



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) DE 10 2008 006 687 A1 2008.07.24

(12)

## Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: 10 2008 006 687.7

(22) Anmeldetag: 22.01.2008

(43) Offenlegungstag: 24.07.2008

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: G02B 7/00 (2006.01)

G02B 27/00 (2006.01)

G03F 7/20 (2006.01)

(66) Innere Priorität:

10 2007 004 723.3 22.01.2007

(74) Vertreter:

Witte, Weller & Partner, 70178 Stuttgart

(71) Anmelder:

Carl Zeiss SMT AG, 73447 Oberkochen, DE

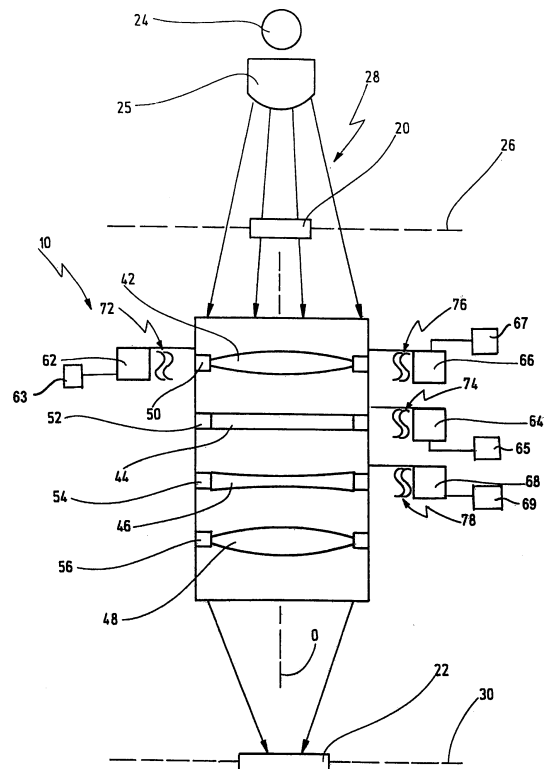
(72) Erfinder:

Conradi, Olaf, Dr., 73463 Westhausen, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: Verfahren zum Verbessern von Abbildungseigenschaften eines optischen Systems sowie optisches System

(57) Zusammenfassung: Es werden ein Verfahren zum Verbessern von Abbildungseigenschaften eines optischen Systems (10) sowie ein derartiges optisches System (10) mit verbesserten Abbildungseigenschaften beschrieben. Das optische System (10) weist eine Mehrzahl von optischen Elementen auf. Zum zumindest teilweisen Korrigieren zumindest eines Abbildungsfehlers wird aus der Mehrzahl der optischen Elemente zumindest ein erstes optisches Element (42) mittels mechanischer Krafteinwirkung (72) lageverstellt und/oder verformt und mittels thermischer Einwirkung (76) verformt oder es wird das zumindest erste optische Element (42) mittels mechanischer Krafteinwirkung (72) lageverstellt und/oder verformt und zumindest ein zweites optisches Element (46) aus der Mehrzahl der optischen Elemente mittels thermischer Einwirkung (78) verformt (Fig. 1).



**Beschreibung**

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Verbessern von Abbildungseigenschaften eines optischen Systems.

**[0002]** Die Erfindung betrifft ferner ein optisches System mit verbesserten Abbildungseigenschaften.

**[0003]** Optische Systeme werden bspw. in Form von Projektionsobjektiven in der Halbleiterlithographie zur Herstellung von feinstrukturierten Bauelementen verwendet. In der vorliegenden Beschreibung wird insbesondere auf ein derartiges Projektionsobjektiv Bezug genommen.

**[0004]** Derartige optische Systeme weisen eine Mehrzahl von optischen Elementen auf, die bspw. als Linsen, Spiegel oder Planparallelplatten mit unterschiedlichsten Reflexions-/Refraktionseigenschaften ausgebildet sein können.

**[0005]** Ein Projektionsobjektiv wird verwendet, um eine Struktur bzw. ein Muster einer Maske (Retikel) auf ein lichtempfindliches Substrat abzubilden. Hierbei wird die Struktur, die in der Objektebene des optischen Systems angeordnet ist, durch eine Beleuchtungsquelle und ihre zugehörige Beleuchtungsoptik beleuchtet. Das durch die Struktur transmittierte Licht wird durch das optische System geleitet und belichtet das lichtempfindliche Substrat, das in der Bildebene des optischen Systems angeordnet ist.

**[0006]** Die auf dem Substrat abzubildenden Strukturen werden heutzutage immer kleiner ausgebildet, um die Integrationsdichte der Strukturen in immer kleiner werdenden Bauelementen zu erhöhen. Daher besteht eine erhöhte Anforderung an optische Systeme, ihre Abbildungseigenschaften und ihr Auflösungsvermögen derart zu verbessern, so dass ihre Abbildungsqualität erhöht wird.

**[0007]** Die Abbildungsqualität eines optischen Systems ist durch in dem optischen System auftretende Abbildungsfehler, wie bspw. Aberrationen, bedingt. Solche Abbildungsfehler können während des Betriebs des optischen Systems thermisch induziert werden, indem sich zumindest ein optisches Element des optischen Systems erwärmt und die Abbildungseigenschaften des optischen Systems verändert.

**[0008]** Infolge der Erwärmung des zumindest einen optischen Elements kann eine irreversible, strahlungsbedingte Veränderung des Materials des zumindest einen optischen Elements auftreten. Beispielsweise führt eine Dichteveränderung des Materials (Kompaktifizierung) zu einer lokalen Veränderung der Brechzahl des optischen Elements. Ferner ist es möglich, dass eine temporäre, reversible Materialveränderung des optischen Elements in Form einer

Brechzahländerung oder auch einer geometrischen Verformung auftreten kann und die Abbildungseigenschaften des optischen Systems beeinflusst.

**[0009]** Abhängig vom Beleuchtungsmodus des optischen Systems kann die Erwärmung des zumindest einen optischen Elements rotationssymmetrisch oder nicht-rotationssymmetrisch relativ zur optischen Achse des optischen Systems sein. Nicht-rotationssymmetrische Erwärmungen werden bspw. durch eine Dipol-Beleuchtung hervorgerufen, die durch eine Maske oder ein Gitter in der Beleuchtungsoptik erzeugt wird.

**[0010]** Es ist bekannt, dass thermisch induzierte Abbildungsfehler mittels einer Verformung der optischen Elemente zumindest teilweise korrigiert werden können. Im Allgemeinen erzeugen solche Verformungen bestimmte Welligkeiten (azimutale Periodizitäten) in den Wellenfrontverläufen der optischen Elemente, mit denen entsprechende Welligkeiten von Wellenfrontfehlerverläufen zumindest teilweise korrigiert werden. Unter Welligkeit (azimutale Periodizität) von Wellenfronten ist das ganzzahlige Vielfache eines Winkels zu  $2\pi$  zu verstehen, wodurch die Wellenfront nach ihrer azimutalen Drehung um den Pupillennormale wieder in sich selbst übergeht.

**[0011]** Es ist aus der WO 99/67683 bekannt, dass eine Linse, die in einer Fassung in einem optischen System angeordnet ist, mittels eines Manipulators mechanisch verformt werden kann. Hierbei weist der Manipulator einen oder mehrere Aktuatoren auf, die an der Linse etwa senkrecht zur optischen Achse angreifen und an ihr nicht-rotationssymmetrische und von der Radialen abweichende Kräfte erzeugen. Auf Grund der sich einstellenden Verbiegung der Linse kann ein Abbildungsfehler induziert werden, der einen Abbildungsfehler des Gesamtsystems kompensiert, so dass gezielt Abbildungsfehler des optischen Systems minimiert werden.

**[0012]** Allerdings hat sich im täglichen Umgang mit mechanischen Manipulatoren herausgestellt, dass durch eine Verformung des optischen Elements nur einfache, d. h. niederwellige Wellenfrontfehlerverläufe korrigiert werden können. Weist das optische Element einen komplizierten Wellenfrontfehlerverlauf auf, ist es erforderlich, dass das optische Element in einer höherwelligen Weise verformt wird. Solch eine Verformung ist mechanisch nur sehr aufwändig zu realisieren. Ferner treten sowohl im optischen Element als auch zwischen dem optischen Element und seiner Fassung mechanische Spannungen auf, die das optische Element bzw. seine Fassung beschädigen können. Hierdurch ist der Einsatzbereich von mechanischen Manipulatoren zum Korrigieren von Abbildungsfehlern stark beschränkt.

**[0013]** Aus der EP 0 678 768 B1 ist eine Projekti-

onsbelichtungsvorrichtung mit mehreren optischen Elementen bekannt. Den optischen Elementen sind thermische Manipulatoren zugeordnet, die an den optischen Elementen umfänglich verteilt angeordnet sind. Die thermischen Manipulatoren wirken einer nicht-rotationssymmetrischen Temperaturverteilung, die das Abbildungsvermögen der Projektionsbelichtungsvorrichtung herabsetzt, durch Kühlen oder Erwärmen von Teilbereichen der optischen Elemente entgegen. Aufgrund der Temperaturänderung der optischen Elemente ändern sich ihre Materialeigenschaften, wie bspw. ihre Wärmeausdehnungskoeffizienten und ihre Brechzahl, und ihre Geometrie.

**[0014]** Ferner ist es möglich, Abbildungsfehler durch Lageverstellen, d. h. durch Verschieben, Verkippen und/oder Drehen der optischen Elemente zu verringern.

