



(10) **DE 11 2014 005 893 B4** 2023.02.16

(12)

Patentschrift

(21) Deutsches Aktenzeichen: **11 2014 005 893.9**
(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US2014/069348**
(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2015/094818**
(86) PCT-Anmeldetag: **09.12.2014**
(87) PCT-Veröffentlichungstag: **25.06.2015**
(43) Veröffentlichungstag der PCT Anmeldung
in deutscher Übersetzung: **22.09.2016**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **16.02.2023**

(51) Int Cl.: **H01L 21/66** (2006.01)
G03F 1/22 (2012.01)
G03F 1/36 (2012.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(30) Unionspriorität:
61/919,709 **21.12.2013** **US**

(73) Patentinhaber:
KLA-Tencor Corporation, Milpitas, Calif., US

(74) Vertreter:
**Reichert & Lindner Partnerschaft Patentanwälte,
93049 Regensburg, DE**

(72) Erfinder:
**Laske, Frank, 35789 Weilmünster, DE;
Daneshpanah, Mohammad M., Foster City, Calif.,
US; Czerkas, Slawomir, 35781 Weilburg, DE;
Wagner, Mark, Rehovot, IL**

(56) Ermittelter Stand der Technik:
siehe Folgeseiten

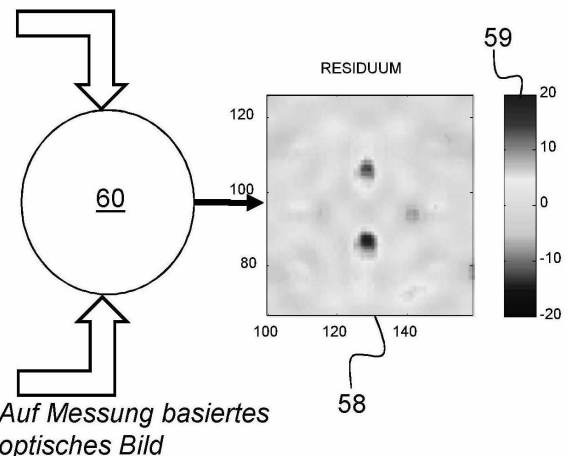
(54) Bezeichnung: **Ein Verfahren zum Messen von Positionen von Strukturen auf einer Maske und dadurch Bestimmen von Fehlern bei der Herstellung von Masken**

(57) Hauptanspruch: Ein Verfahren zur Messung von Positionen von Strukturen (3) auf einer Maske (1) und dabei Bestimmen von Maskenherstellungsfehlern umfassend die folgenden Schritte:

a) dass anhand einer Vielzahl von Messstellen (41) ein Einfluss eines optischen Proximity-Effekts auf eine Positionsmessung von Strukturen (3) auf der Maske (1) mit einer Metrologiemaschine (100) bestimmt wird;
b) dass ein Bereich auf der Maske (1) aufgrund von Designdaten (52) der Maske (1) ausgewählt wird, der eine Datendarstellung der Strukturen (3) enthält, die von der Metrologiemaschine (100) gemessen werden;
c) dass ein Rendern eines Bildes der Datendarstellung der Strukturen (3) durchgeführt wird, wobei mindestens ein gerendertes Bild (53) der Designdaten (52) erhalten wird;
d) dass ein Messtisch (20) der Metrologiemaschine (100) in einer Ebene parallel zu einer Oberfläche der Maske (1) bewegt und dadurch ein Bereich der Maske (1) in ein Bildfeld (17) eines Abbildungssystems der Metrologiemaschine (100) platziert wird, wobei der Bereich der Maske (1) an einer Stelle auf der Maske (1) angeordnet ist, die auf der Maske (1) einer Position des Bereichs der ausgewählten Designdaten (52) der Maske (1) entspricht;
e) dass zumindest ein optisches Bild (56) des Musters innerhalb des Bereichs auf der Maske (1) mit dem Abbildungssystem der Metrologiemaschine (100) aufgenommen wird; und

f) dass ein Residuum (58) von dem mindestens einen gerenderten Bild (53) der Strukturen, die den Designdaten (52) der Maske (1) entsprechen, und dem wenigstens einen optischen Bild (56) der Strukturen (3) auf dem spezifischen Bereich der Maske (1) bestimmt wird, wobei das Residuum (58) ein arithmetischer Mittelwert einer Differenz zwischen dem mindestens einen gerenderten Bild (53) und dem mindestens einen korrigierten optischen Bild (56) ist.

*designbasiertes
Referenzbild / gerendertes Bild*



(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	10 2008 060 293	A1
US	2011 / 0 229 010	A1
US	2013 / 0 019 212	A1

Beschreibung**GEBIET DER ERFINDUNG**

[0001] Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf Verfahren zum Messen von Positionen von Strukturen auf einer Maske und dadurch Bestimmen von Herstellungsfehlern der Maske.

HINTERGRUND DER ERFINDUNG

[0002] Positionsmessungen von Zielobjekten, insbesondere von Strukturen auf Substraten für die Halbleiterfertigung, unterliegen verschiedenen Arten von Fehlern. Die präzise Bestimmung der Lage von Strukturen ist wichtig, damit letztlich die Herstellung funktionierender Halbleiterprodukte, wie beispielsweise Computerchips, gewährleistet werden kann. Die Anforderungen bezüglich Präzision steigen, da die Strukturdimensionen auf den herzustellenden Chips abnehmen.

[0003] Ein wichtiger Aspekt der Positionsmessungen, in dem obigen Zusammenhang, ist die Bestimmung der Position von Strukturen oder Bereichen in Bezug zueinander auf einer strukturierten Oberfläche. Fehler bei der Bestimmung von Positionen auf einer Maske, wie sie durch eine Messung mit einer typischen optischen Metrologiemaschine bestimmt werden, von denen LMS IPRO 5 von KLA-Tencor ein aktuelles Beispiel ist, rühren zum Beispiel von Fehlern bei der optischen Metrologiemaschine oder von Fehlern beim Maskenschreiber. Durch den Wegfall oder die Reduzierung von Fehlern beim Messen mit der optischen Metrologiemaschine können die Fehler aufgrund der Maskenschreiber identifiziert werden.

[0004] Zum Beispiel offenbaren die veröffentlichte deutsche Patentanmeldung DE 10 2008 060 293 A1 und die veröffentlichte US-Patentanmeldung US 2011 / 0 229 010 A1 ein Verfahren zur Bestimmung der relativen Positionsfehler von mehreren auf ein Substrat, wie z.B. einen Wafer oder eine fotolithografische Maske, geschriebenen Bereichen von Strukturen. Ein vergrößertes Bild eines Gebiets des Substrats, das größer ist als ein Bereich, wird aufgezeichnet. Positionsfehler der Messmarken, die in dem Bild enthalten sind, werden aus dem Bild bestimmt. Die Positionsfehler werden um Fehler aufgrund des Abbildungsverfahrens korrigiert. Aus den Positionsfehlern, die auf diese Weise korrigiert wurden, wird der relative Positionsfehler des Bereichs abgeleitet. Dieser relative Positionsfehler eines Bereichs ist auch als Stitching-Fehler bekannt, und das Verfahren geht davon aus, dass Fehler aufgrund des Abbildungsprozesses niederfrequente Fehler erzeugen, während die Stitching-Fehler hochfrequente Fehler erzeugen. Daher werden zum Entfernen der Abbildungsfehler die niederfrequenten Fehlerkomponenten durch einen Hochpassfilterprozess entfernt.

[0005] Die US-Patentanmeldung US 2013 / 0 019 212 A1 betrifft die Positionsbestimmung von Strukturen auf einer Maske. Ein aufgenommenes Bild eines Bereichs der Maske wird dazu mit einer Vielzahl simulierter Bilder des Bereichs der Maske verglichen, wobei sich die simulierten Bilder hinsichtlich der zur Simulation verwendeten Parameter unterscheiden. Es werden die Parameter ermittelt, bei denen die Übereinstimmung zwischen gemessenem und simuliertem Bild am besten ist. Es wird so auch ein Positionierungsfehler von Strukturen auf der Maske bestimmt.

[0006] Ein weiterer Ansatz besteht darin, dass jedes Zielobjekt in einem Array von Zielobjekten gemessen wird. So wird beispielsweise jede Struktur von Interesse in einer Anordnung von Strukturen auf einer Oberfläche eines Halbleitersubstrats individuell gemessen, wobei das jeweilige Zielobjekt in die Mitte des Bildfeldes eines Abbildungssystems einer optischen Metrologiemaschine bewegt und die Messung durchgeführt wird.

[0007] Die Messung der Position in mehreren Bereichen von Interesse (Multi-Region-of-Interest) ist ein weiterer Ansatz. Dieser Ansatz nutzt die Tatsache, dass oft viele der zu messenden Objekte gleichzeitig im Bildfeld eines Abbildungssystems einer optischen Metrologiemaschine enthalten sind. Somit befinden sich die Positionen mehrerer zu messender Objekte an verschiedenen Positionen relativ zum Bildfeld und können zur gleichen Zeit gemessen werden.

[0008] Allerdings ist die Annahme, gemäß dem Stand der Technik, dass die Maskenschreiber nur hochfrequente Fehler aufweisen, nicht ganz korrekt. Wegen des Hochpassfilterungsprozesses können Informationen über die niederfrequenten Fehler der Maskenschreiber daher verworfen werden. Im Falle von Messungen einzelner Zielobjekte ist der Durchsatz sehr gering. So beansprucht zum Beispiel die Messung eines einzelnen Zielobjekts mit der Metrologiemaschine IPRO4 bis zu 12 Sekunden, und Messung eines typischen Arrays kann bis zu 7 Stunden beanspruchen. Während dieser langen Zeitspanne können Driftfehler der Metrologiemaschine auftreten, die die Genauigkeit der Ergebnisse verringern.

[0009] Bei dem Ansatz der mehreren Bereiche von Interesse (Multi-Region-of-Interest) können aufgrund der Lage der Struktur im Bildfeld durch die optische Verzeichnung und die optischen Aberrationen unterschiedliche Messergebnisse der Position der zu vermessenden Struktur erzeugt werden. Beispielsweise wird ein Array von Zielobjekten, wie z.B. eine Maske mit Strukturen, relativ zum Bildfeld verschoben, und die Position, relativ zum Array bzw. der Maske wird jeweils für jede verschobene Position bestimmt. Der Fehler ist abhängig von Koordinaten im Bildfeld und wird auch als feldveränderlicher Fehler bezeichnet. Dieser Fehler begrenzt die erzielbare Genauigkeit der Messungen der Positionen.

[0010] Der optische Fehler, wie zum Beispiel die optische Verzerrung und/oder die optischen Aberrationen, hängt von dem optischen Aufbau des Abbildungssystems ab, kann aber auch von Parametern der zu messenden Zieleobjekte / Strukturen abhängen, wie zum Beispiel die Größe oder Symmetrie der Zielobjekte oder den durch zwei oder mehr Zielobjekte verursachten Proximity-Effekt. Der optische Fehler kann ferner vom Substrat abhängen, auf dem ein Array von Zielobjekten in bestimmten technischen Feldern vorgesehen ist, wie im Falle von Wafern oder Masken in der Halbleiterfertigung. Dort kann der optische Fehler beispielsweise von den Beschichtungen, dem Schichtaufbau oder der Schichtdicke einer Maske abhängig sein.

ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

[0011] Es ist daher eine Aufgabe der Erfindung, ein kosten- und zeitsparendes Verfahren zum Separieren optischer Proximity-Fehler bei der Positionsmessung der Maske von Muster abhängigen Positionsfehlern bei der Maskenherstellung bereitzustellen.

[0012] Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren zum Messen der Positionen von Strukturen auf einer Maske und dadurch Bestimmen von Fehlern bei der Maskenherstellung gelöst und umfasst die folgenden Schritte:

- a) dass anhand einer Vielzahl von Messstellen ein Einfluss eines optischen Proximity-Effekts auf eine Positionsmessung von Strukturen auf der Maske, mit einer Metrologiemaschine, bestimmt wird;
- b) dass ein Bereich auf der Maske aufgrund der Designdaten der Maske ausgewählt wird, der eine Datendarstellung der Strukturen enthält, die von der Metrologiemaschine gemessen werden;
- c) dass ein Rendern eines Bildes der Datendarstellung der Strukturen durchgeführt wird, wobei mindestens ein gerendertes Bild der Designdaten der Maske erhalten wird;
- d) dass ein Messtisch der Metrologiemaschine in einer Ebene parallel zu einer Oberfläche der Maske bewegt wird und dadurch einen Bereich der Maske in ein Bildfeld eines Abbildungssystems der Metrologiemaschine platziert, wobei der Bereich der Maske an einer Stelle auf der Maske angeordnet ist, die auf der Maske einer Position des Bereichs der ausgewählten Designdaten der Maske entspricht;
- e) dass zumindest ein optisches Bild des Musters innerhalb der Fläche auf der Maske mit dem Abbildungssystem der Metrologiemaschine aufgenommen wird;

und

- f) dass ein Residuum von dem mindestens einen gerenderten Bild der Strukturen, die den Designdaten der Maske entsprechen, und dem wenigstens einen optischen Bild der Strukturen auf dem spezifischen Bereich auf der Maske bestimmt wird, wobei das Residuum ein arithmetischer Mittelwert einer Differenz zwischen dem mindestens einen gerenderten Bild und dem mindestens einen korrigierten optischen Bild ist.

