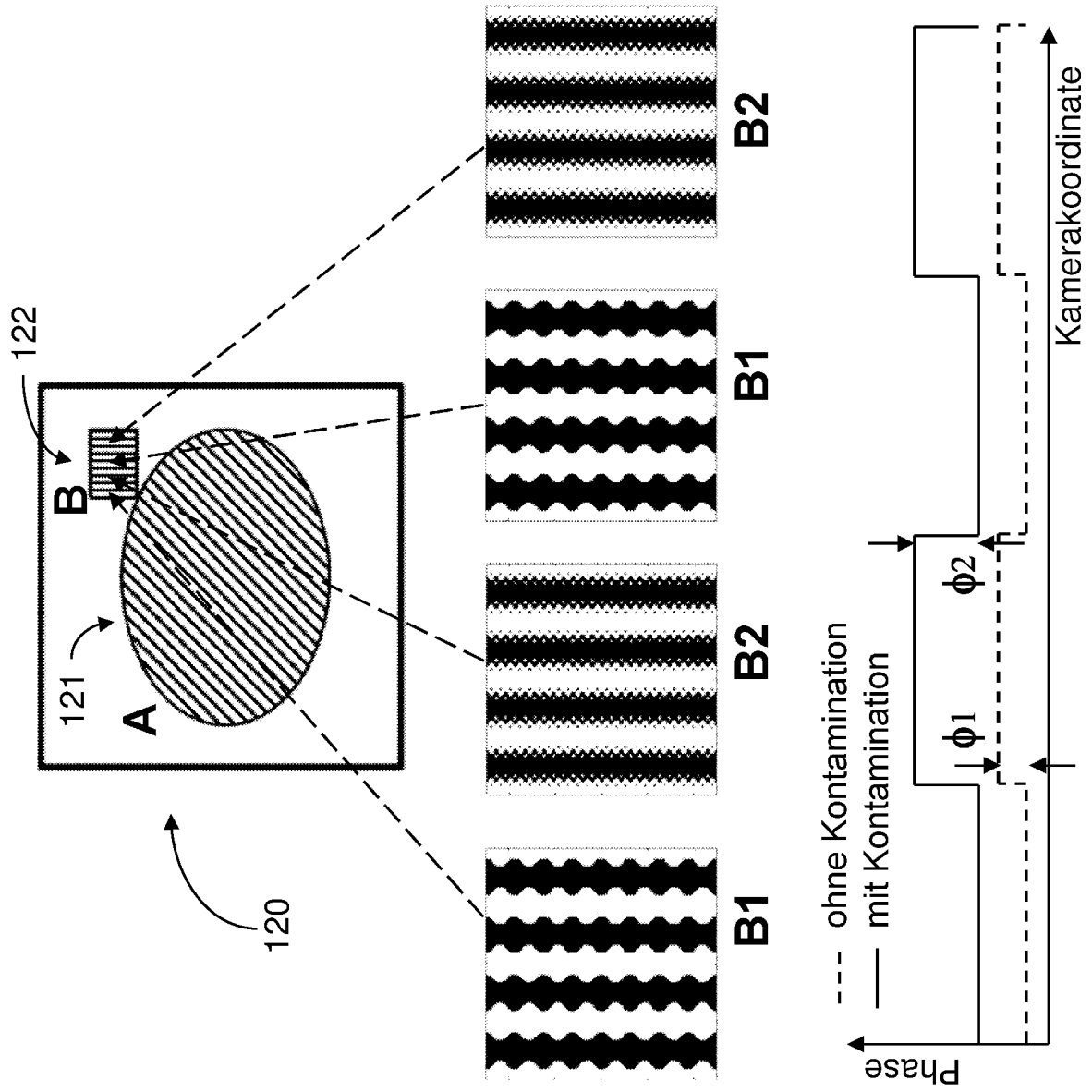
13. Verfahren nach Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Ermitteln des Modellparameters auf Basis eines Vergleichs einer für den Kontrollbereich des CGH (120, 320, 420, 520) modellbasiert berechneten Wellenfront mit bei interferometrischer Messung anhand des Kontrollbereichs des

CGH (120, 320, 420, 520) in der Prüfanordnung erhaltenen Messergebnissen erfolgt.