**[0015]** Ferner ist aus der US 6,198,579 B1 ein optisches System bekannt, bei dem zumindest einer Linse mehrere thermische Manipulatoren zugeordnet sind. Die Manipulatoren sind an der Linse umfänglich verteilt angeordnet und dazu ausgelegt, durch Kühlen oder Erwärmen der Linse ihre Temperaturverteilung und ihre Geometrie zu verändern. Hierdurch können Abbildungsfehler des optischen Elements zumindest teilweise korrigiert werden. Die Manipulatoren sind als Peltier-Elemente ausgebildet.

**[0016]** Ein Nachteil von thermischen Manipulatoren ist, dass die optimale thermisch bedingte Verformung der optischen Elemente erst verzögert eintritt. Dies beruht auf der Tatsache, dass durch Erwärmen/Kühlen der optischen Elemente erst die gewünschte Temperaturverteilung in den optischen Elementen eingestellt werden muss. Aus der täglichen Erfahrung im Umgang mit thermisch zu verformenden optischen Elementen ist es bekannt, dass die Zeit zwischen der Inbetriebnahme der thermischen Manipulatoren und der gewünschten Verformung der optischen Elemente mehrere Minuten, etwa bis zu zehn Minuten betragen kann. Hierdurch kann es bei der Verwendung des optischen Systems zu erheblichen Verzögerungen kommen.

**[0017]** Ein weiterer Nachteil von thermischen Manipulatoren zum Korrigieren von Abbildungsfehlern ergibt sich durch eine aufwändig zu berechnende Änderung der Abbildungseigenschaften eines optischen Elements aufgrund der induzierten Temperaturveränderung. Werden optische Elemente temperaturbedingt verformt, ändern sich die Abbildungseigenschaften der optischen Elemente, bspw. die Brechzahl, ebenfalls mit der Temperatur. Um eine bestmögliche Korrektur der Abbildungsfehler zu erreichen, muss folglich die durch die Temperatur bedingte Verformung der optischen Elemente bedacht und genauestens gesteuert werden.

**[0018]** Aus US 2006/0244940 A1 ist ein Projektionsobjektiv für die Mikrolithographie bekannt, das sowohl mechanische als auch thermische Manipulatoren umfasst. Der thermische Manipulator besteht aus einer Anordnung von Infrarotlichtemittern, die eines der optischen Elemente so erwärmen, dass eine nicht-rotationssymmetrische Wärmeverteilung in eine rotationssymmetrische Wärmeverteilung überführt wird. Der mechanische Manipulator, der mittels einer mechanischen Krafteinwirkung ein oder mehrere optische Elemente lageverstellt, wird dazu eingesetzt, die nach der thermischen Korrektur verbleibenden rotationssymmetrischen Abbildungsfehler zu korrigieren.

**[0019]** Ferner ist aus US 2006/014662 A1 ein optisches Immersionssystem bekannt, bei dem zur Korrektur von Aberrationen optische Elemente mechanisch und thermisch verformt werden.

**[0020]** Es besteht weiterhin ein Bedürfnis an einem Verfahren zum Verbessern von Abbildungseigenschaften eines optischen Systems, mit dem Abbildungsfehler des optischen Systems wirksam in kurzer Zeit verringert werden können.

**[0021]** Es ist daher eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein solches Verfahren bereitzustellen.

**[0022]** Es ist ferner eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein hinsichtlich der Abbildungseigenschaften verbessertes optisches System bereitzustellen.

**[0023]** Erfindungsgemäß wird die Aufgabe durch ein Verfahren zum Verbessern von Abbildungseigenschaften eines optischen Systems gelöst, wobei das optische System eine Mehrzahl von optischen Elementen aufweist, wobei zum zumindest teilweisen Korrigieren zumindest eines Abbildungsfehlers zumindest ein erstes optisches Element aus der Mehrzahl der optischen Elemente mittels mechanischer Krafteinwirkung lageverstellt und/oder verformt und mittels thermischer Einwirkung verformt wird oder das zumindest erste optische Element mittels mechanischer Krafteinwirkung lageverstellt und/oder verformt und zumindest ein zweites optisches Element aus der Mehrzahl der optischen Elemente mittels thermischer Einwirkung verformt wird.

**[0024]** Des Weiteren wird erfindungsgemäß die Aufgabe durch ein optisches System mit verbesserten Abbildungseigenschaften gelöst, wobei das optische System eine Mehrzahl von optischen Elementen aufweist, wobei der Mehrzahl von optischen Elementen eine Mehrzahl von Manipulatoren zum Lageverstellen und/oder zum aktiven Verformen der Mehrzahl der optischen Elemente zugeordnet ist, wobei zumindest ein erster Manipulator aus der Mehrzahl der Manipulatoren als mechanischer Manipulator und zumindest ein zweiter Manipulator aus der Mehrzahl

der Manipulatoren als thermischer Manipulator ausgebildet ist.

**[0025]** Das erfindungsgemäße Verfahren und das erfindungsgemäße optische System verbessern die Abbildungseigenschaften des optischen Systems, indem zumindest ein erstes optisches Element, das in dem optischen System aufgenommen ist, mittels einer mechanischen Krafteinwirkung lageverstellt und/oder verformt und einer thermischen Einwirkung verformt wird. Alternativ ist es vorgesehen, dass das zumindest erste optische Element mittels mechanischer Krafteinwirkung lageverstellt und/oder verformt und zumindest ein zweites optisches Element, das in dem optischen System aufgenommen ist, mittels thermischer Einwirkung verformt wird. Die mechanischen Krafteinwirkungen bzw. die thermischen Einwirkungen werden mittels mechanischer bzw. thermischer Manipulatoren erzeugt.

**[0026]** Die mechanische Lageverstellung und/oder Verformung und die thermische Verformung des zumindest ersten und/oder zumindest zweiten optischen Elements führt zu einem geänderten Wellenfrontverlauf des optischen Systems, so dass hierdurch zumindest ein Abbildungsfehler zumindest teilweise korrigiert werden kann.

**[0027]** Erfindungsgemäß ist unter einer mechanischen/thermischen Verformung eines optischen Elements eine optische Veränderung seiner Eigenschaften, insbesondere seiner Geometrie und/oder seiner Materialeigenschaften, wie z. B. Brechzahl, Wärmeausdehnungskoeffizient oder dergleichen, zu verstehen.

**[0028]** Unter einer mechanischen Lageverstellung eines optischen Elements ist ein Verschieben entlang oder quer zur optischen Achse, ein Drehen um die optische Achse und/oder ein Verkippen zu verstehen.

**[0029]** Die optischen Elemente können bspw. als Linsen, Spiegel oder Planparallelplatten mit unterschiedlichsten Refraktions- und Reflektionseigenschaften ausgebildet sein.

**[0030]** Durch eine Lageverstellung und/oder Verformung von optischen Elementen mittels mechanischer Krafteinwirkung und Verformung mittels thermischer Einwirkung ergeben sich vorteilhafterweise zwei verschiedene Möglichkeiten, Grundordnungen und höhere Ordnungen von Abbildungsfehlern des optischen Systems zu korrigieren. Beide Arten, ein optisches Element zu verformen oder lagezuverstellen, sind ausreichend bekannt und können gut steuerbar und gezielt zum Korrigieren von Wellenfrontfehlerverläufen des optischen Systems eingesetzt werden.

**[0031]** Ein weiterer Vorteil beruht darauf, dass ein

thermisches Verformen eines optischen Elements dann eingesetzt werden kann, wenn ein mechanisches Verformen zu einer Beschädigung des optischen Elements oder seiner Fassung führen würde. Die thermische Verformung des optischen Elements ermöglicht somit eine Korrektur von Abbildungsfehlern, die eine einfache mechanische Verformung nicht zulassen würde.

**[0032]** Ferner verringert eine gleichzeitig durchgeführte mechanische Lageverstellung und/oder Verformung und thermische Verformung von optischen Elementen die für eine Korrektur von Abbildungsfehlern nötige Zeit.

**[0033]** In einer bevorzugten Ausgestaltung wird das zumindest erste optische Element zeitlich überlagert mittels mechanischer Krafteinwirkung lageverstellt und/oder verformt und mittels thermischer Einwirkung verformt oder es wird das zumindest erste optische Element mittels mechanischer Krafteinwirkung lageverstellt und/oder verformt und zeitlich überlagert das zumindest zweite optische Element mittels thermischer Einwirkung verformt.

**[0034]** Diese Maßnahme hat den Vorteil, dass komplizierte Wellenfrontfehlerverläufe des optischen Systems im Zusammenspiel einer mechanisch und einer thermisch induzierten Manipulation eines optischen Elements optimal korrigiert werden können.

**[0035]** In einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung wird das zumindest erste optische Element mittels einer zeitlich konstanten mechanischen Krafteinwirkung lageverstellt und/oder verformt.

**[0036]** Diese Maßnahme hat den Vorteil, dass die mechanische Krafteinwirkung auf einfache und leicht kontrollierbare Weise bereitgestellt werden kann. Die Korrekturwirkung einer zeitlich konstanten mechanischen Krafteinwirkung auf optische Elemente ist ausreichend bekannt und kann daher gut vorhergesagt werden. Ferner sind die technischen Anforderungen an mechanische Manipulatoren, die eine zeitlich konstante mechanische Krafteinwirkung erzeugen, geringer als bei solchen Manipulatoren, die eine zeitlich veränderliche mechanische Krafteinwirkung erzeugen.

**[0037]** In einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung wird das zumindest erste optische Element und/oder das zumindest zweite optische Element mittels einer zeitlich veränderlichen thermischen Einwirkung, beispielsweise mittels einer zeitlich linear ansteigenden thermischen Einwirkung, verformt.