[0013] Der Vorteil der Erfindung ist, dass der optische Proximity-Effekt vernachlässigt werden kann, falls ein modellbasierter Algorithmus verwendet wird. Die Korrektur des Proximity-Effekts erfordert nicht mehr eine Referenzmessmaschine, wie zum Beispiel ein AFM oder ein SEM.

[0014] Der Proximity-Effekt ist durch die finite Auflösung der Metrologiemaschinen für optische Masken bedingt und führt zu scheinbaren Verschiebungen der Position der Muster, die extrem schwer zu messen und von den tatsächlichen Maskenverschiebungen, die auf dem Maskenherstellungsverfahren basieren, zu trennen sind. Die scheinbaren Verschiebungen können einige nm betragen, was um ein Mehrfaches größer ist als die erforderliche Genauigkeit von <1 nm für Knoten unter einem halben Zwischenraum von 20 nm.

[0015] Es wird der Einfluss des optischen Proximity-Effekts auf die Positionsmessung von Strukturen auf der Maske bestimmt. Demgemäß wird ein Rendern eines Bildes von Daten (Maskenentwurfsdaten) jeder der mindestens zwei Strukturen oder der Messstellen durchgeführt. Anschließend wird mindestens ein gerender-

tes Bild der Maskenentwurfsdaten für die zumindest zwei Messstellen oder Strukturen erhalten. Zusätzlich wird mindestens ein optisches Bild von den zumindest zwei Messstellen oder Strukturen auf der Maske aufgenommen, wobei die Lage der Messstellen auf der realen Maske der Lage der durch die Maskenentwurfsdaten definierten Messstellen entspricht. Das Bildfeld des Messobjektivs hat etwa die gleiche Größe wie die Fläche der Maskenentwurfsdaten, welche die Messstellen umfasst. Schließlich wird das gerenderte Bild von dem aufgenommenen optischen Bild subtrahiert, welches nicht den mittleren optischen Proximity-Effekt in der X-Richtung und in der Y-Richtung enthält. Als Ergebnis erkennt man, dass der Einfluss des optischen Proximity-Effekts vernachlässigt werden kann.

[0016] Der Einfluss des optischen Proximity-Effekts auf eine Positionsmessung wird mit der Metrologiemaschine aus mindestens einer Anordnung von Messstellen bestimmt. Im Allgemeinen ist die Anordnung der Messstellen ein Array von Kontakten und besitzt eine Symmetrie. Gemäß dieser besonderen Anordnung ist eine erste Messstelle mit gleichen Messstellen umgeben, und mindestens eine zweite Messstelle und mindestens eine dritte Messstelle sind an gegenüberliegenden Rändern der Anordnung von Messstellen angeordnet.

[0017] Gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung wird der Einfluss des optischen Proximity-Effekts unter Verwendung einer Anordnung von Messstellen bestimmt, die eine erste zentrale Messstelle, und eine zweite Messstelle, eine dritte Messstelle, eine vierte Messstelle und eine fünfte Messstelle hat. Die zweite Messstelle, die dritte Messstelle, die vierte Messstelle und die fünfte Messstelle sind an den Ecken der Anordnung der Messstellen positioniert und haben eine andere Symmetrie im Vergleich zur ersten und zentralen Messstelle.

[0018] Eine Vielzahl von Anordnungen von Messstellen kann auf einer Testmaske in einer Vielzahl von Dies ausgebildet werden. Darüber hinaus ist es denkbar, dass eine Vielzahl von Dies auf einer Produktionsmaske ausgebildet wird, wobei einige der Dies eine Anordnung von Messstellen umfassen. Gemäß einer möglichen Ausführungsform ist die Anordnung der Messstellen ein Array von Kontakten.

[0019] Das Rendern eines Bildes eines Bereichs von Maskendesigndaten, der die ausgewählten Strukturen enthält, wird ebenfalls mit dem Bereich von Maskendesigndaten durchgeführt, der um 180° gedreht ist. Zusätzlich wird die Aufnahme von mindestens einem Bild eines Bildfeldes, das dem Bereich von Maskendesigndaten entspricht, auch an der um 180° gedrehten Maske durchgeführt.

[0020] Das Residuum ist ein arithmetischer Mittelwert aus einer Differenz zwischen mindestens einem gerenderten optischen Bild und mindestens einem korrigierten optischen Bild. Im Allgemeinen wird ein Stapel von gerenderten Bildern und ein Stapel von korrigierten optischen Bildern verwendet werden. Das Residuum ist eine farbcodierte grafische Darstellung einer Abweichung der Lage der Strukturen in der X-Richtung und der Y-Richtung des Maskenkoordinatensystems zwischen dem mindestens einen gerenderten Bild und dem mindestens einen optischen Bild. Das dargestellte Bildfeld des Residuums zeigt die Abweichung, die rein auf Maskenherstellungsfehlern basiert. Der Fehler aufgrund des optischen Proximity-Effekts hat keinen Einfluss, wenn die Position der Struktur mit einem kantenbasierten Algorithmus gemessen wird.

[0021] Der kantenbasierte Algorithmus beinhaltet die Aufnahme eines optischen Bildes eines Funktionsmusters auf einer Maske (Fotomaske). Zusätzlich wird eine Simulation eines erwarteten Bildes durch die Verwendung eines Modells des Abbildungssystems und der Maskendesigndaten der Maske angewendet. Eine Datenbank beschreibt das Maskenmuster oder die Messstellen. Registrierung oder Positionsmessung wird durch Minimieren einer Metrik der Ungleichheit berechnet oder äquivalent dazu wird eine Metrik der Ähnlichkeit des aufgenommenen optischen Bildes und des simulierten Bildes (gerendertes Bild) maximiert. Zum Beispiel ist eine Metrik der Ungleichheit zweier Bilder die Pixel-zu-Pixel-Differenzen zweier Bilder. Eine Metrik der Ähnlichkeit zweier Bilder ist ihre Korrelation. In der bevorzugten Ausführungsform werden mehrere Bilder bei verschiedenen Fokuseinstellungen aufgenommen und mehrere gerenderte Bilder werden aus den Maskendesigndaten erzeugt. Die Differenz zwischen den optischen und den gerenderten Bildern wird für jedes Pixel und jeden Fokuswert berechnet. In einem Ausführungsbeispiel wird die Diskrepanz der Registrierung für jede Messstelle gleichzeitig mit anderen Parametern, wie zum Beispiel dem Fokus, berechnet. In einer Ausführungsform umfasst das Modell des Abbildungssystems Aberrationen.

[0022] Der allgemeine Ablauf der Messung mit Verwendung des modellbasierten Algorithmus ist wie folgt:

- a. Ein Benutzer wählt die Messstellen, während er die Kontrolle über den Abstand der Muster, die Wahl der Verwendung von ähnlichen oder nicht ähnlichen Mustern innerhalb eines Dies, sowie über Stan-

dard-Zieleobjekte hat. Der Algorithmus durchsucht die Datenbank nach geeigneten Mustern, für die die Messunsicherheit klein ist und sortiert/schlägt eine Liste für den Benutzer vor.

b. Ein Bildstapel wird an der Messstelle mittels Durchfokussierung erfasst, während die Tischposition und die Daten des Fokussensors der Metrologiemaschine aufgezeichnet werden.

c. Die optischen Bilder werden bezüglich der nichtlinearen Antwort des CCD (Shading) sowie der Feldverzerrung des Messobjektivs korrigiert. Die Distortion sollte durch Fokussierung kalibriert werden, um einem Vergrößerungs- und Telezentritätsfehler Rechnung zu tragen und die Genauigkeit der Positions-messung (Registration) zu erhöhen.

d. Aus einer Datenbank wird ein Maskenmuster innerhalb von einem oder mehreren Messfeldern im Bildfeld (FOV) abgerufen, wobei das Maskenmuster einen zusätzlichen Rand aufweist, um die Berechnung der optischen Proximity-Effekte zu ermöglichen.

e. Der zu jedem Messfeld entsprechende durchfokussierte Stapel wird extrahiert.

f. Das der Messstelle entsprechende Testbild wird basierend auf Daten aus der Datenbank und optischen Parametern, wie z.B. Wellenlänge, numerische Apertur (NA) und Pixelgröße, berechnet. Abbildungsfehler des optischen Systems werden offline gemessen und werden bei der Bildberechnung berücksichtigt. Apodisation des Objektivs wird in die Bildberechnung mit aufgenommen.

g. Ein Minimierungsproblem wird für jedes Messfeld gelöst, so dass die L2-Norm der Differenz zwischen dem optischen und dem gerenderten Bildstapel als eine Funktion der Positionsbestimmung in X-Richtung und Y-Richtung minimiert wird und eine globale Fokusposition des Bildstapels, d.h. eine Methode der Minimierung der kleinsten Quadrate bei der Positionsbestimmung in X-Richtung, der Positionsbestimmung in Y-Richtung und der globalen Fokusposition als Parameter, durchgeführt wird.

h. Das berechnete Ergebnis der Positionsbestimmung aus Schritt (f) wird für jedes Messfeld gemeldet.

Figurenliste

[0023] Die nachstehend beschriebene Erfindung und ihre Vorteile werden unter Bezugnahme auf die beige-fügten schematischen Zeichnungen beschrieben. Dabei zeigen:

Fig. 1 einen schematischen Aufbau einer bekannten Metrologiemaschine zur Positionsbestimmung bei Masken;

Fig. 2 eine schematische Darstellung von Strukturen auf einer Maske/Substrat, die eine Musterverschiebung, die als „Proximity-Effekt“ bekannt ist, verursachen;

Fig. 3 eine schematische Darstellung einer Maske, die eine Mehrzahl von Dies umfasst;

Fig. 4 eine Draufsicht eines möglichen Kontaktarrays auf einer Maske, wobei vier Messstellen an den Ecken des Kontaktarrays angeordnet sind;

Fig. 5 eine schematische Darstellung verschiedener Fehlerbeiträge zu der gemessenen Position der vierten Messstelle des Kontaktarrays;

Fig. 6 eine Variante des Messschemas;

Fig. 7 eine weitere Variante des Messschemas;

Fig. 8A eine Darstellung des gemessenen Positionswerts der vier an der Ecke gelegenen Messstellen (siehe **Fig. 5**) in Bezug auf den Positionswert der in der Mitte gelegenen Messstelle des symmetrischen Kontaktarrays;

Fig. 8B eine Darstellung des gemessenen, modellbasierten Positionswerts der vier Messstellen an der Ecke (siehe **Fig. 5**) in Bezug auf den modellbasierten Positionswert der Messstelle in der Mitte des symmetrischen Kontaktarrays;

Fig. 9A eine Darstellung der gemessenen Position der vier Messstellen an den Ecken in X-Richtung und Y-Richtung, wobei der Proximity-Effekt (siehe **Fig. 8A**) entfernt ist;

Fig. 9B eine Darstellung der modellbasierten Position der Stellen an den Ecken in der X-Richtung und der Y-Richtung;

Fig. 10 eine Darstellung der Positionsabweichung der Stellen an den Ecken, die aus der gemessenen Position und der modellbasierten Position der Stellen an den Ecken in der X-Richtung und der Y-Richtung berechnet ist;

Fig. 11A eine grafische Darstellung der modellbasierten Bestimmung der Position der ausgewählten Strukturen auf einer Maske;

Fig. 11B eine grafische Darstellung der gemessenen Position der ausgewählten Strukturen des gleichen Designmusters der Maske wie in **Fig. 11A**; und

Fig. 12 eine grafische Darstellung eines Residuums erzeugt aus der theoretischen Berechnung der Position eines ausgewählten Designmusters der Maske und der gemessenen Position des ausgewählten Designmusters der Maske.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

[0024] In den Figuren werden gleiche Bezugszeichen für gleiche Elemente oder Elemente gleicher Funktion verwendet. Ferner werden der Übersicht halber nur die Bezugszeichen in den Figuren dargestellt, die für die Beschreibung der jeweiligen Figur erforderlich sind.

[0025] **Fig. 1** zeigt eine schematische Darstellung einer Koordinatenmessmaschine oder einer Metrologiemaschine 100, die seit langem aus dem Stand der Technik bekannt ist. Die hier gezeigte Metrologiemaschine 100 ist nur ein Beispiel einer Vorrichtung, die verwendet werden kann, um die Verfahren gemäß der Erfindung durchzuführen. In keinsten Weise sind die Verfahren gemäß der Erfindung auf die spezifische Konfiguration einer solchen Metrologiemaschine 100, wie der in der Figur gezeigten, beschränkt. Was für das erfindungsgemäße Verfahren wichtig ist, ist, dass die Metrologiemaschine 100 in der Lage ist, Relativverschiebungen zwischen einer Maske und einem Bildfeld definiert auszuführen. Im Besonderen ist das Bildfeld durch ein Abbildungssystem der Metrologiemaschine 100 bestimmt. Das Bildfeld ist derart, dass es eine Vielzahl von Strukturen auf der Maske umfasst. Die Metrologiemaschine 100 ist in der Lage, die Positionen dieser Strukturen zu bestimmen.