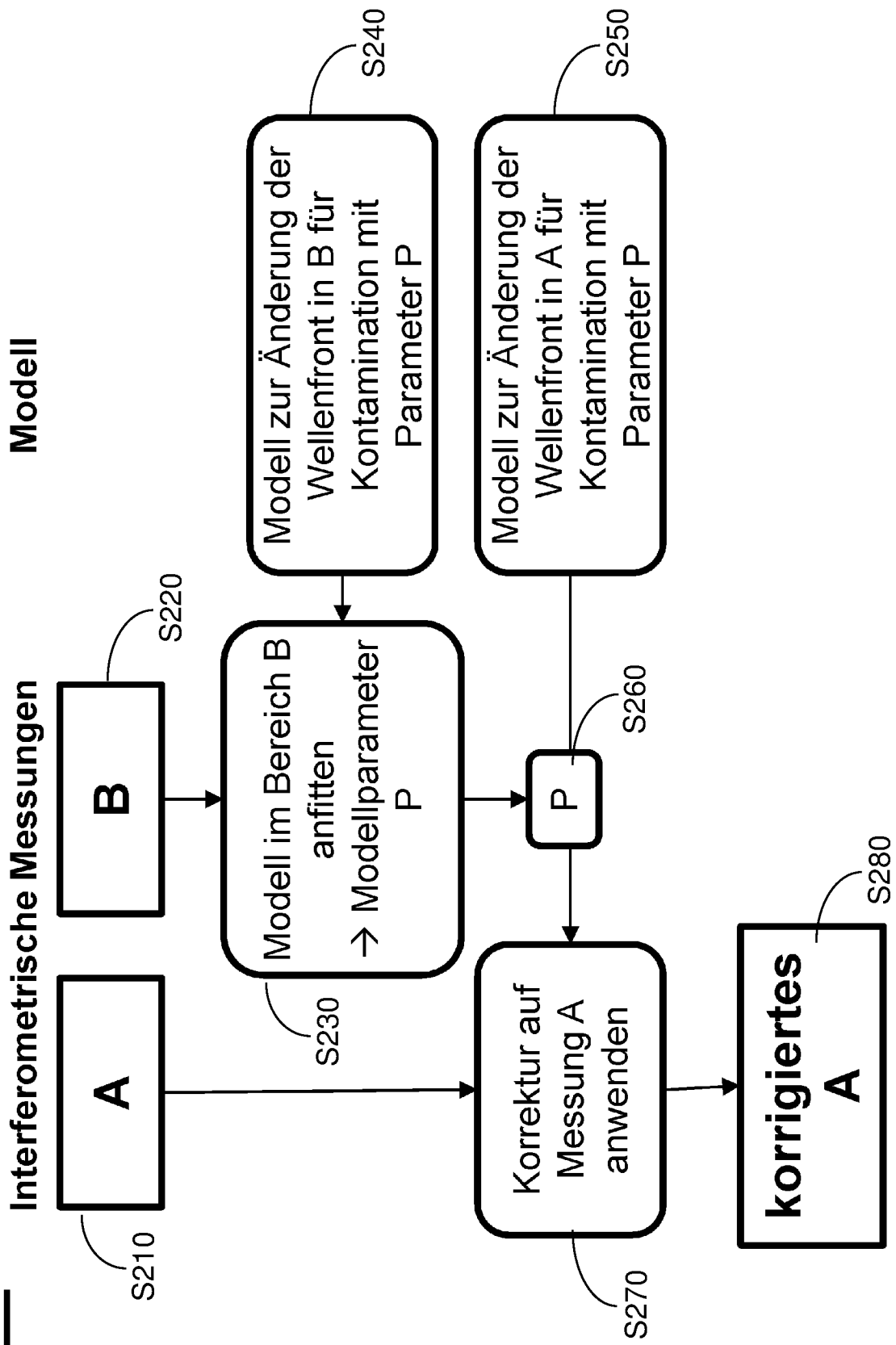
Es folgen 8 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