**[0038]** Diese Maßnahme hat den Vorteil, dass die thermische Einwirkung optimal an die zeitlich veränderlichen Wellenfrontfehlerverläufe des optischen Systems angepasst werden können. Hierdurch kön-

nen die Abbildungsfehler des optischen Systems besonders gut korrigiert werden.

**[0039]** In einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung wird die mechanische Krafteinwirkung zur Lageverstellung und/oder Verformung des ersten optischen Elements in einer Zeitdauer von weniger als 1 Sekunde, vorzugsweise von weniger als 500 Millisekunden, weiter vorzugsweise von weniger als 100 Millisekunden eingestellt und/oder variiert.

**[0040]** Bei dem optischen System ist dem zumindest einen mechanischen Manipulator eine Steuerungsvorrichtung zugeordnet, die den mechanischen Manipulator in einer Zeitdauer von weniger als 1 Sekunde, vorzugsweise von weniger als 500 Millisekunden, weiter vorzugsweise von weniger als 100 Millisekunden zur Einstellung und/oder Variation der mechanischen Krafteinwirkung aktuiert. Außerhalb dieser Zeitdauer befindet sich der Manipulator jeweils im Ruhezustand.

**[0041]** Der zumindest eine mechanische Manipulator wird somit nur über eine minimale Zeitdauer angesteuert, um die gewünschte Krafteinwirkung einzustellen und/oder zu variieren, um das erste optische Element beispielsweise lagezuverstellen und/oder zu verformen, und unmittelbar danach wird die Aktuierung des mechanischen Manipulators unterbrochen, so dass sich eine eingestellte mechanische Kraftwirkung ergibt. Diese eingestellte mechanische Kraftwirkung ist konstant und kann betragsmäßig einen Wert größer als Null oder annähernd gleich Null haben. Diese kurzzeitigen Aktuierungen des mechanischen Manipulators haben den Vorteil, dass die durch die Aktuierung des mechanischen Manipulators erzeugten Schwingungen oder Vibrationen im optischen System abklingen können, bevor das optische System, insbesondere wenn dies ein Projektionsobjektiv für die Mikrolithographie ist, zum Belichten eines Substrats verwendet wird. Das Substrat, auch als Wafer bezeichnet, ist in eine Mehrzahl von einzelnen Bereichen unterteilt, die auch als „Die“ bezeichnet werden. Üblicherweise wird jedes Die einzeln nacheinander belichtet. Vor dem Beginn einer „Die“-Belichtung wird durch die vorstehend genannte Maßnahme gewährleistet, dass die durch die Aktuierung des mechanischen Manipulators hervorgerufenen Schwingungen abgeklungen sind.

**[0042]** In einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung wird die mechanische Krafteinwirkung zur Lageverstellung und/oder Verformung des ersten optischen Elements in zeitlichen Abständen  $\Delta t_{\text{mech}}$  angepasst.

**[0043]** Diese Ausgestaltung stellt den Fall einer intervallweisen Einstellung und/oder Variation der mechanischen Krafteinwirkung auf das erste optische Element dar. Die zeitlichen Abstände  $\Delta t_{\text{mech}}$  sind dabei vorzugsweise an die zeitlichen Abstände der Be-

lichtung der einzelnen Dies angepasst. Mit anderen Worten wird der mechanische Manipulator „Die für Die“ angesteuert, um die Lage oder Verformung des ersten optischen Elements an die aufgrund der Erwärmung der optischen Elemente des Systems erforderliche Abbildungskorrektur anzupassen.

**[0044]** Bei dem optischen System aktuiert die zuvor genannte Steuerungsvorrichtung entsprechend den zumindest einen mechanischen Manipulator in zeitlichen Abständen  $\Delta t_{\text{mech}}$  wieder. Die zeitlichen Abstände  $\Delta t_{\text{mech}}$  der Ansteuerung bzw. Aktuierung des mechanischen Manipulators sind somit größer als die Zeitdauer der Aktuierung selbst, und liegen im Mittel beispielsweise im Bereich von 1 bis 5 Sekunden, was dem zeitlichen Abstand der Einzelbelichtung jedes einzelnen Dies entspricht.

**[0045]** In einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung wird die thermische Einwirkung auf das erste und/oder zweite optische Element kontinuierlich durchgeführt.

**[0046]** Ein thermischer Manipulator ist im Unterschied zu dem mechanischen Manipulator nicht mit dem Problem von Schwingungen und Vibrationen behaftet. Der thermische Manipulator kann daher kontinuierlich aktuiert werden, um thermische Zeitkonstanten zu verringern.

**[0047]** Aber auch im Fall des thermischen Manipulators kann es bevorzugt sein, wenn die thermische Einwirkung auf das erste und/oder zweite optische Element in zeitlichen Abständen  $\Delta t_{\text{therm}}$  durchgeführt wird.

**[0048]** Bei dem optischen System ist entsprechend auch für den zumindest einen thermischen Manipulator eine Steuerungsvorrichtung zugeordnet, die den thermischen Manipulator kontinuierlich oder in zeitlichen Abständen  $\Delta t_{\text{therm}}$  aktuiert.

**[0049]** Vorzugsweise werden die zeitlichen Abstände  $\Delta t_{\text{therm}}$  und  $\Delta t_{\text{mech}}$  der Aktuierung der mechanischen Krafteinwirkung und der thermischen Einwirkung so gewählt, dass das Verhältnis  $\Delta t_{\text{therm}}/\Delta t_{\text{mech}}$  im Bereich von 0 bis etwa 10 liegt. Der Wert 0 bedeutet dabei eine kontinuierliche Aktuierung des thermischen Manipulators, ein Wert von etwa 1 einer Aktuierung des mechanischen Manipulators und des thermischen Manipulators in gleichen zeitlichen Abständen, beispielsweise „Die für Die“, und ein Wert von größer 1, beispielsweise 7 bis 10, bedeutet, dass der thermische Manipulator für die Zeitdauer einer vollständigen Waferbelichtung aktuiert wird, also die Aktuierung des thermischen Manipulators nicht nach jeder einzelnen Belichtung eines einzelnen Dies unterbrochen wird, während dies für den mechanischen Manipulator weiterhin der Fall ist.

**[0050]** In einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung wird die thermische Einwirkung derart durchgeführt, dass sie eine rotationssymmetrische Temperaturverteilung in dem zumindest ersten optischen Element und/oder in dem zumindest zweiten optischen Element erzeugt.

**[0051]** Diese Maßnahme hat den Vorteil, dass aufgrund der sich in den optischen Elementen einstellenden rotationssymmetrischen Temperaturverteilung Abbildungsfehler des optischen Systems korrigiert werden, die auf einer rotationssymmetrischen Erwärmung der optischen Elemente beruhen.

**[0052]** In einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung wird die thermische Einwirkung derart durchgeführt, dass sie eine nicht-rotationssymmetrische Temperaturverteilung in dem zumindest ersten optischen Element und/oder in dem zumindest zweiten optischen Element erzeugt.

**[0053]** Diese Maßnahme hat den Vorteil, dass mittels einer in den optischen Elementen induzierten, nicht-rotationssymmetrischen Temperaturverteilung Abbildungsfehler korrigiert werden können, die auf einer nicht-rotationssymmetrischen Erwärmung der optischen Elemente beruhen, wie sie bspw. durch Beleuchtungspole erzeugt werden.

**[0054]** In einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung wird die thermische Einwirkung derart durchgeführt, dass sie eine Temperaturänderung in einem Randbereich des zumindest ersten optischen Elements und/oder des zumindest zweiten optischen Elements erzeugt.

**[0055]** Diese Maßnahme hat den Vorteil, dass die Temperaturänderung in dem optisch nicht genutzten Bereich der optischen Elemente bereitgestellt wird. Ausgehend von den Randbereichen kann sich die induzierte Temperaturänderung in den gesamten optischen Elementen ausdehnen.

**[0056]** In einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung wird die mechanische Kraftereinwirkung derart durchgeführt, dass sie einen Wirkungsbereich der thermischen Einwirkung erweitert.

**[0057]** Diese Maßnahme hat den Vorteil, dass im Unterschied zu einer nur mechanisch induzierten oder nur thermisch induzierten Verformung des optischen Elements eine stärkere Verformung erreicht wird.

**[0058]** In einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung werden die mechanische Kraftereinwirkung und die thermische Einwirkung derart durchgeführt, dass sie eine Zeitspanne zwischen einer Ist- und Soll-Korrektur des zumindest einen Abbildungsfehlers minimieren.

**[0059]** Diese Maßnahme hat den Vorteil, dass das zumindest teilweise Korrigieren des zumindest einen Abbildungsfehlers schnell erfolgt. Hierdurch verringern sich vorteilhafterweise Wartungszeiten während des Betriebs des optischen Systems.

**[0060]** In einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung werden vor dem zumindest teilweisen Korrigieren des zumindest einen Abbildungsfehlers der zumindest eine Abbildungsfehler bestimmt.

**[0061]** Diese Maßnahme hat den Vorteil, dass basierend auf der Kenntnis des Abbildungsfehlers dieser optimal verbessert werden kann.

**[0062]** In einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung wird der zumindest eine Abbildungsfehler durch unmittelbares Messen eines Wellenfrontverlaufes bestimmt.

**[0063]** Diese Maßnahme hat den Vorteil, dass der Abbildungsfehler auf einfache Weise ohne weiteren technischen Aufwand bestimmt werden kann.