[0026] Eine Metrologiemaschine 100 wird beispielsweise zur Bestimmung der Breite (CD - critical dimension) einer Struktur 3 auf einem Substrat 2 verwendet. Ebenso kann mit der Metrologiemaschine 100 die Position von mindestens einer Struktur 3 auf dem Substrat 2 bestimmt werden. Das Substrat 2 kann zum Beispiel ein Wafer mit einer strukturierten Oberfläche oder eine Strukturen 3 tragende Maske 1 sein, die auf einen Wafer durch einen fotolithografischen Prozess übertragen werden. Obwohl die in **Fig. 1** gezeigte Metrologiemaschine 100 seit Langem aus dem Stand der Technik bekannt ist, soll der Vollständigkeit halber, die Betriebsweise der Metrologiemaschine 100 und der Anordnung der einzelnen Elemente der Metrologiemaschine 100 diskutiert werden.

[0027] Die Metrologiemaschine 100 umfasst einen Messtisch 20, der so angeordnet ist, dass er auf Luftlagern 21 in einer Ebene 25a in der X-Koordinatenrichtung und in der Y-Koordinatenrichtung verschiebbar ist. Andere Lagertypen als Luftlager können auch verwendet werden, um den Messtisch 20 in der X-Koordinatenrichtung und in der Y-Koordinatenrichtung zu bewegen. Die Ebene 25a wird durch ein massives Element 25 bestimmt. In einer bevorzugten Ausführungsform ist das massive Element 25 aus einem Granitblock gebildet. Jedoch ist es für einen Fachmann auf dem Gebiet offensichtlich, dass das Element 25 auch aus einem anderen Material hergestellt sein kann, das für die Verschiebung des Messtisches 20 eine präzise Ebene bereitstellt. Die Position des Messtisches 20 wird mittels mindestens einem Laser-Interferometer 24 gemessen. Um die Messung durchzuführen, emittiert das mindestens eine Laser-Interferometer 24 einen Lichtstrahl 23, der auf den Messtisch 20 trifft. Aus der Position des Messtisches 20 kann die Position der Maske bestimmt werden. Insbesondere wird die Position der Maske 1 relativ zu einem Bildfeld bestimmt. Das Element 25 selbst ist auf Schwingungsdämpfer 26 montiert, um beispielsweise zu verhindern, dass Gebäudeschwingungen das Gerät erreichen.

[0028] Die Maske 1 kann mit einem Durchlicht-Beleuchtungssystem 6 und/oder einem Auflicht-Beleuchtungssystem 14 in Reflexion beleuchtet werden. Das Durchlicht-Beleuchtungssystem 6 ist in einer optischen Anordnung 40 vorgesehen. Das Auflicht-Beleuchtungssystem 14 in Reflexion ist auch in einer weiteren optischen Anordnung 50. Die optische Anordnung 40 umfasst das Beleuchtungssystem 6 für transmittiertes Licht, einen Umlenkspiegel 7 und einen Kondensor 8. Mittels des Umlenkspiegels 7 wird das Licht vom Durchlicht-Beleuchtungssystem 6 auf den Kondensor 8 geleitet. Die weitere optische Anordnung 50 umfasst das Auflicht-Beleuchtungssystem 14 in Reflexion, einen Strahlteilerspiegel 12, das Messobjektiv 9 und eine Verschiebeeinrichtung 15 für das Messobjektiv 9. Mit der Verschiebeeinrichtung 15 kann das Messobjektiv 9

in der Z-Koordinatenrichtung verschoben werden (z.B. für die Fokussierung). Das Messobjektiv 9 sammelt das von der Maske 1 kommende Licht, das dann aus der Beleuchtungsachse 5 für reflektiertes Licht mit dem teildurchlässigen Strahlteilerspiegel 12 gelenkt wird. Das Licht gelangt zu einer Kamera 10, die mit einem Detektor 11 versehen ist. Der Detektor 11 ist mit einem Computersystem 16 verbunden, das aus den gemessenen Werten des Detektors 11 ein digitales Bild aus den Messwerten generiert. Das Computersystem 16 führt alle Berechnungen durch, die notwendig sind, um die Position der Struktur 3 oder Strukturen 3 auf der Maske 1 zu bestimmen.

[0029] Insbesondere ist das Bildfeld durch das Messobjektiv 9, die Kamera 10 und den Detektor 11 der Kamera 10 der Metrologiemaschine 100 definiert. Das Abbildungssystem der Metrologiemaschine 100 umfasst in erster Linie das Messobjektiv 9, die Kamera 10 und den Detektor 11.

[0030] Fig. 2 zeigt eine schematische Darstellung einer ersten Struktur 3_1 und einer zweiten Struktur 3_2 auf einer Maske 1, die eine Musterverschiebung ΔP bewirkt, die als der „Proximity - Effekt“ bekannt ist. Wie in Fig. 2 gezeigt, ist die Maske 1 ein Quarzsubstrat 2, das eine Chromschicht trägt. Die Chromschicht 13 wird strukturiert, um die einzelnen Strukturen 3 auf der Oberfläche des Substrats 2 auszubilden. In dem hier gezeigten Beispiel sind die erste Struktur 3_1 und die zweite Struktur 3_2 in einem Bildfeld 17 des Messobjektivs 9. Das Bildfeld 17 wird auf den Detektor 11 der Kamera 10 abgebildet. Der Detektor 11 ist als ein CCD-Sensor ausgebildet und definiert ein Messfenster 18, das sich über die erste Struktur 3_1 und teilweise über die zweite Struktur 3_2 erstreckt. Die erste Struktur 3_1 und die zweite Struktur 3_2 sind durch einen Abstand 19 beabstandet. Je kleiner der Abstand zwischen der ersten Struktur 3_1 und der zweiten Struktur 3_2 ist, desto größer wird der Einfluss des Proximity-Effekts.

[0031] Fig. 2 zeigt auch das gesamte elektronische Signal 30, das über das Messfenster 18 registriert wurde. Das gesamte elektronische Signal 30 ist eine Überlagerung eines elektronischen Signals 31 von der ersten Struktur 3_1 und eines elektronischen Signals 32 von der zweiten Struktur 3_2 . Die Bestimmung der Position oder der Breite der ersten Struktur 3_1 wird anhand des halben Werts 34 des registrierten Maximalwerts 33 des gesamten elektronischen Signals 30 bestimmt. Aus dem gesamten elektronischen Signal 30 erhält man eine Musterverschiebung 35 der ersten Struktur 3_1 . Folglich scheint die erste Struktur 3_1 breiter zu sein, als wenn ohne die Anwesenheit der zweiten Struktur gemessen werden würde. Die zweite Struktur 3_2 unterliegt ebenfalls einer Musterverschiebung (nicht dargestellt). Die endliche Auflösung einer Metrologiemaschine 100 für das Vermessen optischer Masken führt zu scheinbaren Verschiebungen in der Position oder der Breite der Strukturen. Diese scheinbaren Verschiebungen sind extrem schwer zu messen und fast unmöglich von den tatsächlichen Verschiebungen der Maske zu trennen. Die scheinbaren Verschiebungen, die als „Proximity - Effekt“ bekannt sind, können einige nm, also ein Mehrfaches der erforderlichen Genauigkeit von <1 nm der Metrologiemaschine 100 für Knoten mit halber Teilung von unter 20 nm betragen.

[0032] Fig. 3 zeigt eine schematische Darstellung einer Maske 1, die eine Mehrzahl von Dies 36_{11} , 36_{12} , ..., 36_{NM} enthält. Einige oder alle der Dies 36_{11} , 36_{12} , ..., 36_{NM} besitzen eine Anordnung 38 von Messstellen. Gemäß einer Ausführungsform der Erfindung ist die Anordnung 38 der Messstellen ein Array von Kontakten. Die Maske kann auch eine spezielle Testmaske (nicht gezeigt) sein. Die Testmaske hat eine Reihe von Dies. Jedes Die des Arrays hat mehrere verschiedene dichte Arrays von Kontakten. Die Arrays von Kontakten unterscheiden sich durch die Größe des Kontakts und durch deren Teilung.

[0033] Fig. 4 zeigt eine Draufsicht eines möglichen Arrays 39 von Kontakten auf einer Maske (hier nicht gezeigt), das sich entlang der X-Richtung und der Y-Richtung erstreckt. Eine Vielzahl von Messstellen 41 ist in der Form des Arrays 39 von Kontakten angeordnet. Das hier gezeigte Beispiel des Arrays 39 von Kontakten kann 15×15 - mal auf der Maske angeordnet sein. Mit der optischen Metrologiemaschine 100 kann eine erste Messstelle 41_1 , eine zweite Messstelle 41_2 , eine dritte Messstelle 41_3 , eine vierte Messstelle 41_4 und eine fünfte Messstelle 41_5 der Vielzahl der Messstellen 41 des Arrays 39 von Kontakten verwendet werden, um den Proximity-Effekt zu messen. Die Symmetrie der zweiten Messstelle 41_2 , der dritten Messstelle 41_3 , der vierten Messstelle 41_4 und der fünften Messstelle 41_5 wird verwertet, um den Proximity-Effekt abzuschätzen.

[0034] Fig. 5 ist eine schematische Darstellung verschiedener Fehlerbeiträge zu der gemessenen Position der vierten Messstelle 41_4 des Arrays von Kontakten 39. Für jedes Array wird das Messergebnis an der ersten Messstelle 41_1 , der zweiten Messstelle 41_2 , der dritten Messstelle 41_3 , der vierten Messstelle 41_4 oder der fünften Messstelle 41_5 durch die gemessenen Positionen der jeweiligen Stelle in der X-Koordinatenrichtung und der Y-Koordinatenrichtung dargestellt. Folglich ist die Komponente X^4 der Position der vierten Messstelle 41_4 in der X-Richtung bestimmt durch:

$$X^4 = \mu_{Mask}^4 + \mu_{IPRO}^4 \pm \sigma_{Random}$$

[0035] Die gemessene Position der vierten Messstelle 41₄ wird durch eine erste Fehlerkomponente 42 (μ_{mask}) beeinflusst, die von der Verschiebung der Musteranordnung während des Herstellungsverfahrens einer Maske rührt. Eine zweite Fehlerkomponente 43 (μ_{IPRO}) resultiert aus einer durch die Messung induzierten Verschiebung. Eine dritte Fehlerkomponente 44 (σ_{Random}) resultiert von Masken- und Metrologiekomponenten. Die dritte Fehlerkomponente 44 ist eine konstante Größe, aber kann eine Orientierung von 0° bis 360° aufweisen. Diese Tatsache wird durch einen Kreis 45 in **Fig. 5.** dargestellt.

[0036] Die erste Fehlerkomponente 42 für die vierte Messstelle 41₄ ist wie folgt definiert:

$$\mu_{mask}^4 = \mu_{global}^4 + \mu_{local}^4$$

μ_{global} ist der Maskenfehler über das Array 39 von Kontakten und μ_{local} ist ein lokaler Fehler an der jeweiligen Messstelle.

[0037] Die zweite Fehlerkomponente 43 für die vierte Messstelle 41₄ ist wie folgt definiert:

$$\mu_{IPRO}^4 = \mu_{TIS}^4 + \mu_{Prox}^4$$

μ_{TIS} ist die „Tool Induced Sift“ (TIS) der gemessenen Position der Messstellen 41 des Arrays 39 von Kontakten und μ_{Prox} , ist der Proximity-Fehler der jeweiligen Messstellen 41. $\mu_{TIS} \approx 0$, da alle Messungen der Messstellen 41 bei 0° (anfängliche Ausrichtung) und 180° (Drehung gegenüber der ersten Orientierung) durchgeführt werden.

[0038] In der X-Richtung ist $\mu_{Prox} = \mu_{Prox}^5 = \mu_{Prox}^3 = -\mu_{Prox}^2 = -\mu_{Prox}^4$ und $\mu_{Prox}^1 \approx 0$. Das bedeutet, dass aufgrund der Symmetrie des gesamten Arrays 39 der Kontakte die Proximity-Fehler an der fünften Messstelle 41₅ und der dritten Messstelle 41₃ identisch sind, und bis auf das Vorzeichen ebenfalls identisch zu den Proximity-Fehlern an der zweiten Messstelle 41₂ und an der vierten Messstelle 41₄. Der Proximity-Fehler an der ersten Messstelle 41₁, die sich im Zentrum des Arrays 39 der Kontakte befindet, ist nahezu Null.

[0039] Zusätzlich ist der globale Maskenfehler,

$$\mu_{global}^5 = \mu_{global}^4 = \mu_{global}^3 = \mu_{global}^2 = \mu_{global}^1$$

der bei der ersten Messstelle 41₁, der zweiten Messstelle 41₂, der dritten Messstelle 41₃, der vierten Messstelle 41₄ und der fünften Messstelle 41₅ gemessen wird, konstant über das Array 39 der Kontakte.