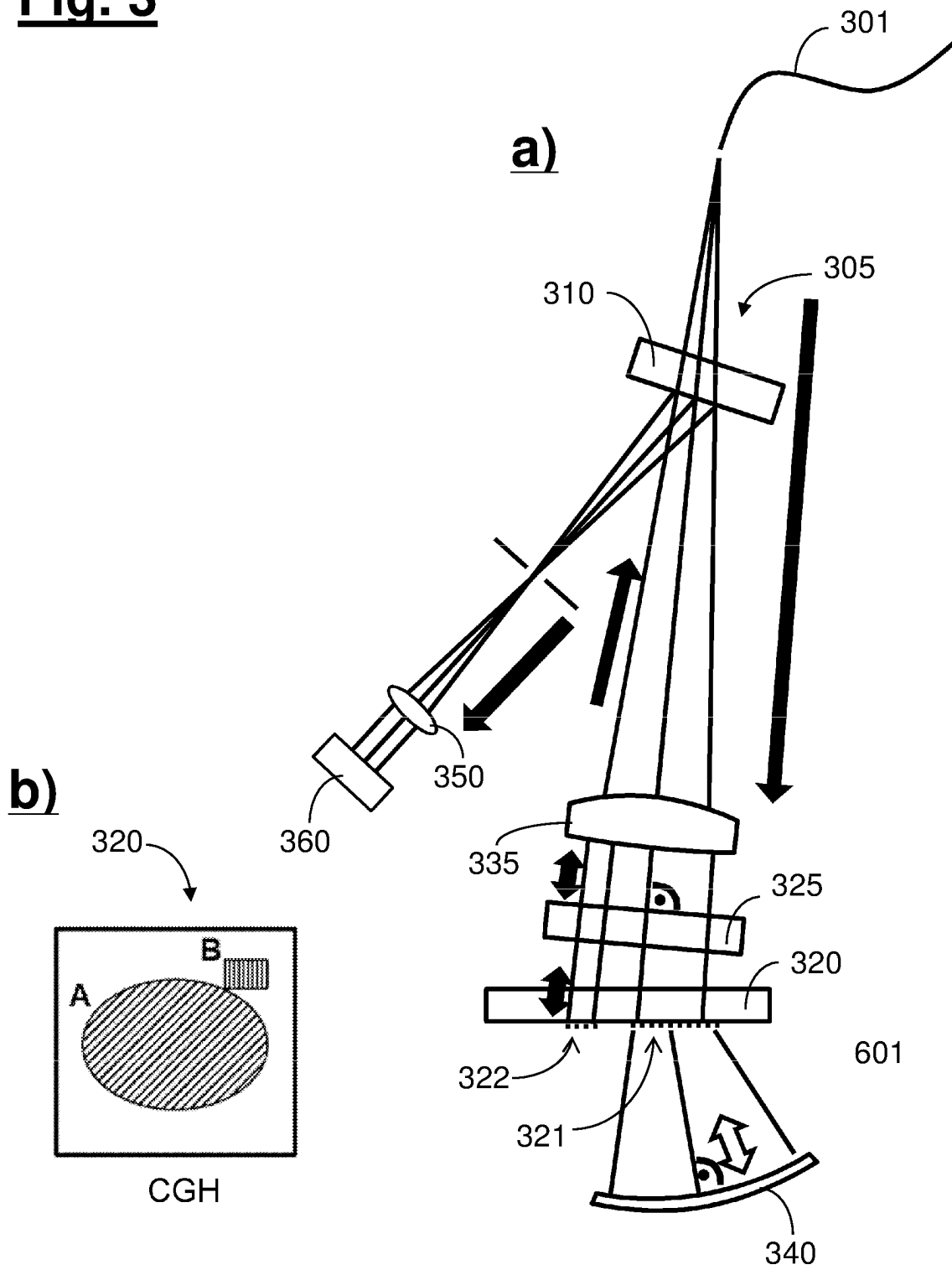
**Fig. 1**



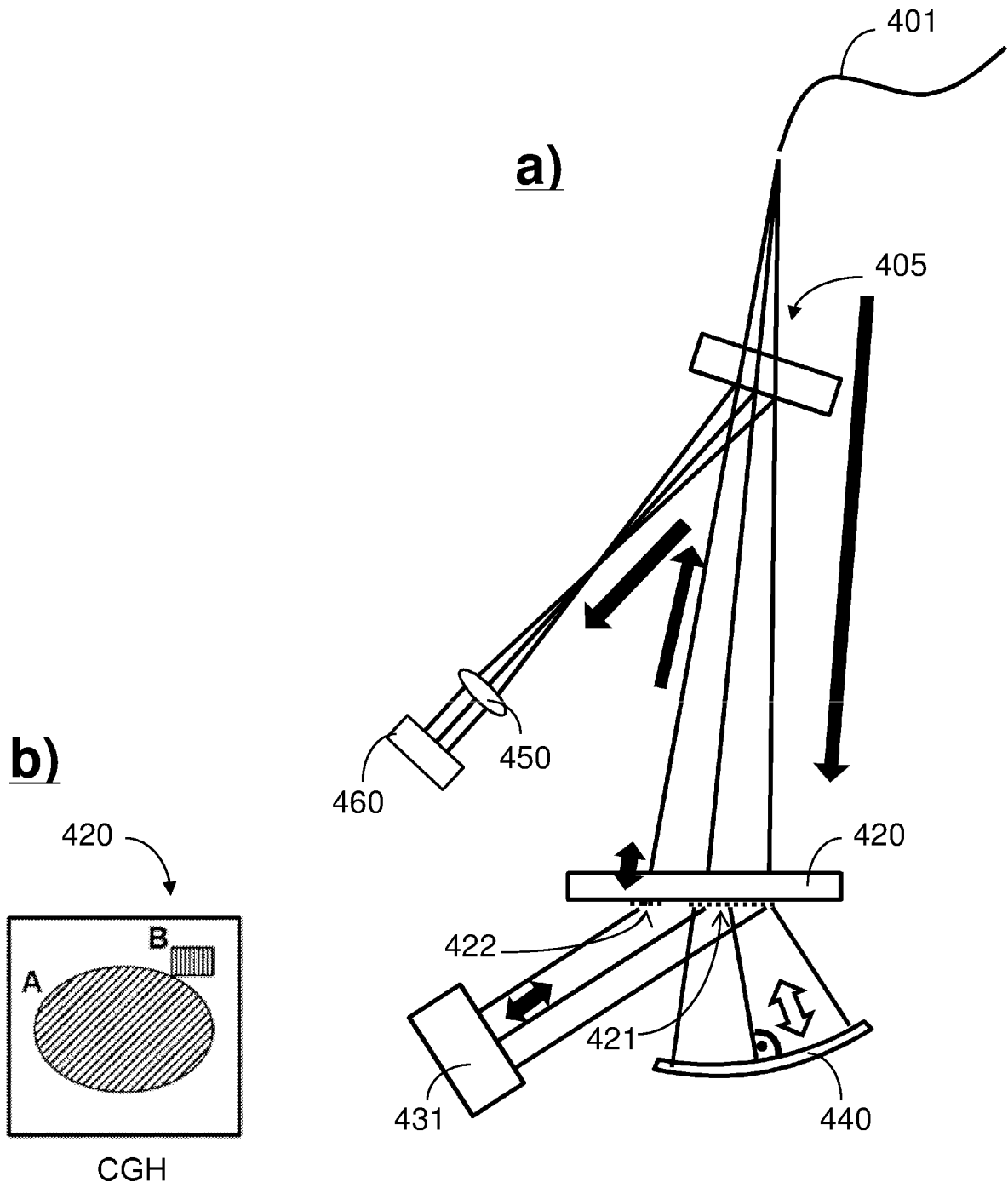