**[0064]** In einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung wird der zumindest eine Abbildungsfehler durch Abschätzen einer feld- und beugungswinkelabhängigen Lichtverteilung in dem optischen System bestimmt.

**[0065]** Diese Maßnahme hat den Vorteil, dass hierdurch eine weitere Methode zum Bestimmen des zumindest einen Abbildungsfehlers bereitgestellt wird, die auf einfache Weise durchgeführt werden kann. Das Abschätzen der Lichtverteilung im optischen System verwendet eine Kenntnis von Schicht- und Volumenabsorptionskoeffizienten der optischen Elemente. Ausgehend von der Beleuchtungsweise der Struktur durch die Beleuchtungsquelle und Beleuchtungsoptik wird die in den optischen Elementen absorbierte Intensität und die Temperaturverteilung der optischen Elemente bestimmt. Hieraus können die Wärmeausdehnungskoeffizienten und die Brechzahlen der optischen Elemente berechnet werden, um auf den Wellenfrontfehlerverlauf des optischen Systems zurückzuschließen.

**[0066]** In einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung wird der zumindest eine Abbildungsfehler durch Vergleichen der feld- und beugungswinkelabhängigen Lichtverteilung in dem optischen System mit der feld- und beugungswinkelabhängigen Lichtverteilung von Referenzmessungen bestimmt.

**[0067]** Diese Maßnahme hat den Vorteil, dass eine noch weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Abbildungsfehler bereitgestellt wird, die auf einfache Weise ausgeführt werden kann. Da die Abbildungsfehler der Referenzlichtverteilungen bekannt sind, kann direkt auf den zumindest einen Abbildungsfehler des optischen Systems geschlossen werden.

**[0068]** In einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung wird der zumindest eine Abbildungsfehler durch Messen der feld- und beugungswinkelabhängigen Lichtverteilung in zumindest einer Ebene des optischen Systems mittels eines Detektors bestimmt.

**[0069]** Diese Maßnahme stellt eine noch weitere einfach durchführbare Möglichkeit zum Bestimmen der Abbildungsfehler des optischen Systems bereit. Vorzugsweise wird das Messen der Lichtverteilung vor einer Substratbelichtung durchgeführt, wobei ein Detektor, wie z. B. eine CCD-Kamera, verwendet wird. Die Lichtverteilung kann bspw. in einer pupillenahen, feldnahen und/oder intermediären Ebene des optischen Systems gemessen werden.

**[0070]** In einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung wird eine zeitliche Entwicklung des zumindest einen Abbildungsfehlers bestimmt, nachdem der zumindest eine Abbildungsfehler bestimmt worden ist und bevor das zumindest teilweise Korrigieren des zumindest einen Abbildungsfehlers durchgeführt wird.

**[0071]** Diese Maßnahme ermöglicht ein optimales Korrigieren des Abbildungsfehlers aufgrund der Kenntnis der zukünftig auftretenden Abbildungsfehler.

**[0072]** In einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung wird eine Kenntnis des zumindest einen Abbildungsfehlers verwendet, um die zeitliche Entwicklung des zumindest einen Abbildungsfehlers zu bestimmen.

**[0073]** Diese Maßnahme hat den Vorteil, dass die zukünftige zeitliche Entwicklung des Abbildungsfehlers basierend auf dem vorhandenen Abbildungsfehler genauestens vorhergesagt werden kann. Ferner können zusätzlich bereits aufgetretene Abbildungsfehler zu früheren Zeitpunkten bei der Vorhersage der zeitlichen Entwicklung des zumindest einen Abbildungsfehlers berücksichtigt werden, so dass das Vorhersagen der zeitlichen Entwicklung noch präziser erfolgen kann.

**[0074]** In einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung wird zum zumindest teilweisen Korrigieren des zumindest einen Abbildungsfehlers eine bestmöglichst erreichbare Korrektur bestimmt.

**[0075]** Diese Maßnahme ermöglicht eine optimale Korrektur des Abbildungsfehlers unter Einbeziehen aller möglichen, durchführbaren Korrekturen.

**[0076]** Bei dem erfindungsgemäßen optischen System kann gemäß den in den Ansprüchen angegebenen bevorzugten Ausgestaltungen des optischen Systems das zuvor beschriebene Verfahren zum Verbessern der Abbildungseigenschaften des optischen Systems angewendet werden.

**[0077]** Weitere Vorteile und Merkmale ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung und der beigefügten Zeichnung.

**[0078]** Es versteht sich, dass die vorstehend genannten und die nachfolgend noch zu erläuternden Merkmale nicht nur in den angegebenen Kombinationen, sondern auch in anderen Kombinationen oder in Alleinstellung einsetzbar sind, ohne den Rahmen der vorliegenden Erfindung zu verlassen.

**[0079]** Die Erfindung wird nachfolgend anhand einiger ausgewählter Ausführungsbeispiele im Zusammenhang mit der beiliegenden Zeichnung näher beschrieben und erläutert. Es zeigen:

**[0080]** [Fig. 1](#) eine schematische Darstellung eines optischen Systems während einer Belichtung eines Substrats;

**[0081]** [Fig. 2](#) eine schematische Darstellung einer zumindest teilweisen Korrektur zumindest eines Abbildungsfehlers; und

**[0082]** [Fig. 3](#) ein Flussdiagramm eines erfindungsgemäßen Verfahrens zum Verbessern von Abbildungseigenschaften des optischen Systems.

**[0083]** In [Fig. 1](#) ist ein mit dem allgemeinen Bezugszeichen **10** versehenes optisches System dargestellt, das eine Abbildung von einer Struktur **20** oder einem Muster einer Maske (Retikel) auf ein lichtempfindliches Substrat **22** erlaubt.

**[0084]** Ein derartiges optisches System **10** kann als Projektionsobjektiv zum Herstellen feinstrukturierter Bauelemente in der Mikrolithographie verwendet werden.

**[0085]** Eine Beleuchtungsquelle **24**, der eine Beleuchtungsoptik **25** zugeordnet ist, beleuchtet die Struktur **20**, die in einer Objektebene **26** des optischen Systems **10** angeordnet ist. Lichtstrahlen **28** werden durch Teilbereiche der Struktur **20** transmittiert und treffen auf das optische System **10**. Das optische System **10** bildet die Struktur **20** verkleinert auf das lichtempfindliche Substrat **22** ab, das in einer Bildebene **30** des optischen Systems **10** angeordnet ist.

**[0086]** Das optische System **10** weist eine Mehrzahl von optischen Elementen, in der schematischen Darstellung vier optische Elemente **42–48** auf, die als Linsen, Spiegel oder Planparallelplatten unterschiedlichster Refraktions- und Reflexionseigenschaften ausgebildet sein können. Jedes optische Element **42–48** ist in jeweils einer Fassung **50–56** in dem optischen System **10** aufgenommen.

**[0087]** Während des Betriebs des optischen Systems **10** kann zumindest ein Abbildungsfehler durch

eine Erwärmung eines oder mehrerer optischer Elemente **42–48** auftreten. Infolge der Erwärmung können sich strahlungsbedingt Materialeigenschaften der optischen Elemente **42–48** irreversibel verändern. Beispielsweise kann sich die Dichte der optischen Elemente **42–48** ändern (Kompaktifizierung, Verdünnung), so dass hierdurch Brechzahlen oder Wärmeausdehnungskoeffizienten der optischen Elemente **42–48** verändert werden. Ferner kann die Erwärmung der optischen Elemente **42–48** zu einer temporären Geometrie- und Materialeigenschaftenveränderung führen.

**[0088]** Die Erwärmung der optischen Elemente **42–48** kann rotationssymmetrisch oder nicht-rotationssymmetrisch relativ zu einer optischen Achse O des optischen Systems **10** auftreten. Nicht-rotationssymmetrische Erwärmungen werden bspw. durch eine Maske oder ein Gitter in der Beleuchtungsoptik **25** hervorgerufen, wobei durch diese Beleuchtungspole für das optische System erzeugt werden können.

**[0089]** Das erfindungsgemäße Verfahren dient zum Verbessern der Abbildungseigenschaften des optischen Systems **10**, indem zumindest ein Abbildungsfehler des optischen Systems **10** korrigiert wird.

**[0090]** Hierzu weist das optische System **10** eine Mehrzahl von Manipulatoren, in der schematischen Darstellung vier Manipulatoren **62–68** auf, die der Mehrzahl der optischen Elemente zugeordnet sind. Die Manipulatoren **62–68** können als mechanische Manipulatoren **62, 64** oder als thermische Manipulatoren **66, 68** ausgebildet sein.

**[0091]** Es kann bspw. einem optischen Element **42** zumindest ein mechanischer Manipulator **62** und zumindest ein thermischer Manipulator **66** zugeordnet sein. Ferner ist es möglich, dass jeweils einem optischen Element **44, 46** jeweils zumindest ein mechanischer Manipulator **64** oder zumindest ein thermischer Manipulator **68** zugeordnet ist und auf das optische Element **44, 46** wirkt.