[0040] Der relative Proximity-Fehler $\hat{\mu}_{Prox}^4$ in der X-Richtung zwischen der vierten Messstelle 41₄ und der ersten Messstelle 41₁ (zentrale Messstelle 41 im Array 39 von Kontakten) wird bestimmt durch:

$$\hat{\mu}_{prox}^4 = X^4 - X^1$$

[0041] Unter Berücksichtigung der obigen Gleichungen:

$$\hat{\mu}_{Prox}^4 = \mu_{Mask}^4 + \mu_{Prox}^4 \pm \sigma_{Random} - \mu_{Mask}^1 - \mu_{Prox}^1 \pm \mu_{Random}$$

[0042] Da der Proximity-Fehler μ_{Prox}^1 der ersten Messstelle 41₁ etwa Null ist, vereinfacht sich die obige Gleichung wie folgt:

$$\hat{\mu}_{Prox}^4 = \mu_{Prox}^4 + (\mu_{Local}^4 - \mu_{Local}^1) \pm \sqrt{2} \times \sigma_{Random}$$

[0043] Eine Schätzung des Beitrags der Maske zum Proximity-Effekt e_{Prox} an der vierten Messstelle 41₄ wird wie folgt definiert:

$$e_{Prox}^4 = (\mu_{Local}^4 - \mu_{Local}^1) \pm \sqrt{2} \times \sigma_{Random}$$

[0044] Der durchschnittliche Proximity-Fehler $\hat{\mu}_{Prox}$ für die zweite Messstelle 41₂, die dritte Messstelle 41₃, die vierte Messstelle 41₄ und die fünfte Messstelle 41₅ wird wie folgt bestimmt:

$$\hat{\mu}_{Prox} = \frac{\hat{\mu}_{Prox}^5 + \hat{\mu}_{Prox}^3 - \hat{\mu}_{Prox}^4 - \hat{\mu}_{Prox}^2}{4} = \mu_{Prox} + e_{Prox}$$

[0045] Der gesamte Proximity-Fehler e_{Prox} ist wie folgt:

$$e_{Prox} = \frac{\mu_{Local}^5 + \mu_{Local}^3 - \mu_{Local}^4 - \mu_{Local}^2}{4} \pm \frac{\sqrt{2} \times \sigma_{Random}}{\sqrt{4}}$$

[0046] Die beiden obigen Gleichungen zeigen die Schätzung des Maskenbeitrags zum Proximity-Effekt für ein einziges Array 39 von Kontakten. Die Messung wird auf mehreren Arrays 39 von Kontakten durchgeführt (verteilt auf einer Testmaske oder einer Produktionsmaske).

$$e_{Prox} = \frac{\mu_{Local}^5 + \mu_{Local}^3 - \mu_{Local}^4 - \mu_{Local}^2}{4} \pm \frac{\sqrt{2} \times \sigma_{Random}}{\sqrt{4} \times \sqrt{\#DIES}}$$

[0047] Die Ableitung des Proximity-Effekts e_{Prox} benutzt die Symmetrie der Anordnung der Messstellen 41 in den Arrays 39 der Kontakte. Entsprechend der Anordnung der Messstellen 41 (siehe **Fig. 5**) stellt der Ausdruck $(\mu_{Local}^5 - \mu_{Local}^4)$ die Differenz im Herstellungsverfahren der Maske zwischen der linken Seite 46 und der rechten Seite 47 des unteren Endes 48 der Arrays 39 der Kontakte dar. Ein solcher Unterschied könnte von sogenannten Aufladungseffekten des E-Beam - Schreibers herrühren (siehe zum Beispiel die Referenz „Modeling of charging effect and its correction by EB mask writer EBM-6000“). Von einem rein analytischen Gesichtspunkt aus kann das beschriebene Messschema nicht zwischen dem Proximity-Fehler μ_{Prox} der Metrologiemaschine und den Asymmetrien im Herstellungsprozess der Maske, wie beschrieben durch:

$(\mu_{Local}^5 - \mu_{Local}^4)$, unterscheiden. Jedoch, wie oben gezeigt, ist es möglich, entweder:

Vorwissen zu verwenden, um die Asymmetrie bei der Maskenherstellung zu schätzen. Ein Algorithmus zur Positionsmessung, wie zum Beispiel der „Kanten-Algorithmus“ (siehe **Fig. 8A**), kann nicht die Proximity-Effekte korrigieren. Der „modellbasierte Algorithmus zur Positionsmessung“ (siehe **Fig. 8B**) legt dann nahe, dass der modellbasierte Algorithmus zur Positionsmessung in der Tat die meisten Proximity-Fehler korrigieren kann.

[0048] Gemäß der Annahme, dass der modellbasierte Algorithmus zur Positionsmessung tatsächlich den Proximity-Fehler korrigiert, kann man die Asymmetrie im Herstellungsprozess der Maske abschätzen.

[0049] **Fig. 6** zeigt eine Variante des Schemas zum Bestimmen des Einflusses des Proximity-Effekts. Das Verhalten von $\hat{\mu}_{Prox}$ wird bestimmt, während der Abstand zwischen der zweiten Messstelle 41₂, der dritten Messstelle 41₃, der vierten Messstelle 41₄ und der fünften Messstelle 41₅ und der ersten Messstelle 41₁ (zentrale Messstelle) allmählich zunimmt. Der Proximity-Fehler der Maskenmetrologie und der Maskenherstellungsfehler ändern sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten, somit kann mehr Information über die relativen Werte des Proximity-Fehlers und des Herstellungs-Fehlers abgeleitet werden.

[0050] **Fig. 7** zeigt eine weitere Variante des Schemas zum Bestimmen des Einflusses des Proximity-Effekts. Hier werden drei Messstellen 41 zum Bestimmen des Proximity-Effekts $\hat{\mu}_{Prox}$ benutzt. Die erste Messstelle 41₁ (zentrale Messstelle) ist in der Mitte des Arrays 39 der Kontakte positioniert. Eine zweite Messstelle 41₂ und eine dritte Messstelle 41₃ sind an der linken Seite 46 bzw. an der rechten Seite 47 des Arrays 39 der Kontakte positioniert. Der Proximity-Effekt $\hat{\mu}_{Prox}$, der keinen Proximity-Fehler aus der Metrologiemaschine herrührend aufweist, wird wie folgt definiert:

$$\hat{\mu}_{Prox} = \frac{\hat{\mu}_{Prox}^3 + \hat{\mu}_{Prox}^2}{2} = \frac{(\mu_{Local}^3 - \mu_{Local}^2) + (\mu_{Local}^2 - \mu_{Local}^1)}{2} + \sigma_{random}$$

[0051] Die obige Gleichung drückt eine andere Asymmetrie der Maskenherstellung aus. Es ist für den Fachmann klar, dass viele weitere Beziehungen zwischen den Messgrößen, dem Proximity-Fehler der Metrologiemaschine und den Asymmetrien bei der Maskenherstellung hergestellt werden können. Keine von ihnen löst das grundsätzliche Problem der Trennung des Proximity-Fehlers von Herstellungsfehlern, aber in Verbindung

mit geeigneten Algorithmen bieten sie einen praktischen Ansatz zur Messung und Korrektur von Maskenherstellungsfehlern. Es gibt einige andere wichtige Variationen für die Anordnung und die Gestaltung der Messstellen. Eine Änderung der relativen Positionen der Messstellen gibt einen Einblick, wie sich der Proximity-Fehler und die Asymmetrien der Herstellung vom Zentrum des Arrays 39 der Kontakte zu den Rändern des Arrays 39 der Kontakte entwickeln.

[0052] **Fig. 8A** ist eine Darstellung des Werts der gemessenen Position der vier Messstellen („sites“) 41_2 , 41_3 , 41_4 , 41_5 , die an den Ecken des Arrays 39 der Kontakte (siehe **Fig. 5**) angeordnet sind, in Bezug auf einen Positionswert der Messstelle 41_1 in der Mitte des symmetrischen Arrays 39 der Kontakte. Ein Vektor V_2 ist der zweiten Messstelle 41_2 zugewiesen, der die Verschiebung der gemessenen Position der zweiten Messstelle 41_2 in Bezug auf die auf Maskendaten basierende Position der zweiten Messstelle 41_2 angibt. Die gemessene Position der zweiten Messstelle 41_2 ist in Richtung der ersten Messstelle 41_1 in der X-Koordinatenrichtung und in Y-Koordinatenrichtung verschoben.

[0053] Ein Vektor V_3 ist der dritten Messstelle 41_3 zugewiesen, der die Verschiebung der gemessenen Position der dritten Messstelle 41_3 in Bezug auf die auf Maskendaten basierende Position der dritten Messstelle 41_3 angibt. Die gemessene Position der dritten Messstelle 41_3 ist in Richtung der ersten Messstelle 41_1 in X-Koordinatenrichtung und in Y-Koordinatenrichtung verschoben.

[0054] Ein Vektor V_4 ist der vierten Messstelle 41_4 zugewiesen, der die Verschiebung der gemessenen Position der vierten Messstelle 41_4 in Bezug auf die auf Maskendaten basierende Position der vierten Messstelle 41_4 angibt. Die gemessene Position der vierten Messstelle 41_4 ist in Richtung der ersten Messstelle 41_1 in X-Koordinatenrichtung und in Y-Koordinatenrichtung verschoben.

[0055] Ein Vektor V_5 ist der fünften Messstelle 41_5 zugewiesen, der die Verschiebung der gemessenen Position der fünften Messstelle 41_5 in Bezug auf die auf Maskendaten basierende Position der fünften Messstelle 41_5 angibt. Die gemessene Position der fünften Messstelle 41_5 ist in Richtung der ersten Messstelle 41_1 in X-Koordinatenrichtung und Y-Koordinatenrichtung verschoben.

[0056] **Fig. 9A** ist eine Darstellung der gemessenen Position der vier Messstellen 41_2 , 41_3 , 41_4 , 41_5 , die sich in den Ecken in X-Richtung und Y-Richtung befinden, wobei der Proximity-Effekt (siehe **Fig. 8A**) entfernt ist. Für den vorliegenden Fall ist der durchschnittliche Proximity-Effekt $\hat{\mu}_{\text{prox}}$ 3,99 nm in der X-Richtung und 4,40 nm in der Y-Richtung. Nach Subtrahieren des durchschnittlichen Proximity-Effekts $\hat{\mu}_{\text{prox}}$ in der X-Richtung und in der Y-Richtung von jedem Vektor V_2 , V_3 , V_4 und V_5 erhält man korrigierte Vektoren, V_{c2} , V_{c3} , V_{c4} und V_{c5} . Die korrigierten Vektoren V_{c2} , V_{c3} , V_{c4} und V_{c5} stehen für Positionsmessungen, bei denen der optische Proximity-Effekt entfernt ist.

[0057] **Fig. 8B** ist eine Darstellung des gemessenen modellbasierten Positionswerts der vier Messstellen 41_2 , 41_3 , 41_4 , 41_5 an den Ecken des Arrays 39 der Kontakte (siehe **Fig. 5**) in Bezug auf einen modellbasierten Positionswert der Messstelle 41_1 in der Mitte des symmetrischen Arrays 39 der Kontakte. Der modellbasierte Algorithmus zur Simulation eines optischen Bildes des Arrays 39 der Kontakte (ein funktionelles Muster auf einer Maske) beinhaltet das Simulieren eines erwarteten Bildes unter Verwendung eines Modells des Abbildungssystems und von Modelldaten des Arrays 39 der Kontakte auf der Maske, die in einer Datenbank eines Computersystems gespeichert sind. Die Position (Registration) wird durch Minimieren der Metrik der Unähnlichkeit berechnet, oder äquivalent dazu, durch Maximieren einer Metrik der Ähnlichkeit des erfassten optischen Bildes und des simulierten Bildes. Zum Beispiel ist eine Metrik der Unähnlichkeit von zwei Bildern die L2-Norm der Pixel-für-Pixel - Differenzen zweier Bilder. Eine Metrik für die Ähnlichkeit zweier Bilder ist deren Korrelation. In der bevorzugten Implementierung werden mehrere Bilder bei verschiedenen Fokuseinstellungen erfasst und simuliert. Der Unterschied der optischen und simulierten Bilder wird für jedes Pixel und jeden Fokuswert berechnet. In einer Ausführungsform wird die Diskrepanz in der Position (Registration) für jede Stelle gleichzeitig mit anderen Parametern, wie beispielsweise dem Fokus, berechnet. In einer Ausführungsform umfasst das Modell des Abbildungssystems Aberrationen. In einer anderen Ausführungsform wird ein Objektiv mit geringer Aberration verwendet und Aberrationen im Modell werden nicht berücksichtigt. In einer anderen Ausführungsform werden Aberrationen im Modell ignoriert, und die optischen Bilder der Maske werden bei zwei Orientierungen erfasst. Die beiden Orientierungen unterscheiden sich um eine 180° Drehung in der Ebene der Maske. Eine Kombination entweder der optischen Bilder oder der gemessenen Position (Registration) aus den optischen Bildern reduziert deutlich die Auswirkung der Abbildungsfehler auf die Positionsmessungen. Im Vergleich zum Messergebnis aus **Fig. 8A** sind der Abweichungsvektor V_2 der zweiten Messstelle 41_2 , der Abweichungsvektor V_3 der dritten Messstelle 41_3 , der Abweichungsvektor V_4 der vierten Messstelle 41_4 , und der Abweichungsvektor V_5 der fünften Messstelle 41_5 kleiner. **Fig. 9B** ist

eine Darstellung der gemessenen Position, die mit der Verwendung des modellbasierten Algorithmus für die vier Messstellen 41₂, 41₃, 41₄, 41₅ bestimmt wurde, die an den Ecken der Maske angeordnet sind. Für den vorliegenden Fall ist der durchschnittliche Proximity-Effekt $\hat{\mu}_{\text{Prox}}$ 0,12 nm in der X-Richtung und 0,31 nm in der Y-Richtung.