**Fig. 2**



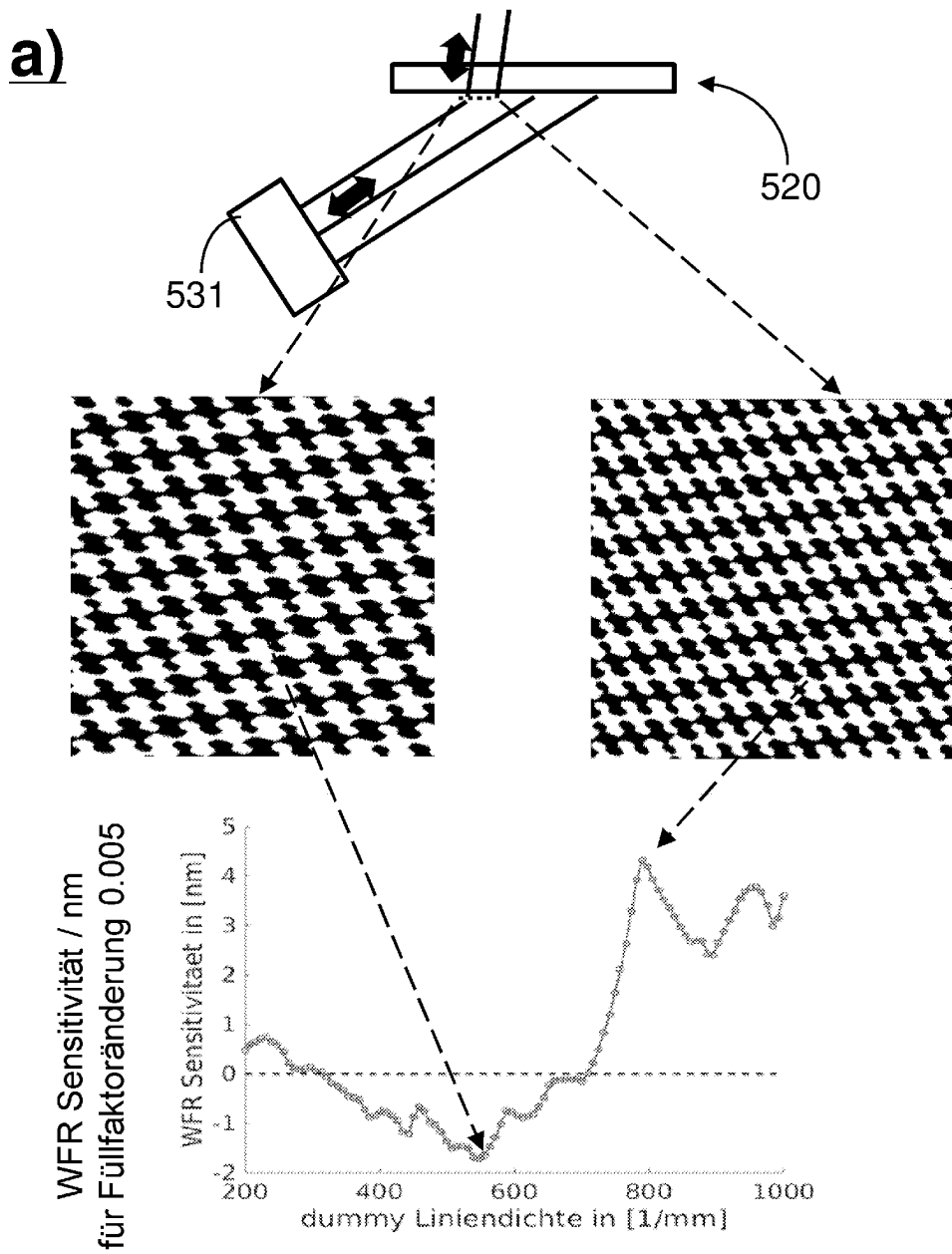
**Fig. 3**



**Fig. 4**



**Fig. 