**[0092]** Die Manipulatoren **62–68** dienen zum zumindest teilweisen Korrigieren zumindest eines Abbildungsfehlers des optischen Systems **10**. Je ein mechanischer Manipulator **62, 64** kann einen oder mehrere Aktuatoren aufweisen, die an dem optischen Element **42, 44** angreifen und eine mechanische Krafteinwirkung **72, 74** auf das optische Element **42, 44** erzeugen. Hierdurch wird das optische Element **42, 44** lageverstellt oder mechanisch verformt, wobei es bei einer Verformung hinsichtlich seiner Eigenschaften, insbesondere seiner Geometrie und/oder seiner Materialeigenschaften, wie z. B. die Brechzahl oder dergleichen, optisch verändert wird. Eine Lageverstellung des optischen Elements **42, 44** führt dagegen nicht zu einer Veränderung der Geometrie

oder der Materialeigenschaften des optischen Elements **42, 44**, sondern eine Lageverstellung bedeutet hier eine Verschiebung des optischen Elements **42, 44** in Richtung oder quer zur Richtung der optischen Achse O, eine Drehung des optischen Elements **42, 44** um die optische Achse O und/oder eine Verkipfung des optischen Elements **42, 44** um eine Achse senkrecht zur optischen Achse O.

**[0093]** Die mechanische Krafteinwirkung **72, 74** kann an beliebigen Bereichen des optischen Elements **42, 44** angreifen. Ferner setzt sie sofort nach Inbetriebnahme der mechanischen Manipulatoren **62, 64** ein und wirkt nach der Aktuierung zeitlich konstant, wobei sie betragsmäßig einen Wert größer als Null oder annähernd gleich Null haben kann.

**[0094]** Die mechanischen Manipulatoren **62, 64** können bspw. Aktuatoren für ein deformierbares Linsenelement aufweisen, um 2-wellige Abbildungsfehler zu korrigieren, oder Aktuatoren zum Lageverstellen des optischen Elements **42, 44**.

**[0095]** Die mechanischen Manipulatoren **62, 64** werden nur für kurze Zeitdauer aktuiert, um die gewünschte mechanische Krafteinwirkung einzustellen und/oder zu variieren. Diese Zeitdauer liegt im Bereich von weniger als etwa 1 Sekunde, vorzugsweise von weniger als 500 Millisekunden, weiter vorzugsweise von weniger als 100 Millisekunden. Diese Zeitdauer ist ausreichend, da die mechanischen Manipulatoren **62, 64** unmittelbar wirken, d. h. ihre Zeitkonstanten zur Einstellung und/oder Variation der gewünschten mechanischen Krafteinwirkung sind minimal.

**[0096]** Die mechanischen Manipulatoren **62, 64** werden vorzugsweise immer dann aktuiert bzw. angesteuert, wenn die Belichtung des Substrats **22** gerade unterbrochen ist. Das Substrat **22**, auch als Wafer bezeichnet, weist auf seiner zu belichtenden Oberfläche eine Unterteilung in eine Vielzahl von nacheinander zu belichtenden Dies auf, und die mechanischen Manipulatoren **62, 64** werden vorzugsweise dann angesteuert, wenn die Belichtung eines vorhergehenden Dies abgeschlossen ist und bevor die Belichtung des nächstfolgenden Dies beginnt. Die mechanischen Manipulatoren **62, 64** werden somit in zeitlichen Abständen  $\Delta t_{\text{mech}}$  angesteuert, um die jeweilige gewünschte mechanische Krafteinwirkung auf das optische Element **42, 44** einzustellen und/oder zu variieren, wobei diese zeitlichen Abstände vorzugsweise den zeitlichen Abständen der Belichtung zwischen aufeinanderfolgenden Dies entspricht. Die zeitlichen Abstände  $\Delta t_{\text{mech}}$  können dabei im Bereich von 1 bis 5 Sekunden liegen, beispielsweise bei etwa 2 Sekunden.

**[0097]** Den mechanischen Manipulatoren **62, 64** sind beispielhaft Steuerungsvorrichtungen **63, 65** zu-



geordnet, die die Aktuierung der mechanischen Manipulatoren **62**, **64** zeitlich steuern. Die Steuerungsvorrichtungen **63**, **65** aktuieren die Manipulatoren **62**, **64** in den zeitlichen Abständen  $\Delta t_{\text{mech}}$  nur für eine kurze Zeitdauer wie zuvor beschrieben.

**[0098]** Die thermischen Manipulatoren **66**, **68** erzeugen eine thermische Einwirkung **76**, **78** auf das optische Element **42**, **46**. Hierdurch wird das optische Element **42**, **46** durch Erwärmen/Kühlen seiner Teilbereiche thermisch verformt. Erfindungsgemäß ist unter einer thermisch induzierten Verformung des optischen Elements **42**, **46** eine temperaturbedingte Veränderung seiner Eigenschaften, insbesondere die Änderung seiner Geometrie und/oder seiner Materialeigenschaften, wie bspw. seines Wärmeausdehnungskoeffizienten und seiner Brechzahl, zu verstehen.

**[0099]** In einer bevorzugten Ausgestaltung können die thermischen Manipulatoren **66**, **68** als Heizdrähte, Peltier-Elemente oder entsprechend dem Prinzip einer Wärmepumpe ausgebildet sein. Die thermischen Manipulatoren **66**, **68** können derart ausgelegt sein, dass sie in Randbereichen der optischen Elemente **42**, **46** eine Temperaturänderung induzieren. Hierbei kann die zu erzeugende Temperaturverteilung der optischen Elemente **42**, **46** durch Quellen und Senken zugeführt werden.

**[0100]** Den thermischen Manipulatoren **66**, **68** sind ebenfalls Steuerungsvorrichtungen **67**, **69** zugeordnet.

**[0101]** Ferner kann jeder Manipulator **62–68** jeweils einzeln angesteuert werden. Ebenfalls ist es möglich, dass alle Manipulatoren **62–68** gemeinsam bzw. in verschiedenen Kombinationen miteinander angesteuert werden.

**[0102]** In einer bevorzugten Ausgestaltung wird der mechanische **62** und der thermische Manipulator **66** zeitlich überlagert verwendet, so dass die mechanische Krafteinwirkung **72** und die thermische Einwirkung **76** zeitlich überlagert auf das optische Element **42** wirken. Es ist ebenfalls möglich, dass der mechanische Manipulator **64** und der thermische Manipulator **68**, die den verschiedenen optischen Elementen **44**, **46** zugeordnet sind, zeitlich überlagert verwendet werden, so dass die mechanische Krafteinwirkung **74** und die thermische Einwirkung **78** gleichzeitig auf die optischen Elemente **44**, **46** wirken. Folglich tritt gleichzeitig eine mechanische Lageverstellung und/oder Verformung und thermisch induzierte Verformung der jeweiligen optischen Elemente **42–46** ein und ändert deren Abbildungseigenschaften. Hierdurch wird ein Wirkungsbereich der thermischen Manipulatoren **66**, **68** erweitert, da zu dem Wirkungsbereich der thermischen Manipulatoren **66**, **68** ein Wirkungsbereich der mechanischen Manipulatoren **62**,

**64** hinzugefügt wird.

**[0103]** Die thermischen Manipulatoren **66**, **68** können von der Steuerungsvorrichtung **67**, **69** kontinuierlich angesteuert werden, oder in zeitlichen Abständen  $\Delta t_{\text{therm}}$ , die etwa den zeitlichen Abständen  $\Delta t_{\text{mech}}$  entsprechen können, oder die um bis zu einem Faktor von etwa 10 größer sein können als  $\Delta t_{\text{mech}}$ . Allgemein werden die thermischen Manipulatoren **66**, **68** und die mechanischen Manipulatoren **62**, **64** in zeitlichen Abständen  $\Delta t_{\text{mech}}$  und  $\Delta t_{\text{therm}}$  so angesteuert, dass das Verhältnis  $\Delta t_{\text{therm}}/\Delta t_{\text{mech}}$  im Bereich von 0 bis etwa 10 liegt, wobei der Wert 0 für eine kontinuierliche Ansteuerung der thermischen Manipulatoren **66**, **68** steht. Ein Wert von  $\Delta t_{\text{therm}}/\Delta t_{\text{mech}} \approx 1$  bedeutet eine Ansteuerung der thermischen Manipulatoren **66**, **68** im zeitlichen Abstand der nacheinanderfolgenden einzelnen Die-Belichtungen, und ein Wert von größer 1 und bis zu etwa 10 dieses Verhältnisses bedeutet eine Aktuierung der thermischen Manipulatoren **66**, **68** für die Zeitdauer der Gesamtbelichtung des Substrats **22**, also eine Aktuierung der thermischen Manipulatoren **66**, **68** Wafer für Wafer.

**[0104]** Wirken die mechanischen Manipulatoren **62**, **64** und die thermischen Manipulatoren **66**, **68** gleichzeitig auf die optischen Elemente **42–48**, so verringert sich eine Zeitspanne zwischen einer Ist- und einer Soll-Korrektur **84** des zumindest einen Abbildungsfehlers. Die mechanisch induzierte Lageverstellung und/oder Verformung der optischen Elemente **42**, **44** tritt zu der thermisch induzierten Verformung der optischen Elemente **42**, **46** hinzu, so dass die zu erzielende erforderliche Verformung der optischen Elemente **42**, **46** im Unterschied zu einer alleinigen Wirkung der thermischen Manipulatoren **66**, **68** geringer sein kann und somit schneller erreicht wird.

**[0105]** [Fig. 2](#) zeigt ein Beispiel eines zeitlichen Verlaufs der zumindest teilweisen Korrektur des zumindest einen Abbildungsfehlers des optischen Systems **10**, wobei ein durch mechanische Manipulatoren **62**, **64** oder thermische Manipulatoren **66**, **68** induzierter Abbildungsfehler gegen die Zeit aufgetragen ist. Der induzierte Abbildungsfehler kompensiert zumindest teilweise den zumindest einen Abbildungsfehler des optischen Systems **10**.