[0058] Die nachstehende Tabelle zeigt das Ergebnis des kantenbasierten gemessenen Proximity-Effekts und des gemessenen modellbasierten Proximity-Effekts in der X-Richtung des Arrays der Kontakte aus **Fig. 5**.

$\mu_{\text{Prox}}[\text{nm}]$	Kantenbasiert	Modellbasiert
	1 Kontakt	1 Kontakt
Zweite Messstelle	4.27	0.59
Dritte Messstelle	-3.84	0.56
Vierte Messstelle	3.09	-0.97
Fünfte Messstelle	-4.76	-0.46
Durchschnitt*	3.99	0.12
$\sim e_{\text{Prox}}$	+/- 0.8 nm	

[0059] Die nachstehende Tabelle zeigt das Ergebnis des gemessenen kantenbasierten Proximity-Effekts und des gemessenen modellbasierten Proximity-Effekts in der Y-Richtung des Arrays der Kontakte aus **Fig. 5**.

[0060] Wobei * als $\hat{\mu}_{\text{Prox}} = \frac{\hat{\mu}_{\text{Prox}}^5 + \hat{\mu}_{\text{Prox}}^3 - \hat{\mu}_{\text{Prox}}^4 - \hat{\mu}_{\text{Prox}}^2}{N}$ definiert ist.

$\mu_{\text{Prox}}[\text{nm}]$	Kantenbasiert	Modellbasiert
	1 Kontakt	1 Kontakt
Zweite Messstelle	-4.85	-0.53
Dritte Messstelle	-4.03	0.21
Vierte Messstelle	4.21	0.26
Fünfte Messstelle	4.54	0.65
Durchschnitt*	4.40	0.31
$\sim e_{\text{Prox}}$	+/- 0.8 nm	

[0061] Es ist aus der obigen Messung klar, dass der kantenbasierte Algorithmus für die Bestimmung der Lage von Strukturen Auswirkungen auf einen Proximity-Effekt von - 4 nm zeigt.

[0062] Die Drehung einer symmetrischen Musteranordnung (siehe Array 39 von Kontakten aus **Fig. 5**) führt zu einem ähnlichen Proximity-Effekt in der X-Richtung und der Y-Richtung.

[0063] Mit dem modellbasierten Algorithmus ist es möglich, den optischen Proximity-Effekt zu entfernen.

[0064] **Fig. 10** ist eine Darstellung der Positionsabweichung der vier Messstellen 41₂, 41₃, 41₄, 41₅, die aus dem optischen Proximity-Effekt der korrigierten Messposition und der gemessenen modellbasierten Position in der X-Richtung und der Y-Richtung berechnet ist. Für den vorliegenden Fall ist der durchschnittliche Proximity-Fehler e_{Prox} +/- 0,8 nm in der X-Richtung und +/- 0,8 nm in der Y-Richtung. Aufgrund der geringen Differenz zwischen der kantenbasierten Messung und der modellbasierten Messung der Position der Messstellen erfassen beide Messschemata die gleiche lokale Verschiebung des Maskenmusters.

[0065] Fig. 11A ist eine grafische Darstellung der modellbasierten Bestimmung der Position der ausgewählten Strukturen 51 auf einer Maske. Ein Kunde oder Benutzer wählt aus einer Datenbank für das Maskendesign 52 die Messstellen aus, die die ausgewählten Strukturen 51 umfassen. Darüber hinaus kann der Algorithmus die Datenbank nach geeigneten Strukturen/Mustern durchsuchen und sortiert/schlägt dem Kunden/Benutzer eine Liste vor. An den ausgewählten Strukturen 51 der Designdaten der Maske wird ein Bildrendern durchgeführt. Dementsprechend wird mindestens ein gerendertes Bild 53 aus den Designdaten der Maske erhalten. Der Schritt des Bildrenderns kann gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel auch das optische Aberrationsmodell 54 des Messobjektivs 9 umfassen, das verwendet wird, um mindestens ein Bild der ausgewählten Strukturen auf der Maske zu erfassen. Ein Stapel von gerenderten Bildern kann unter Verwendung des optischen Aberrationsmodells bei unterschiedlichen Fokuspositionen berechnet werden. Das sich ergebende gerenderte Bild kann ein einzelnes Bild sein, ein Stapel von N Bildern oder ein Mittelwert des Stapels der N gerenderten Bilder.

[0066] Fig. 11B ist eine grafische Darstellung der gemessenen Position von ausgewählten Strukturen des gleichen Musters des Maskendesigns 52, wie es in **Fig. 11A** verwendet wurde. Zunächst einmal wird der Messtisch der Metrologiemaschine in einer Ebene parallel zu einer Oberfläche der Maske 1 bewegt, wodurch ein Bereich der Maske in einem Bildfeld 55 des Abbildungssystems der Metrologiemaschine platziert wird. Der Bereich der Maske ist an einer Position auf der Maske angeordnet, die der Position der Strukturen entspricht, für die die Designdaten 52 der Maske für den Schritt des Bildrenderns ausgewählt wurden. Mindestens ein optisches Bild 56 der Strukturen/Muster wird mit dem Abbildungssystem der Metrologiemaschine in dem Bereich auf der Maske erfasst. Eine Korrektur 57 der Abschattung und der Linsenverzerrung wird für jedes der aufgenommenen optischen Bilder 56 durchgeführt.

[0067] Fig. 12 ist eine grafische Darstellung eines Bildes des Residuums, das aus der theoretischen Berechnung der Position der ausgewählten Strukturen aus den Designdaten 52 der Maske und der gemessenen Position der Strukturen, die diesen ausgewählten Strukturen entsprechen, erzeugt wird. Eine Differenz 60 zwischen dem auf dem Maskendesign basierenden Referenzbild 53 und dem auf der Messung basierenden optischen Bild 56 ergibt ein Bild 58 eines Residuums. Eine Skala 59, die zusammen mit dem Bild des Residuums angezeigt wird, liefert Information über ein Abweichungsmaß der Strukturen an spezifischen Orten innerhalb des Bildfeldes. Da der Einfluss des optischen Proximity-Effekts in der X-Richtung und der Y-Richtung innerhalb der Genauigkeit der Metrologiemaschine liegt, liefert das Bild des Residuums eine eindeutige Anzeige der verbleibenden oder festgestellten Abweichungen in der X-Richtung und der Y-Richtung, die auf Fehlern im Maskenherstellungsprozess basieren.

Bezugszeichenliste

1	Maske
2	Substrat
3	Struktur
3 ₁	erste Struktur
3 ₂	zweite Struktur
5	Auflichtbeleuchtungsachse
6	Durchlicht-Beleuchtungssystem
7	Umlenkspiegel
8	Kondensor
9	Messobjektiv
10	Kamera
11	Detektor
12	Strahlteilerspiegel
13	Chromschicht
14	Auflicht-Beleuchtungssystem
15	Verschiebeeinrichtung

16	Computersystem
17	Bildfeld
18	Messfenster
19	Abstand
20	Messtisch
21	Luftlager
23	Lichtstrahl
24	Laser-Interferometer
25	massives Element
25a	Ebene in X-Koordinatenrichtung und Y-Koordinatenrichtung
26	Schwingungsdämpfer
30	gesamtes elektronisches Signal
31	elektronisches Signal
32	elektronisches Signal
33	Maximalwert
34	halber Wert
35	Musterverschiebung
36 _{11,...,36_{NM}}	Dies
38	Anordnung der Messstellen
39	Array von Kontakten
40	optische Anordnung
41	Messstellen
41 ₁	erste Messstelle
41 ₂	zweite Messstelle
41 ₃	dritte Messstelle
41 ₄	vierte Messstelle
41 ₅	fünfte Messstelle
42	erste Fehlerkomponente
43	zweite Fehlerkomponente
44	dritte Fehlerkomponente
45	Kreis
46	linke Seite des Arrays der Kontakte
47	rechte Seite des Arrays der Kontakte
48	Unterseite der Anordnung der Kontakte
50	optische Anordnung
51	ausgewählte Strukturen
52	Maskendesign
53	gerendertes Bild
54	Modell optischer Abbildungsfehler
55	Sichtfeld

56	optisches Bild
57	Korrektur der Abschattung und Linsenverzerrung
58	Bild eines Residuums
59	Skala
100	Metrologiemaschine
V2	Vektor
V3	Vektor
V4	Vektor
V5	Vektor
Vc2	korrigierter Vektor
Vc3	korrigierter Vektor
Vc4	korrigierter Vektor
Vc5	korrigierter Vektor
X	X-Richtung
Y	Y-Richtung

Patentansprüche

1. Ein Verfahren zur Messung von Positionen von Strukturen (3) auf einer Maske (1) und dabei Bestimmen von Maskenherstellungsfehlern umfassend die folgenden Schritte:

- a) dass anhand einer Vielzahl von Messstellen (41) ein Einfluss eines optischen Proximity-Effekts auf eine Positionsmessung von Strukturen (3) auf der Maske (1) mit einer Metrologiemaschine (100) bestimmt wird;
- b) dass ein Bereich auf der Maske (1) aufgrund von Designdaten (52) der Maske (1) ausgewählt wird, der eine Datendarstellung der Strukturen (3) enthält, die von der Metrologiemaschine (100) gemessen werden;
- c) dass ein Rendern eines Bildes der Datendarstellung der Strukturen (3) durchgeführt wird, wobei mindestens ein gerendertes Bild (53) der Designdaten (52) erhalten wird;
- d) dass ein Messtisch (20) der Metrologiemaschine (100) in einer Ebene parallel zu einer Oberfläche der Maske (1) bewegt und dadurch ein Bereich der Maske (1) in ein Bildfeld (17) eines Abbildungssystems der Metrologiemaschine (100) platziert wird, wobei der Bereich der Maske (1) an einer Stelle auf der Maske (1) angeordnet ist, die auf der Maske (1) einer Position des Bereichs der ausgewählten Designdaten (52) der Maske (1) entspricht;
- e) dass zumindest ein optisches Bild (56) des Musters innerhalb des Bereichs auf der Maske (1) mit dem Abbildungssystem der Metrologiemaschine (100) aufgenommen wird; und
- f) dass ein Residuum (58) von dem mindestens einen gerenderten Bild (53) der Strukturen, die den Designdaten (52) der Maske (1) entsprechen, und dem wenigstens einen optischen Bild (56) der Strukturen (3) auf dem spezifischen Bereich der Maske (1) bestimmt wird, wobei das Residuum (58) ein arithmetischer Mittelwert einer Differenz zwischen dem mindestens einen gerenderten Bild (53) und dem mindestens einen korrigierten optischen Bild (56) ist.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei der Einfluss des optischen Proximity-Effekts auf eine Positionsmessung mit der Metrologiemaschine (100) aus mindestens einer Anordnung von Messstellen (41) ermittelt wird, wobei eine erste Messstelle (41₁) mit gleichen Messstellen umgeben ist und mindestens eine zweite Messstelle (41₂) und mindestens eine dritte Messstelle (41₃) an gegenüberliegenden Rändern der Anordnung von Messstellen angeordnet sind.

3. Verfahren nach Anspruch 2, wobei die Anordnung von Messstellen (41) eine erste zentrale Messstelle (41₁) hat, und eine zweite Messstelle (41₂), eine dritte Messstelle (41₃), eine vierte Messstelle (41₄) und eine fünfte Messstelle (41₅) an den Ecken der Anordnung von Messstellen (41) positioniert sind.

4. Verfahren nach Anspruch 2, wobei eine Vielzahl von Anordnungen von Messstellen (41) auf einer Testmaske ausgebildet ist.

5. Verfahren nach Anspruch 2, wobei eine Vielzahl von Dies (36) auf einer Produktionsmaske ausgebildet ist, und einige der Dies (36) eine Anordnung von Messstellen (41) besitzen, wobei die Anordnung von Messstellen (41) ein Array von Kontakten (39) ist.

6. Verfahren nach Anspruch 1, wobei der Proximity-Fehler, der den optischen Proximity-Fehler enthält, der gemessenen Position einer jeden von mindestens zwei der Vielzahl von Messstellen (41) durch eine optische Messung der mindestens zwei Messstellen (41) mit einem optischen System der Metrologiemaschine (100) bestimmt wird.

7. Verfahren nach Anspruch 1, wobei der Einfluss des optischen Proximity-Effekts auf die gemessene Position einer jeden von mindestens zwei Messstellen der Mehrzahl von Messstellen (41) bestimmt wird durch:

- Durchführen eines Renderns eines Bildes aufgrund der Daten einer jeden der mindestens zwei Messstellen (41), wobei zumindest ein gerendertes Bild (53) der Designdaten (52) der Maske (1) für die mindestens zwei Messstellen (41) erhalten wird;
- Aufnehmen wenigstens eines optischen Bildes (56) der mindestens zwei Messstellen (41) auf einer Maske (1) an einer Position, die mit der Position der Messstellen (41) der Designdaten (52) der Maske (1) identisch ist; und
- Subtrahieren des gerenderten Bilds (53) vom erfassten und korrigierten Bild.

8. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Rendern des Bildes auch bei Designdaten der Maske (1) durchgeführt wird, die um 180° gedreht wurden.

9. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Aufnehmen des mindestens einen Bildes auch mit einer um 180° gedrehten Maske (1) durchgeführt wird.

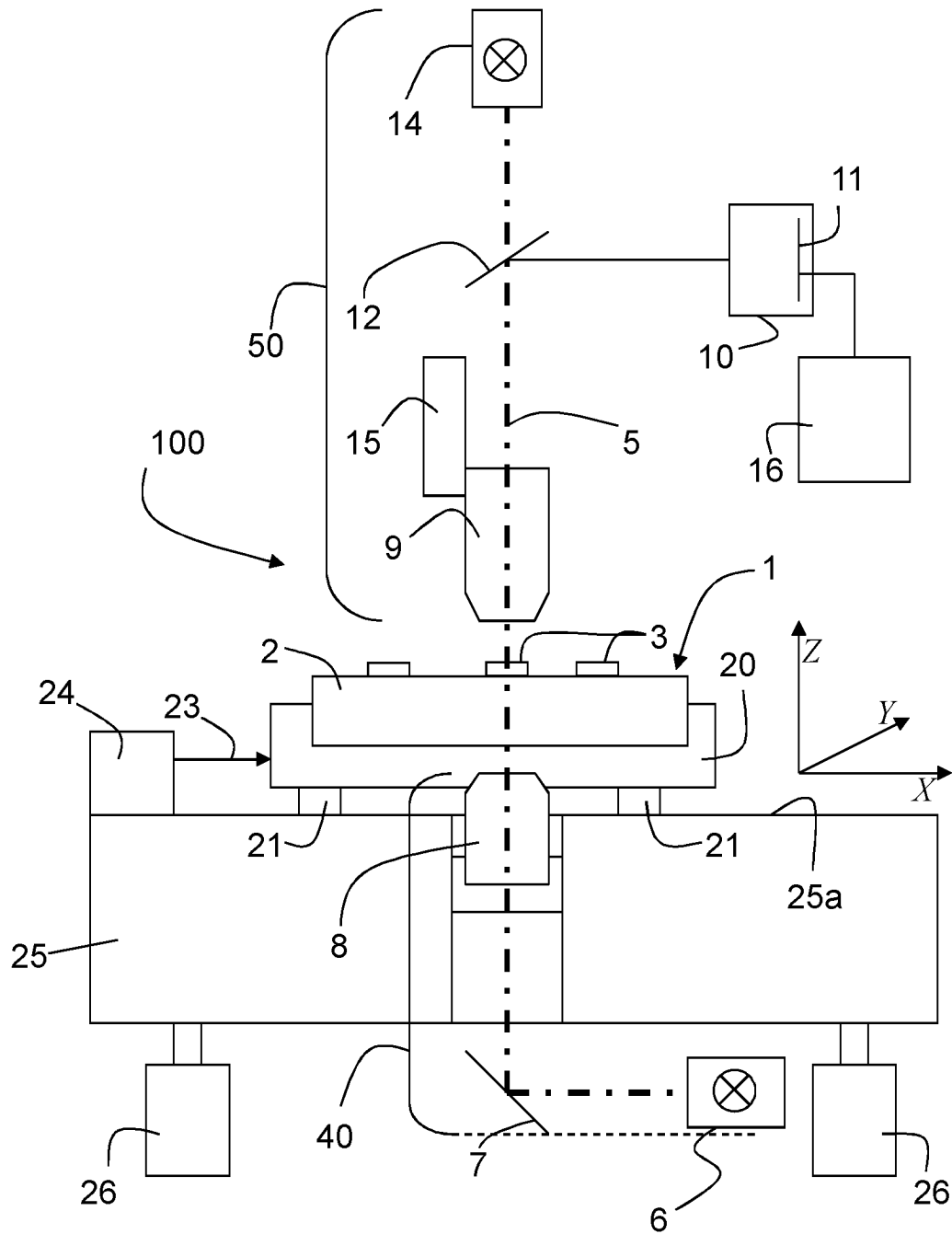
10. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Residuum (58) eine farbcodierte grafische Darstellung einer Abweichung der Lage der Strukturen (3) in X-Richtung und Y-Richtung innerhalb eines Bildfeldes (55) ist und die angezeigte Abweichung lediglich auf Fehlern bei der Maskenherstellung basiert.