5**

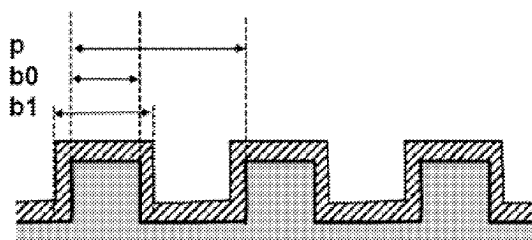


**b)**

$$\text{Füllfaktoränderung} = (b_0 - b_1) / p$$

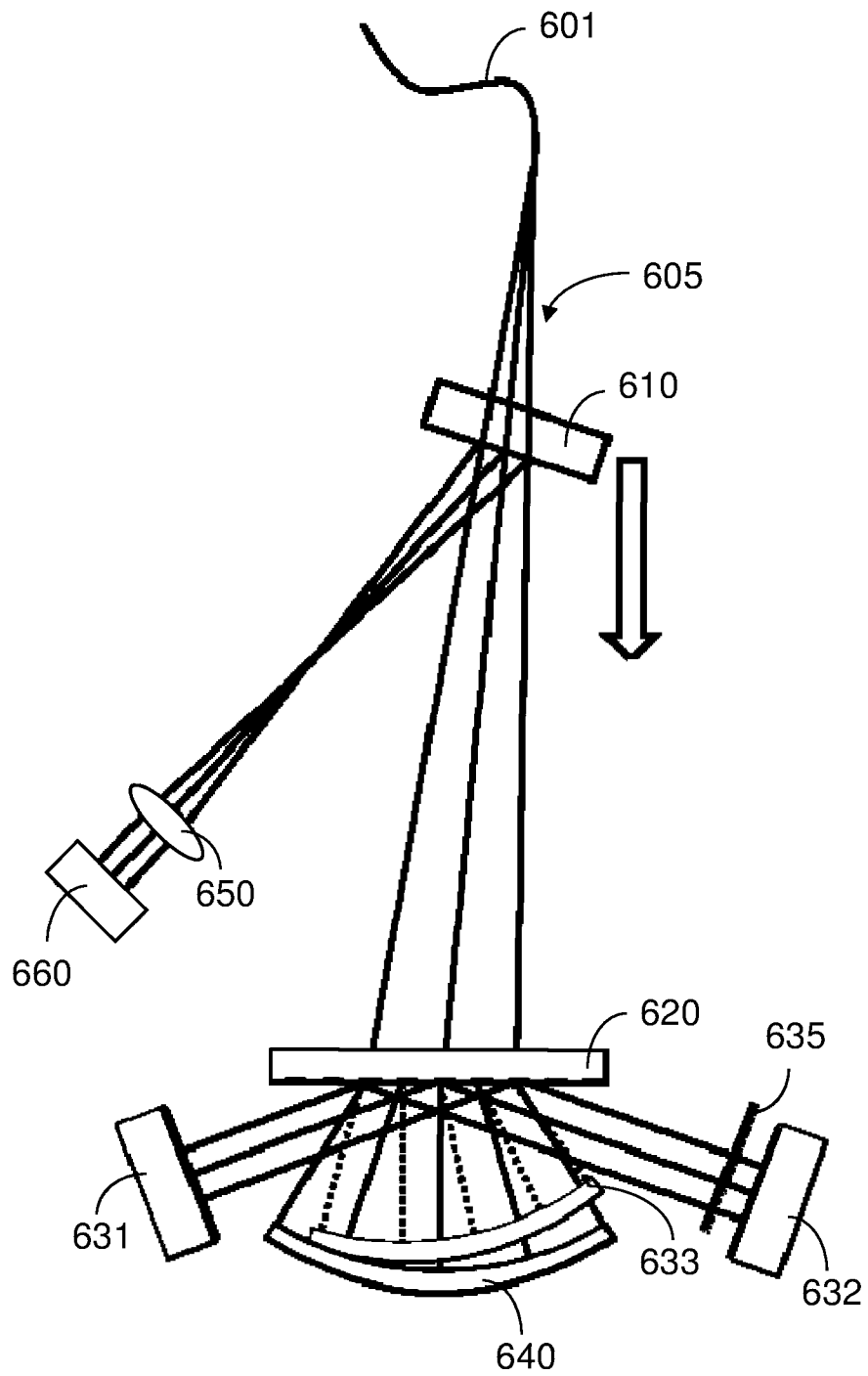
$$\text{Schichtdicke} = (b_0 - b_1) / 2$$