**[0106]** Die angestrebte Soll-Korrektur **84** des zumindest einen Abbildungsfehlers des optischen Systems **10** wird durch eine Korrektur **86** und eine Korrektur **88** erhalten. Die Korrektur **86** ergibt sich durch die Lageverstellung und/oder Verformung der optischen Elemente **42**, **44** mittels der mechanischen Manipulatoren **62**, **64**. Die Korrektur **88** ergibt sich durch die Verformung der optischen Elemente **42**, **46** mittels der thermischen Manipulatoren **66**, **68**.

**[0107]** Die Korrektur **86** setzt sofort nach Inbetriebnahme der mechanischen Manipulatoren **62**, **64** ein,

und sie ist zeitlich konstant bis die mechanischen Manipulatoren **62**, **64** erneut angesteuert werden. Die Korrektur **88** des zumindest einen Abbildungsfehlers nimmt mit der Zeit linear zu. Die Soll-Korrektur **84** ergibt sich aus den miteinander kombinierten Korrekturen **86**, **88**, was durch Pfeile **90** angedeutet ist.

**[0108]** Das zumindest teilweise Korrigieren des zumindest einen Abbildungsfehlers wird während eines Verfahrens **100** zum Verbessern von Abbildungseigenschaften eines optischen Systems **10** durchgeführt (siehe [Fig. 3](#)). Das Verfahren **100** weist die Verfahrensschritte **102–108** auf, ein Bestimmen des zumindest einen Abbildungsfehlers, ein Bestimmen einer zeitlichen Entwicklung des zumindest einen Abbildungsfehlers, ein Bestimmen einer bestmöglichen Korrektur und ein zumindest teilweises Korrigieren des zumindest einen Abbildungsfehlers.

**[0109]** Die einzelnen Verfahrensschritte **102–108** des Verfahrens **100** können jeweils einzeln oder in verschiedenen Kombinationen miteinander durchgeführt werden.

**[0110]** Der Verfahrensschritt **102**, das Bestimmen des zumindest einen Abbildungsfehlers, kann mittels Unterschritten **110–116** durchgeführt werden, wobei diese auch kombiniert verwendet werden können. Der Unterschritt **110** beruht auf einem unmittelbaren Messen des zumindest einen Abbildungsfehlers. Hierzu kann ein Wellenfrontdetektor verwendet werden, wie er bspw. in EP 1 231 517 A1, US 5 978 085 A1, US 5 392 119 A1 oder US 5 828 455 A1 dargestellt ist.

**[0111]** Ferner kann mittels des Unterschritts **112** ausgehend von der Beleuchtungsweise der Struktur **20** durch die Beleuchtungsquelle **24** und der Belegungsoptik **25** die feld- und beugungswinkelabhängige Lichtverteilung im optischen System **10** abgeschätzt werden. Hierbei wird über eine Kenntnis von Schicht- und Volumenabsorptionskoeffizienten der optischen Elemente **42–48** die in den optischen Elementen **42–48** absorbierte Intensität, d. h. deren Temperaturverteilung, bestimmt. Die resultierenden Wärmeausdehnungskoeffizienten bzw. die resultierende temperaturabhängige Brechzahländerung der optischen Elemente **42–48** sowie deren Auswirkungen auf die Gesamtwellenfront des optischen Systems **10** können somit berechnet werden.

**[0112]** Der Unterschritt **114** zum Bestimmen von Abbildungsfehlern erfolgt über einen Vergleich der feld- und beugungswinkelabhängigen Lichtverteilung im optischen System mit einer feld- und beugungswinkelabhängigen Lichtverteilung von Referenzmessungen.

**[0113]** Ferner kann der Verfahrensschritt **102** zum Bestimmen von Abbildungsfehlern mittels des Unter-

schriffs **116**, dem Messen einer Lichtverteilung in einer oder mehreren Ebenen des optischen Systems **10** bspw. vor einer Substratbelichtung, durchgeführt werden. In einer bevorzugten Ausgestaltung wird das Messen der Lichtverteilung mittels eines Detektors, bspw. einer CCD-Kamera, durchgeführt. Entsprechend dem Unterschritt **112** kann über die gemessene Lichtverteilung auf die Abbildungsfehler des optischen Systems **10** geschlossen werden. Die Messung der Lichtverteilung kann pupillennah und/oder feldnah und/oder an intermediären Positionen des optischen Systems **10** vorgenommen werden.

**[0114]** Nach dem Verfahrensschritt **102**, dem Bestimmen des zumindest einen Abbildungsfehlers, wird der Verfahrensschritt **104**, das Berechnen der zeitlichen Entwicklung des zumindest einen Abbildungsfehlers, durchgeführt. Bei diesem Verfahrensschritt **104** kann eine Kenntnis des zumindest einen Abbildungsfehlers zu vorhergehenden Zeitpunkten miteinbezogen werden. Vorzugsweise kann die zeitliche Entwicklung des zumindest einen Abbildungsfehlers bis zu wenigen Stunden im Voraus berechnet werden.

**[0115]** Der Verfahrensschritt **106**, das Berechnen der bestmöglichen Korrektur des zumindest einen Abbildungsfehlers des optischen Systems **10**, berücksichtigt eine Dauer, für die der zumindest eine Abbildungsfehler des optischen Systems **10** zumindest teilweise korrigiert werden soll. Die optimal erreichbare Korrektur kann hierbei über die Optimierung einer quadratischen Norm von unterschiedlichen Abbildungsfehlern zu verschiedenen Zeitpunkten, die Optimierung eines integralen Wertes zu verschiedenen Zeitpunkten, wie z. B. des rms-Wertes der Wellenfront, oder über eine Optimierung von entsprechenden Maximumsnormen durchgeführt werden.

**[0116]** Der Verfahrensschritt **108**, das zumindest teilweise Korrigieren des zumindest einen Abbildungsfehlers, kann, wie vorher dargestellt, über eine mechanische Krafteinwirkung **72**, **74** und eine thermische Einwirkung **76–78** durchgeführt werden.

**ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG**

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

**Zitierte Patentliteratur**

- WO 99/67683 [0011]
- EP 0678768 B1 [0013]
- US 6198579 B1 [0015]
- US 2006/0244940 A1 [0018]
- US 2006/014662 A1 [0019]
- EP 1231517 A1 [0110]
- US 5978085 A1 [0110]
- US 5392119 A1 [0110]
- US 5828455 A1 [0110]

### Patentansprüche

1. Verfahren zum Verbessern von Abbildungseigenschaften eines optischen Systems (10), wobei das optische System (10) eine Mehrzahl von optischen Elementen aufweist, wobei zum zumindest teilweisen Korrigieren zumindest eines Abbildungsfehlers zumindest ein erstes optisches Element (42) aus der Mehrzahl der optischen Elemente mittels mechanischer Krafteinwirkung (72) lageverstellt und/oder verformt wird und mittels thermischer Einwirkung (76) verformt wird oder das zumindest erste optische Element (42) mittels mechanischer Krafteinwirkung (72) lageverstellt und/oder verformt wird und zumindest ein zweites optisches Element (46) aus der Mehrzahl der optischen Elemente mittels thermischer Einwirkung (78) verformt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das zumindest erste optische Element (42) zeitlich überlagert mittels mechanischer Krafteinwirkung (72) lageverstellt und/oder verformt wird und mittels thermischer Einwirkung (76) verformt wird oder das zumindest erste optische Element (42) mittels mechanischer Krafteinwirkung (72) lageverstellt und/oder verformt wird und zeitlich überlagert das zumindest zweite optische Element (46) mittels thermischer Einwirkung (74) verformt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei das zumindest erste optische Element (42) mittels einer zeitlich konstanten mechanischen Krafteinwirkung (72, 74) lageverstellt und/oder verformt wird.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei das zumindest erste optische Element (42) und/oder das zumindest zweite optische Element (46) mittels einer zeitlich veränderlichen thermischen Einwirkung (76, 78), beispielsweise mittels einer zeitlich linear ansteigenden thermischen Einwirkung (76, 78), verformt wird.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei die mechanische Krafteinwirkung zur Lageverstellung und/oder Verformung des ersten optischen Elements (42) in einer Zeitdauer von weniger als 1 Sekunde, vorzugsweise von weniger als 500 Millisekunden, weiter vorzugsweise von weniger als 100 Millisekunden eingestellt und/oder variiert wird.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei die mechanische Krafteinwirkung zur Lageverstellung und/oder Verformung des ersten optischen Elements (42) in zeitlichen Abständen  $\Delta t_{\text{mech}}$  angepasst wird.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei die thermische Einwirkung auf das erste und/oder zweite optische Element (42, 46) kontinuierlich durchgeführt wird.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, wobei die thermische Einwirkung auf das erste und/oder zweite optische Element (42, 46) in zeitlichen Abständen  $\Delta t_{\text{therm}}$  aktuiert wird.

9. Verfahren nach Anspruch 6 und nach Anspruch 8 oder 9, wobei  $\Delta t_{\text{therm}}/\Delta t_{\text{mech}}$  im Bereich von 0 bis etwa 10 liegt.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, wobei die thermische Einwirkung (76, 78) derart durchgeführt wird, dass sie eine rotationssymmetrische Temperaturverteilung in dem zumindest ersten optischen Element (42) und/oder in dem zumindest zweiten optischen Element (46) erzeugt.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, wobei die thermische Einwirkung (76, 78) derart durchgeführt wird, dass sie eine nicht-rotationssymmetrische Temperaturverteilung in dem zumindest ersten optischen Element (42) und/oder in dem zumindest zweiten optischen Element (46) erzeugt.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, wobei die thermische Einwirkung (76, 78) derart durchgeführt wird, dass sie eine Temperaturänderung in einem Randbereich des zumindest ersten optischen Elements (42) und/oder des zumindest zweiten optischen Elements (46) erzeugt.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12, wobei die mechanische Krafteinwirkung (72, 74) derart durchgeführt wird, dass sie einen Wirkungsbereich der thermischen Einwirkung (76, 78) erweitert.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13, wobei die mechanische Krafteinwirkung (72, 74) und die thermische Einwirkung (76, 78) derart durchgeführt werden, dass sie eine Zeitspanne zwischen einer Ist- und Soll-Korrektur (84) des zumindest einen Abbildungsfehlers minimieren.

15. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14, wobei vor dem zumindest teilweisen Korrigieren des zumindest einen Abbildungsfehlers der zumindest eine Abbildungsfehler bestimmt wird.

16. Verfahren nach Anspruch 15, wobei der zumindest eine Abbildungsfehler durch unmittelbares Messen eines Wellenfrontverlaufes bestimmt wird.

17. Verfahren nach Anspruch 15 oder 16, wobei der zumindest eine Abbildungsfehler durch Abschätzen einer feld- und beugungswinkelabhängigen Lichtverteilung in dem optischen System (10) bestimmt wird.

18. Verfahren nach einem der Ansprüche 15 bis 17, wobei der zumindest eine Abbildungsfehler durch Vergleichen der feld- und beugungswinkelabhängigen

gen Lichtverteilung in dem optischen System (**10**) mit der feld- und beugungswinkelabhängigen Lichtverteilung von Referenzmessungen bestimmt wird.

19. Verfahren nach einem der Ansprüche 15 bis 18, wobei der zumindest eine Abbildungsfehler durch Messen der feld- und beugungswinkelabhängigen Lichtverteilung in zumindest einer Ebene des optischen Systems (**10**) mittels eines Detektors bestimmt wird.

20. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 19, wobei eine zeitliche Entwicklung des zumindest einen Abbildungsfehlers bestimmt wird, nachdem der zumindest eine Abbildungsfehler bestimmt worden ist und bevor das zumindest teilweise Korrigieren des zumindest einen Abbildungsfehlers durchgeführt wird.

21. Verfahren nach Anspruch 20, wobei eine Kenntnis des zumindest einen Abbildungsfehlers verwendet wird, um die zeitliche Entwicklung des zumindest einen Abbildungsfehlers zu bestimmen.

22. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 21, wobei zum zumindest teilweisen Korrigieren des zumindest einen Abbildungsfehlers eine bestmöglichst erreichbare Korrektur bestimmt wird.

23. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 22, wobei das Lageverstellen des zumindest einen optischen Elements ein Verschieben, ein Drehen um eine optische Achse O des optischen Systems (**10**) und/oder ein Verkippen bezüglich der optischen Achse O umfasst.

24. Optisches System mit verbesserten Abbildungseigenschaften, wobei das optische System (**10**) eine Mehrzahl von optischen Elementen aufweist, wobei der Mehrzahl von optischen Elementen eine Mehrzahl von Manipulatoren zum aktiven Lageverstellen und/oder zum Verformen der Mehrzahl der optischen Elemente zugeordnet ist, wobei zumindest ein erster Manipulator (**62, 64**) aus der Mehrzahl der Manipulatoren als mechanischer Manipulator und zumindest ein zweiter Manipulator (**66, 68**) aus der Mehrzahl der Manipulatoren als thermischer Manipulator ausgebildet ist.

25. Optisches System nach Anspruch 24, wobei der mechanische (**62, 64**) und der thermische Manipulator (**66, 68**) derart ausgelegt sind, dass sie zu einem zumindest teilweisen Korrigieren zumindest eines Abbildungsfehlers zeitlich überlagert verwendbar sind.

26. Optisches System nach Anspruch 24 oder 25, wobei der mechanische Manipulator (**62, 64**) eine zeitlich konstante Krafteinwirkung (**72, 74**) bereitstellt.

27. Optisches System nach einem der Ansprüche 24 bis 26, wobei der thermische Manipulator (**66, 68**) eine zeitlich veränderliche thermische Einwirkung (**76, 78**), beispielsweise eine zeitlich linear ansteigende thermische Einwirkung (**76, 78**), auf die Mehrzahl der optischen Elemente aufweist.

28. Optisches System nach einem der Ansprüche 24 bis 27, wobei dem zumindest einen mechanischen Manipulator (**62, 64**) eine Steuerungsvorrichtung zugeordnet ist, die den mechanischen Manipulator (**62, 64**) in einer Zeitdauer von weniger als 1 Sekunde, vorzugsweise von weniger als 500 Millisekunden, weiter vorzugsweise von weniger als 100 Millisekunden, zur Einstellung und/oder Variation der mechanischen Krafteinwirkung aktuiert.

29. Optisches System nach einem der Ansprüche 24 bis 28, wobei die Steuerungsvorrichtung den mechanischen Manipulator (**62, 64**) in zeitlichen Abständen  $\Delta t_{\text{mech}}$  aktuiert.

30. Optisches System nach einem der Ansprüche 24 bis 29, wobei dem zumindest einen thermischen Manipulator (**66, 68**) eine Steuerungsvorrichtung zugeordnet ist, die den thermischen Manipulator (**66, 68**) kontinuierlich oder in zeitlichen Abständen  $\Delta t_{\text{therm}}$  aktuiert.

31. Optisches System nach Anspruch 29 und nach Anspruch 30, wobei die zeitliche Aktuierung des mechanischen Manipulators (**62, 64**) und des thermischen Manipulators (**66, 68**) derart ist, dass  $\Delta t_{\text{therm}}/\Delta t_{\text{mech}}$  im Bereich von 0 bis etwa 10 liegt.

32. Optisches System nach einem der Ansprüche 24 bis 31, wobei durch den thermischen Manipulator (**66, 68**) eine rotationssymmetrische Temperaturverteilung in der Mehrzahl der optischen Elemente erzeugbar ist.

33. Optisches System nach einem der Ansprüche 24 bis 31, wobei durch den thermischen Manipulator (**66, 68**) eine nicht-rotationssymmetrische Temperaturverteilung in der Mehrzahl der optischen Elemente erzeugbar ist.

34. Optisches System nach einem der Ansprüche 24 bis 33, wobei durch den thermischen Manipulator (**66, 68**) eine Temperaturverteilung in einem Randbereich der Mehrzahl der optischen Elemente veränderbar ist.

35. Optisches System nach einem der Ansprüche 24 bis 34, wobei der thermische Manipulator (**66, 68**) mit thermischen Quellen und/oder Senken ausgebildet ist.

36. Optisches System nach einem der Ansprüche 24 bis 35, wobei der thermische Manipulator (**66,**

**68**) als Wärmepumpe ausgebildet ist.

37. Optisches System nach einem der Ansprüche 24 bis 36, wobei durch den mechanischen Manipulator (**62**, **64**) ein Wirkungsbereich des thermischen Manipulators (**66**, **68**) erweiterbar ist.

38. Optisches System nach einem der Ansprüche 24 bis 37, wobei durch das zeitlich überlagerte Verwenden des mechanischen (**62**, **64**) und thermischen Manipulators (**66**, **68**) eine Zeitspanne zwischen einer Ist- und Soll-Korrektur (**84**) des zumindest einen Abbildungsfehlers minimierbar ist.

39. Optisches System nach einem der Ansprüche 24 bis 38, wobei das optische System ein Projektionsobjektiv für die Mikrolithographie ist.