11. Verfahren nach Anspruch 1, wobei jedes der aufgenommenen optischen Bilder (56) einer Bildkorrektur unterzogen wird.

12. Verfahren nach Anspruch 11, wobei die Bildkorrektur die Abschattung und die Linsenverzerrung korrigiert.

Es folgen 11 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen



Stand der Technik

Fig. 1

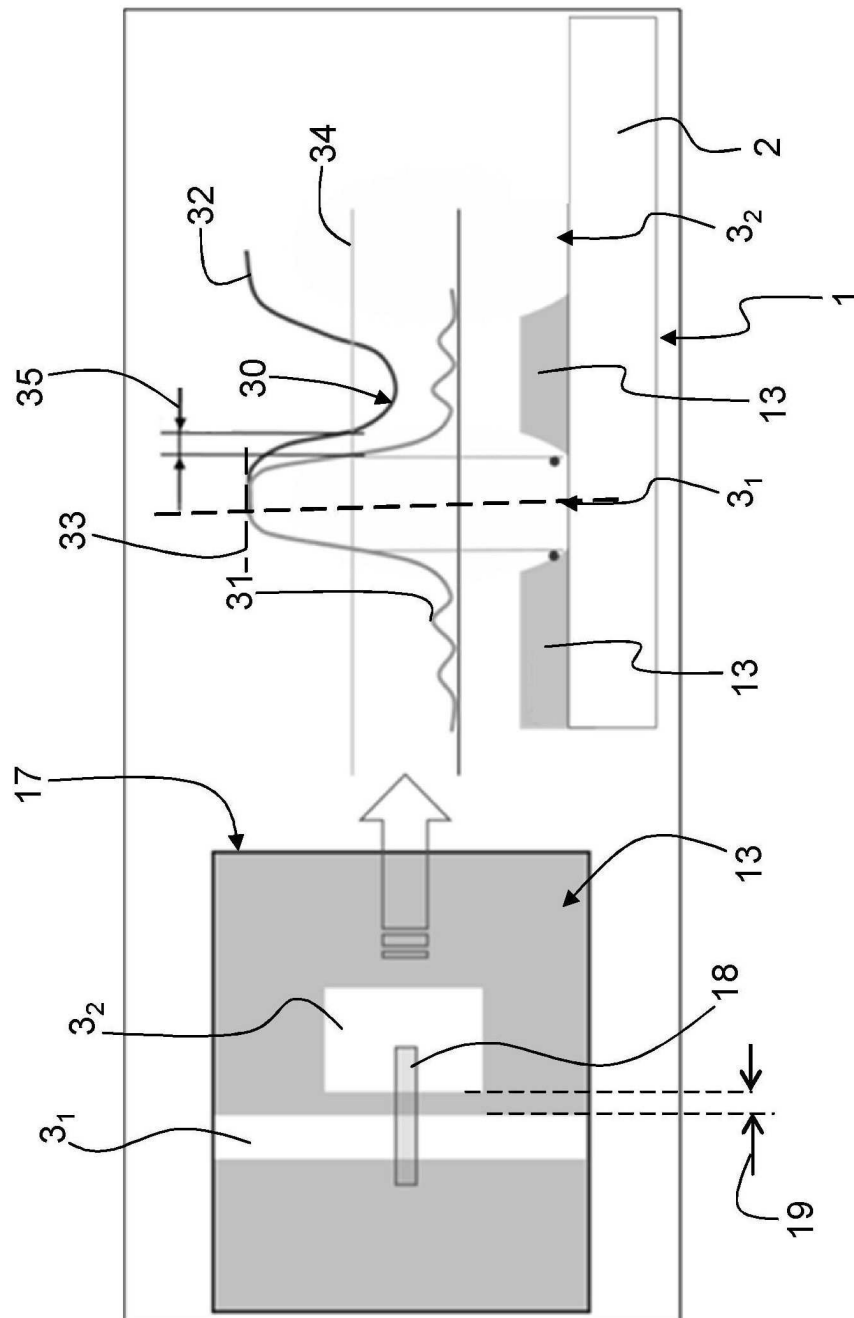


Fig. 2

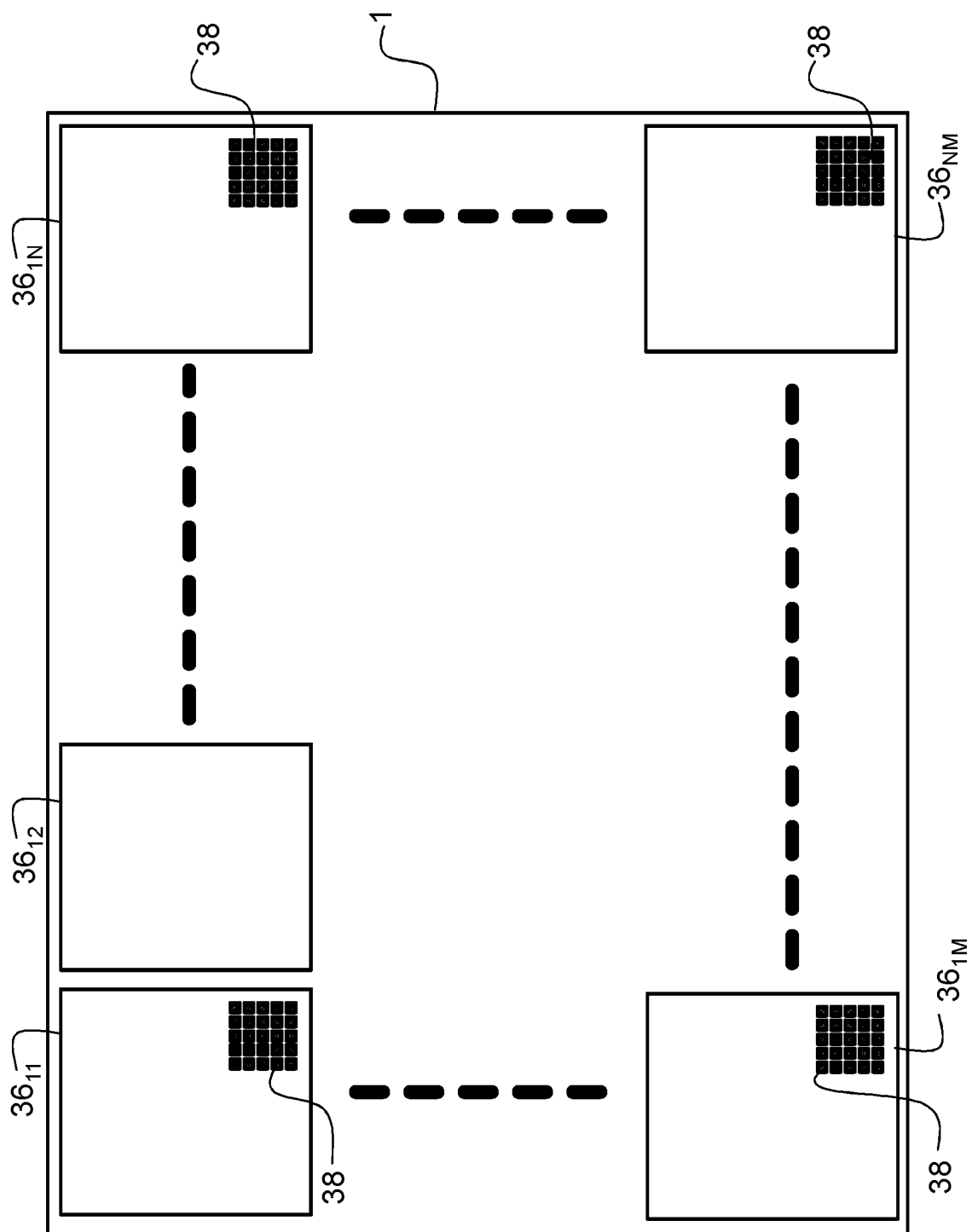


Fig. 3

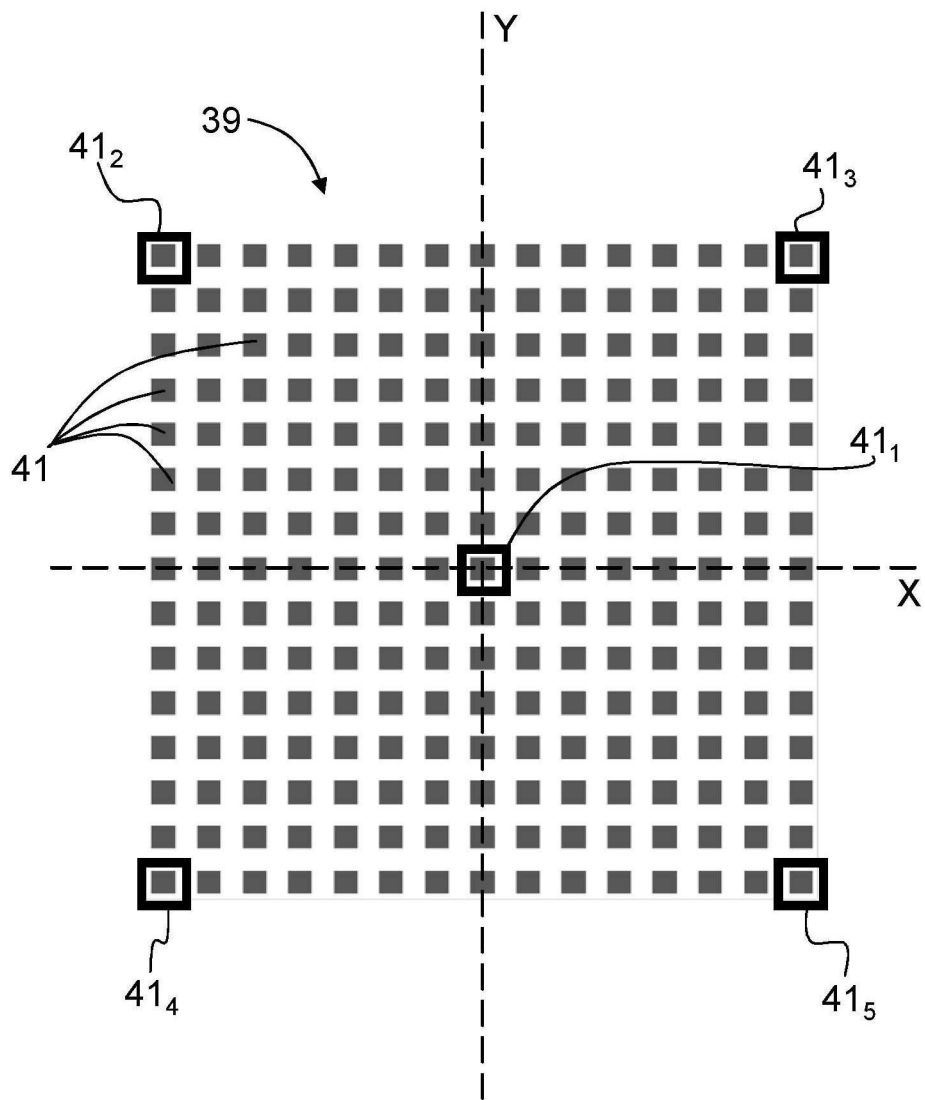


Fig. 4

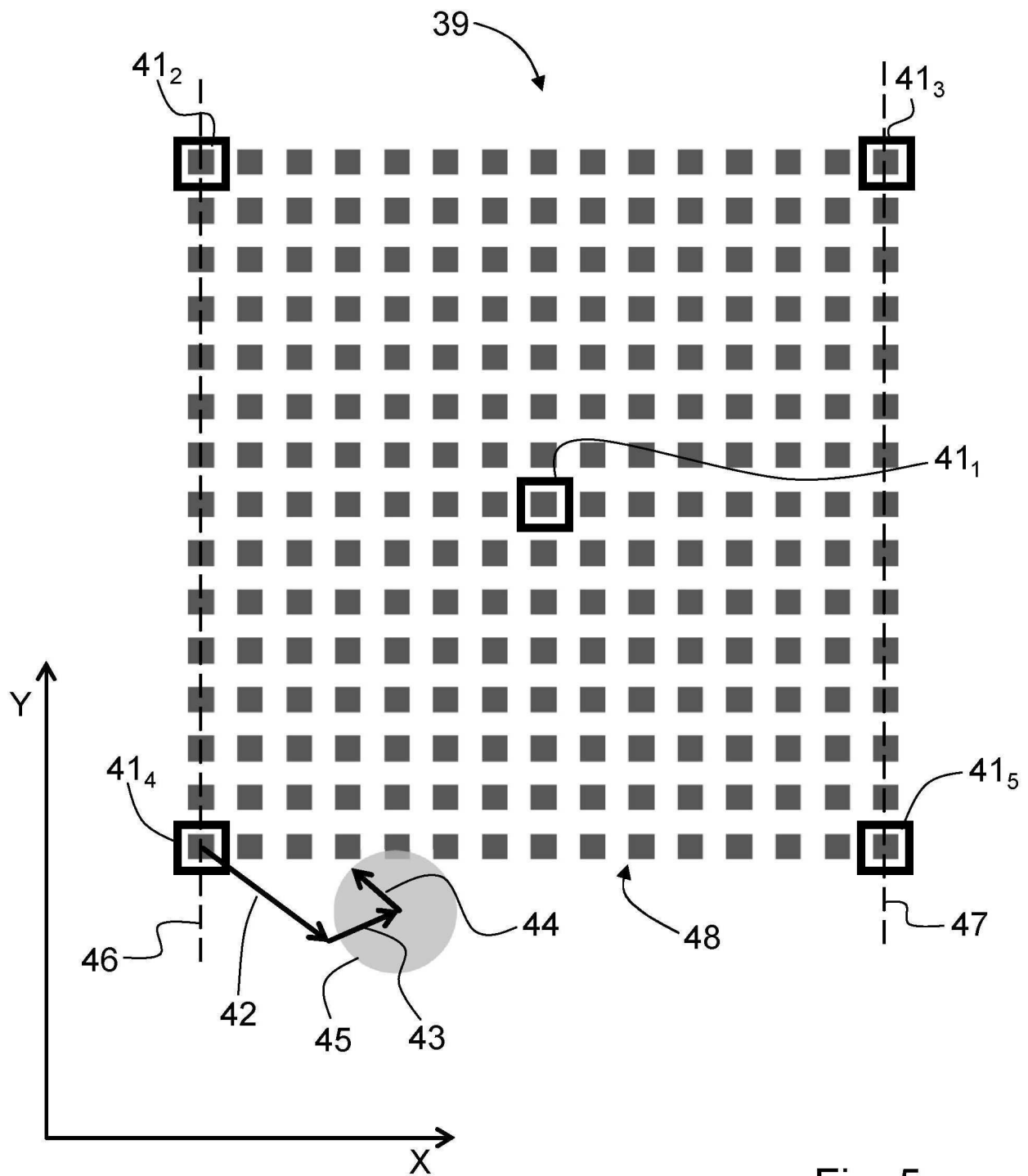


Fig. 5

ERSATZBLATT