$$\rightarrow \text{Schichtdicke} = \text{Füllfaktoränderung} * p / 2$$



**Fig. 6**

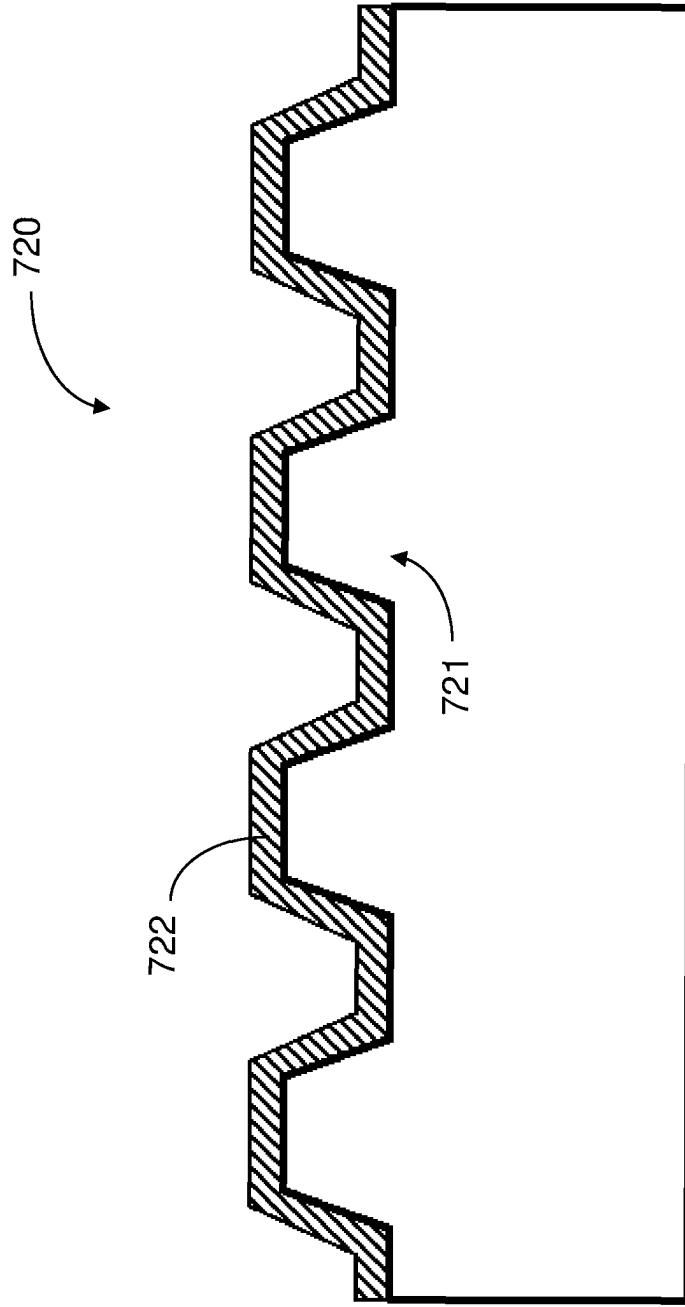