Es folgen 3 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

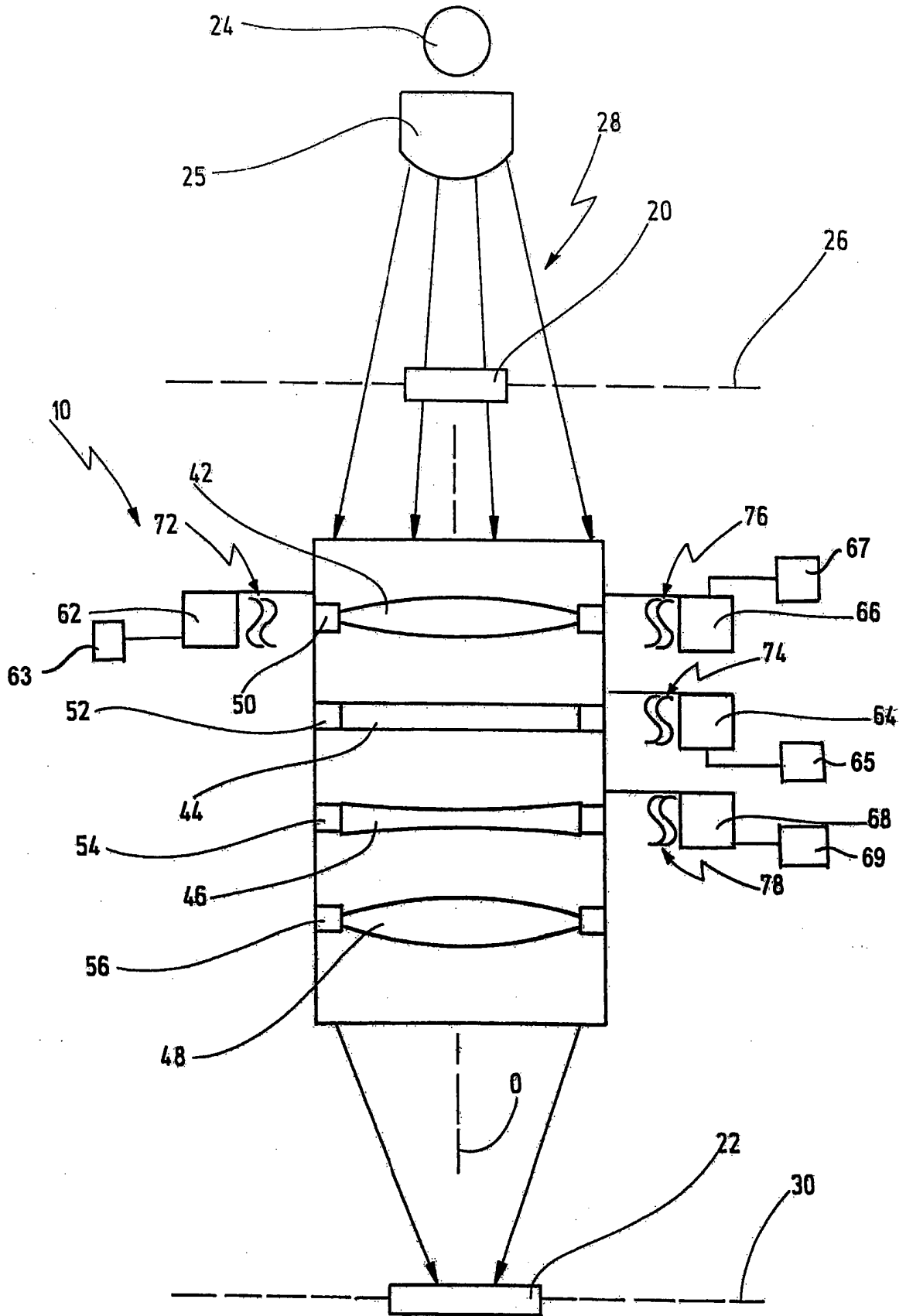


Fig.1

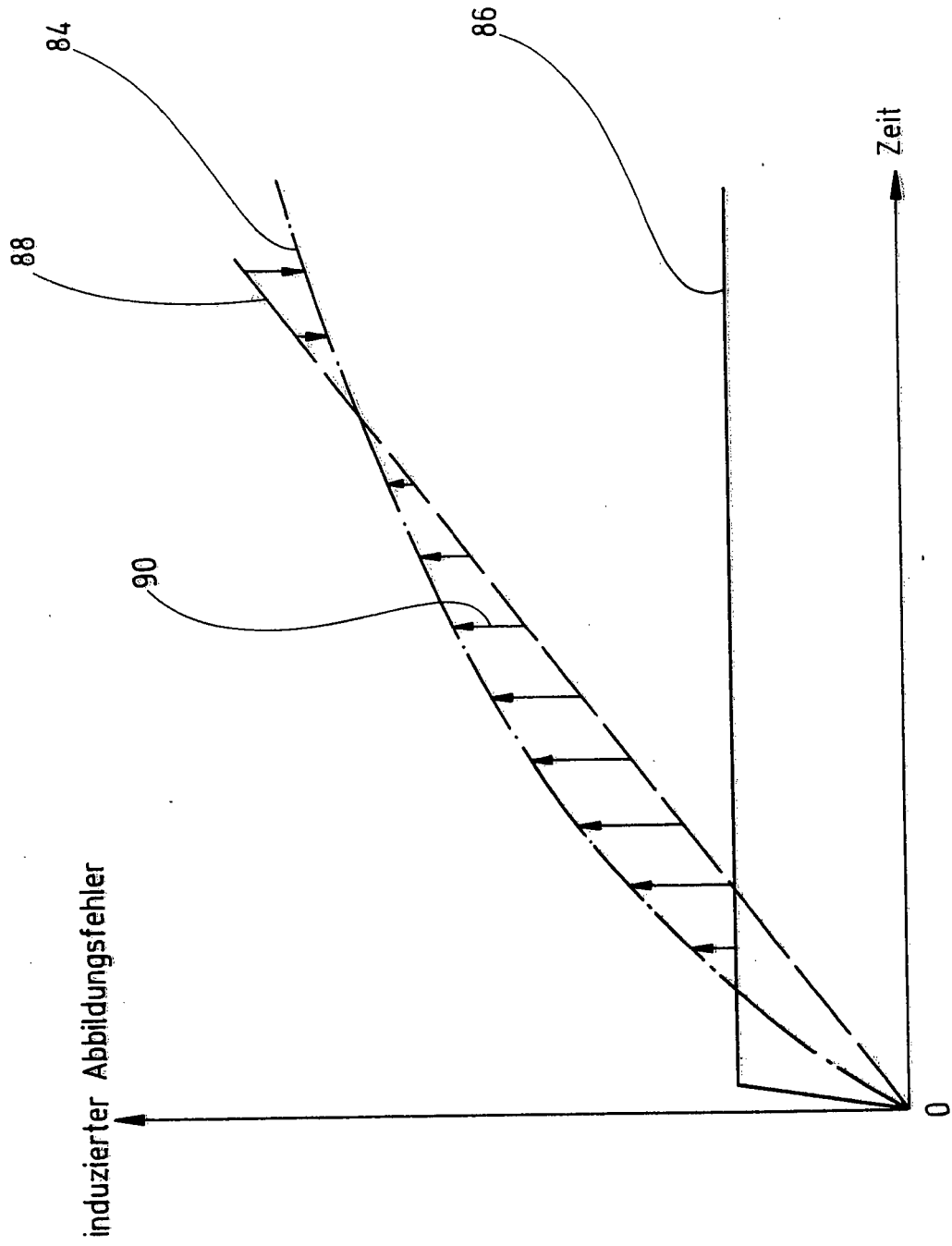


Fig.2



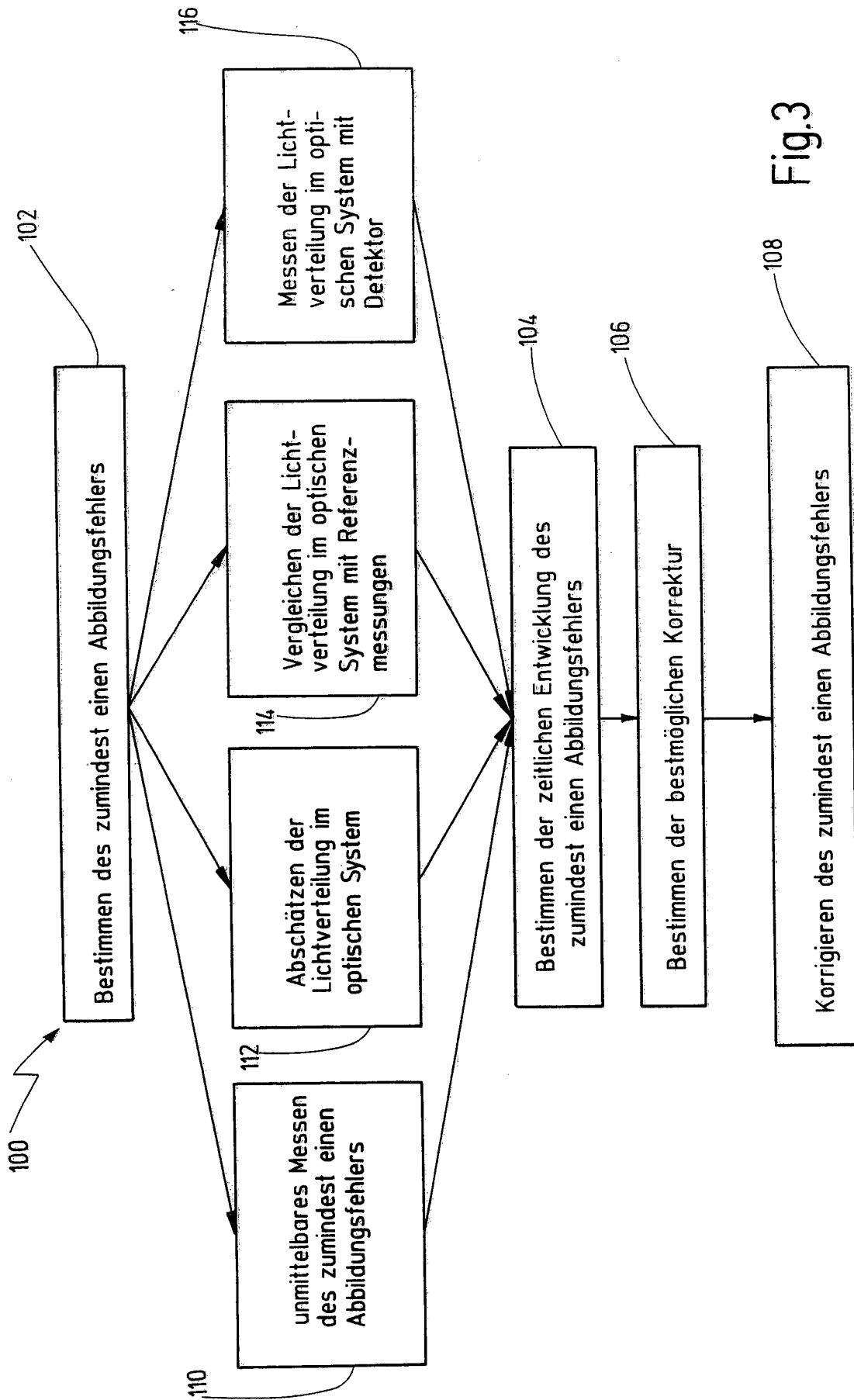


Fig.3