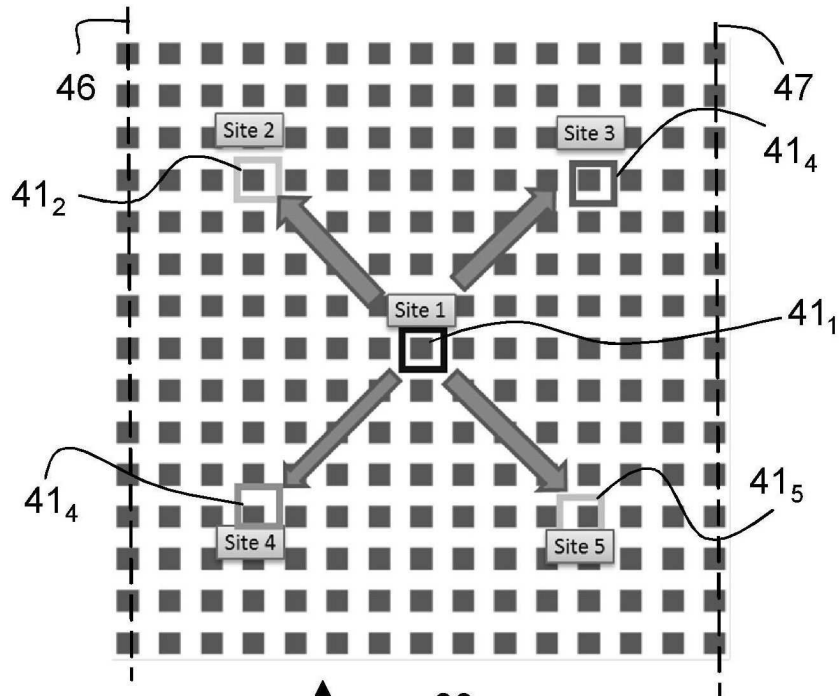


Fig. 6

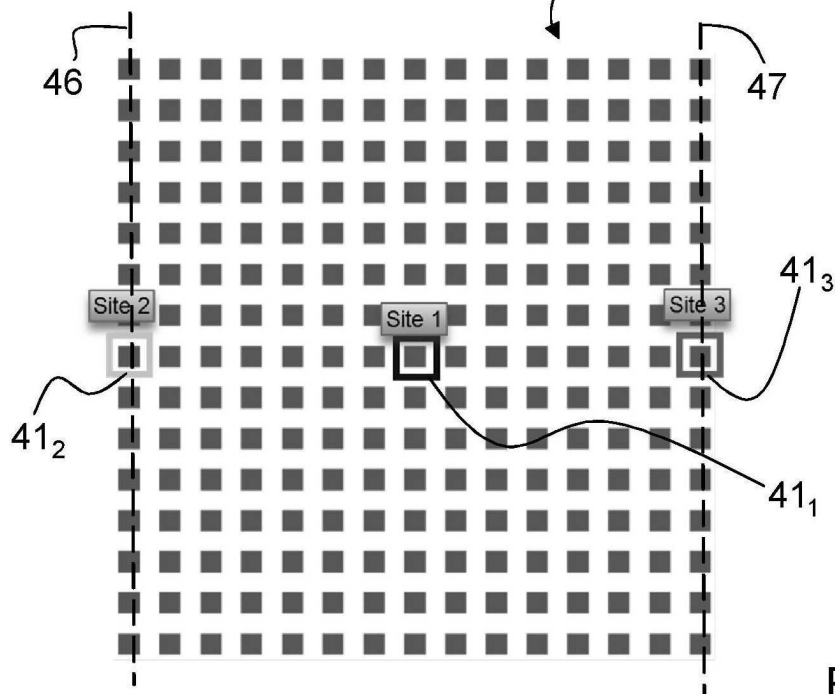


Fig. 7

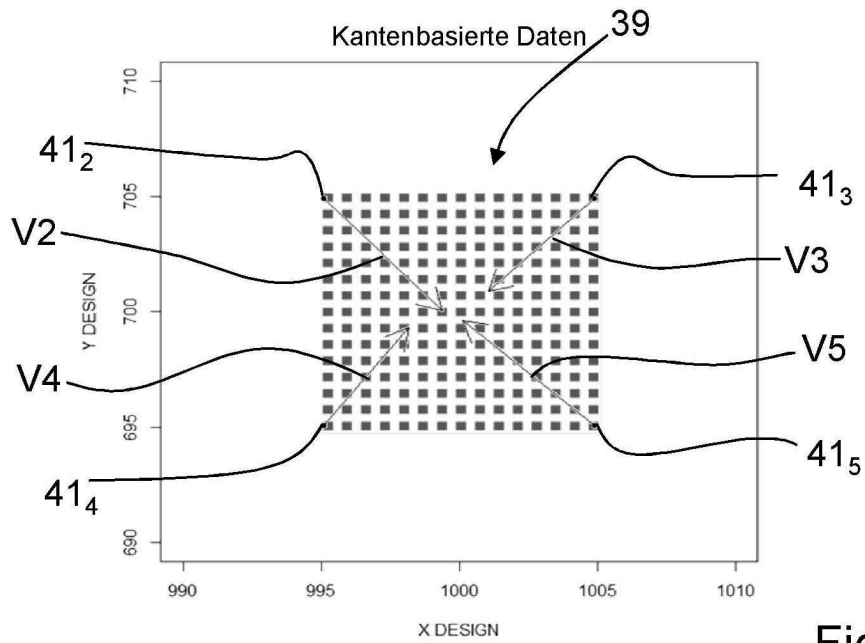


Fig. 8A

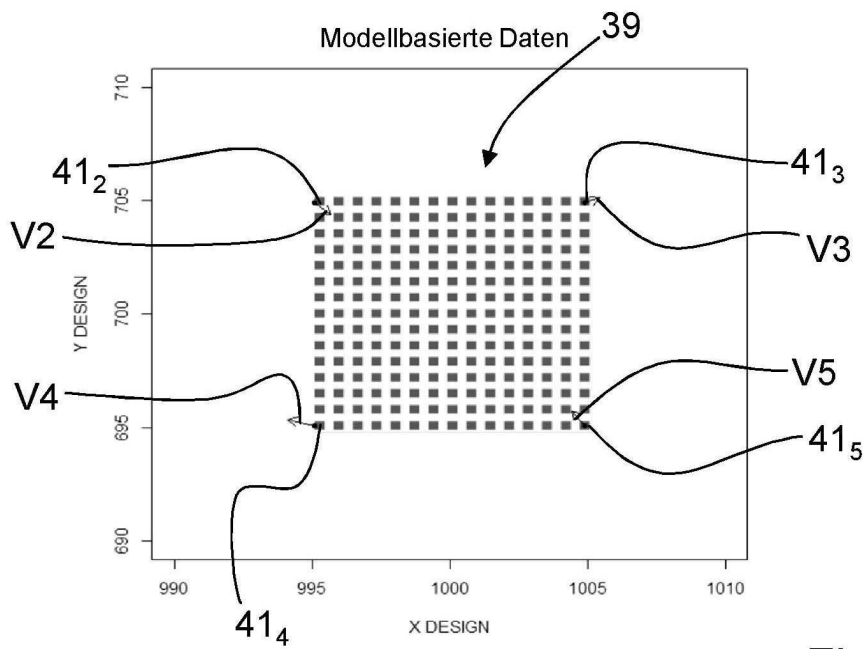


Fig. 8B

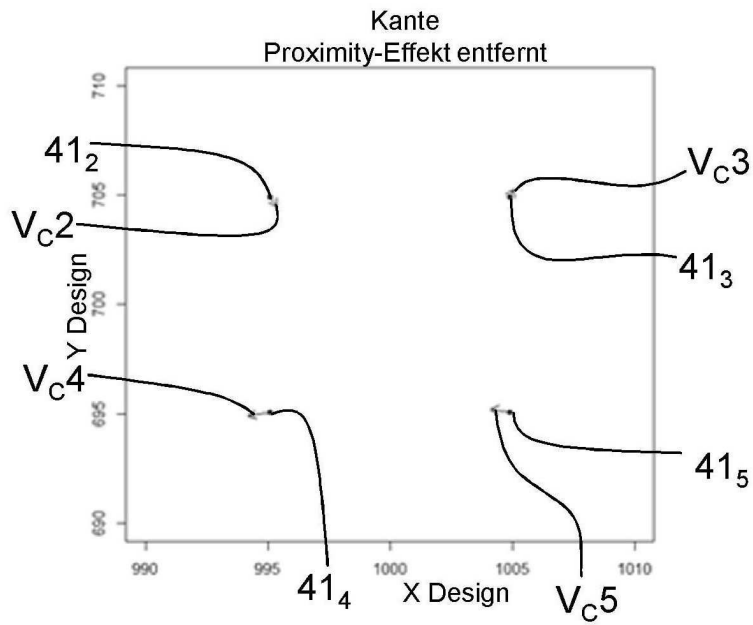


Fig. 9A

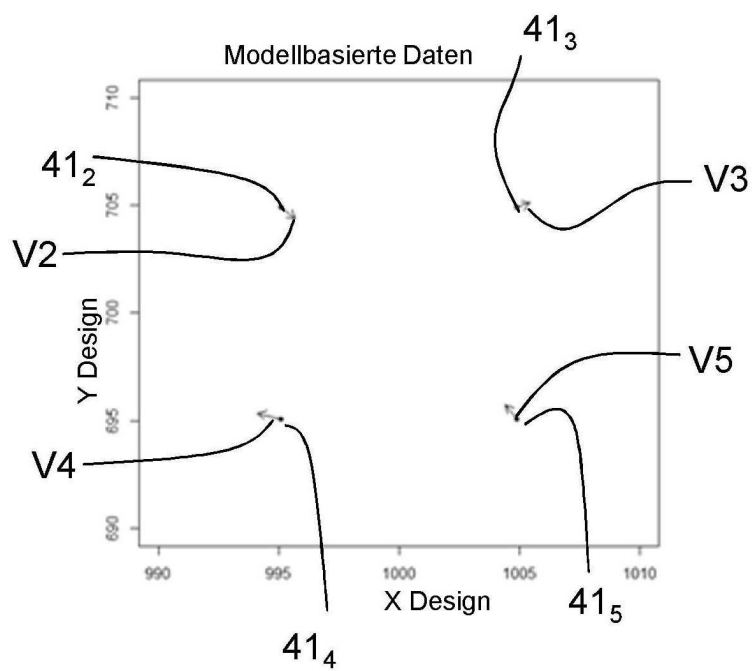


Fig. 9B

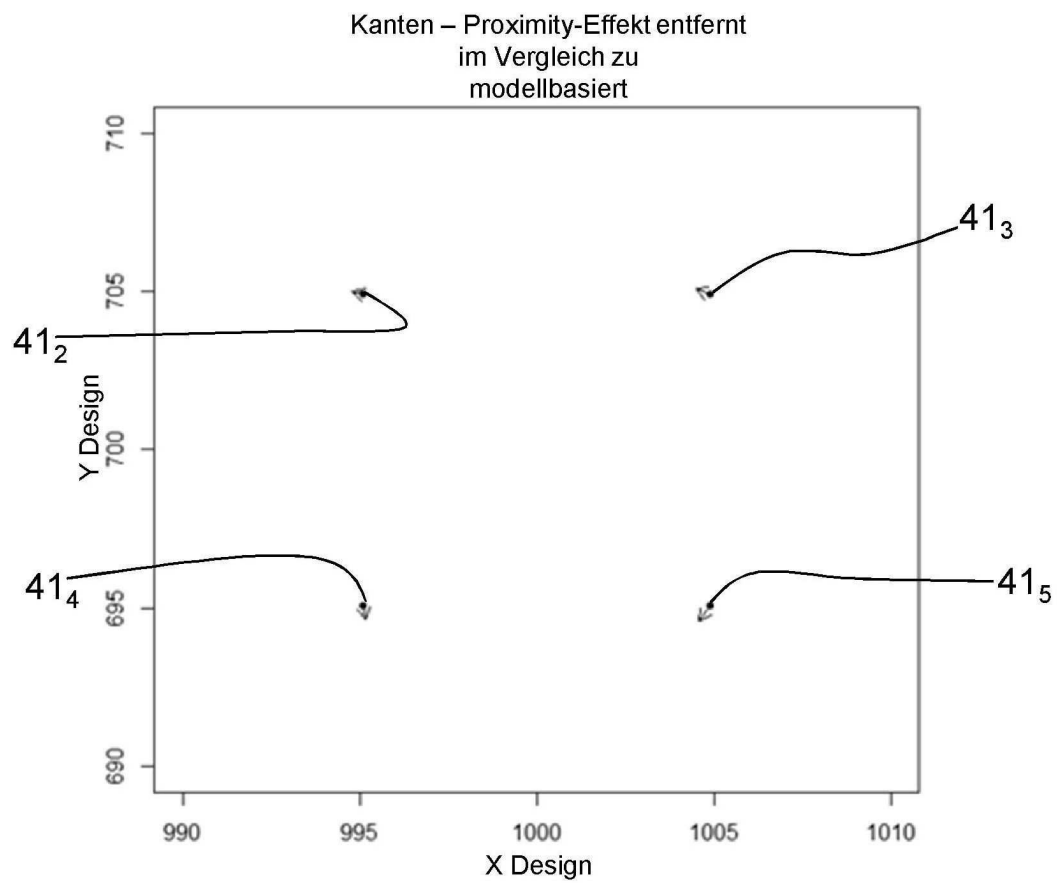


Fig. 10

Kalibrieren der Aberration

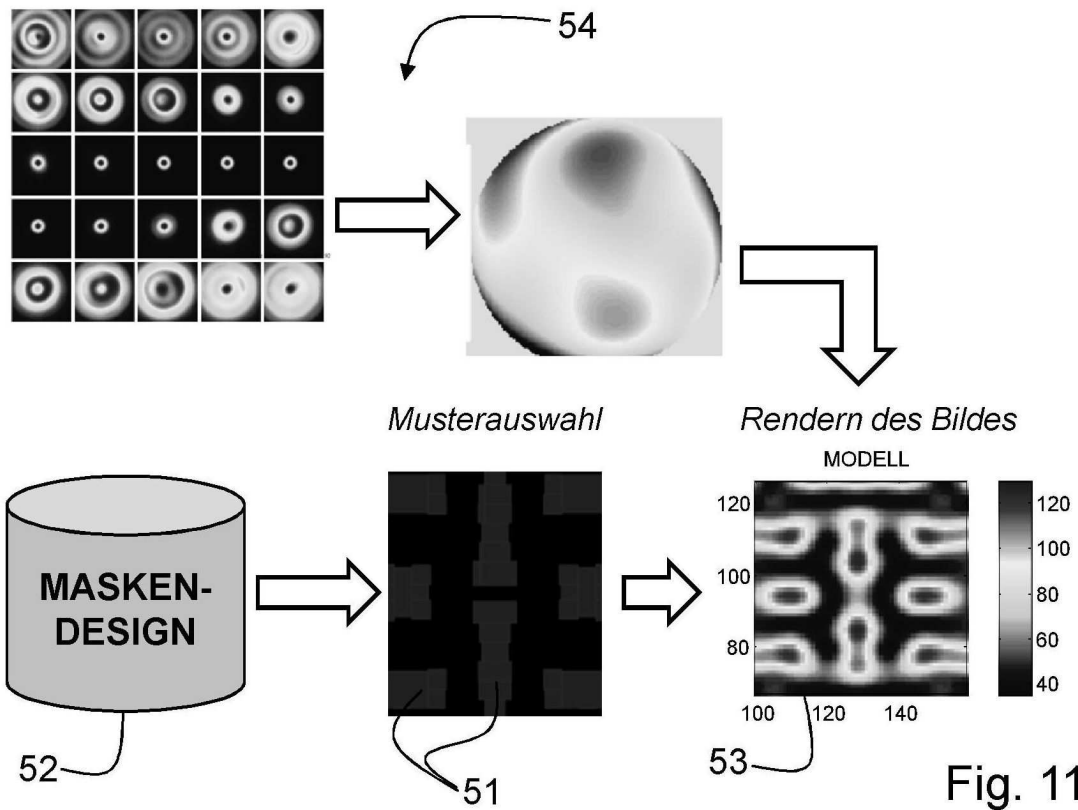


Fig. 11A

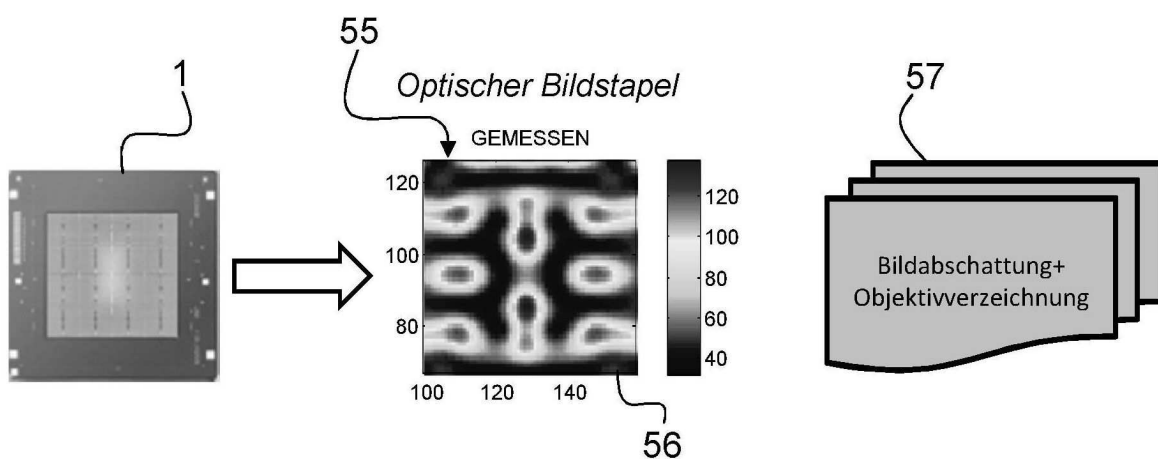


Fig. 11B

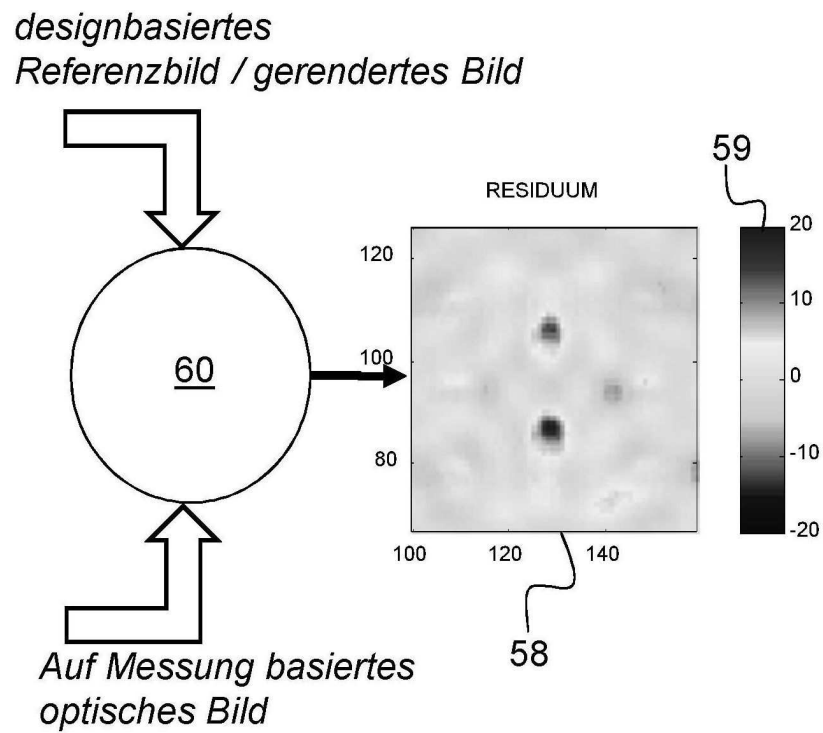


Fig. 12