**Stand der Technik**

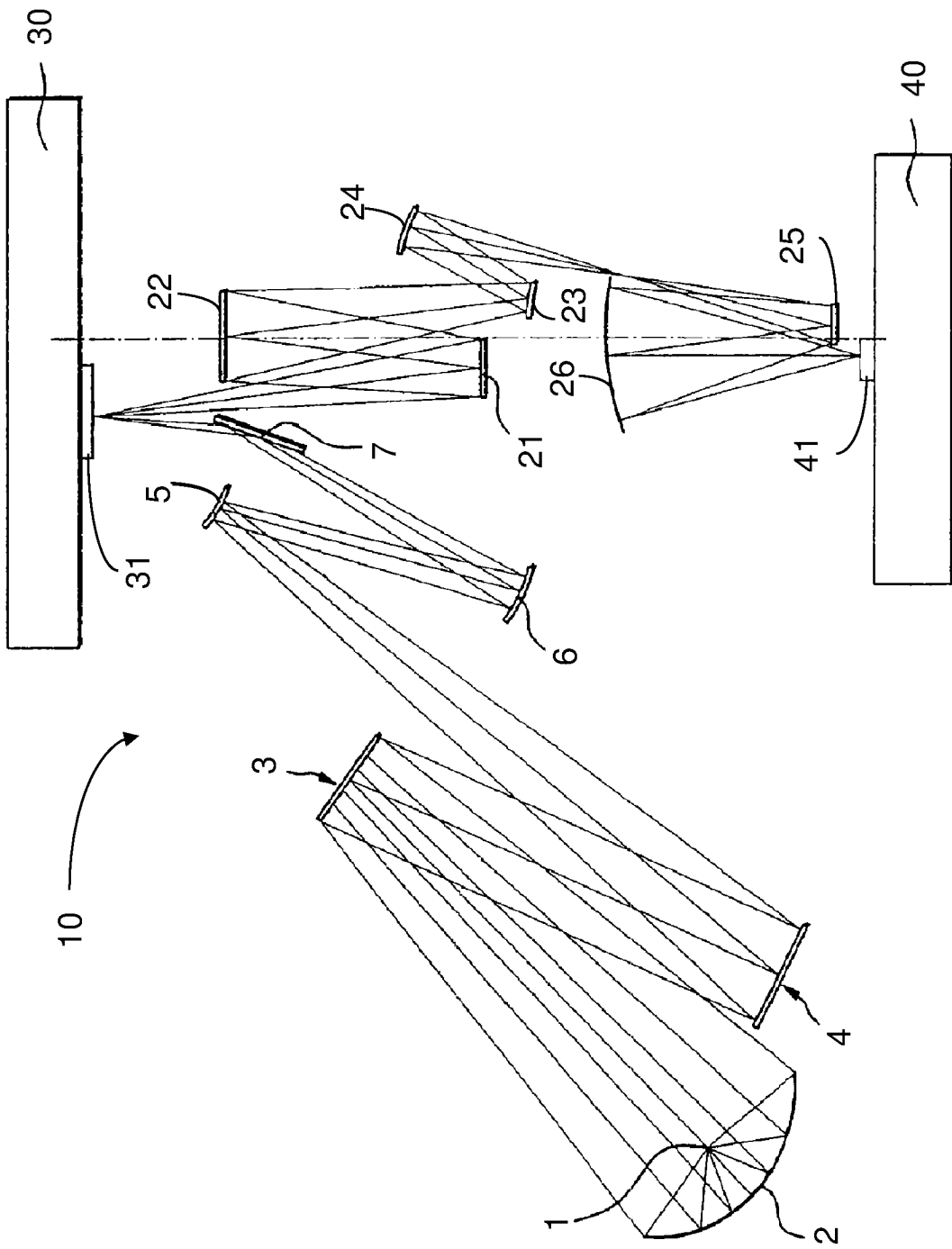




**Fig. 7**

**Stand der Technik**





**Fig. 8**