



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 103 60 414 A1** 2005.07.21

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **103 60 414.6**
(22) Anmeldetag: **19.12.2003**
(43) Offenlegungstag: **21.07.2005**

(51) Int Cl.7: **G02B 13/14**
G03F 7/20, G01M 11/02, G02B 17/00

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

(74) Vertreter:
Ostertag & Partner, Patentanwälte, 70597 Stuttgart

(72) Erfinder:
Mann, Hans-Jürgen, Dr., 73447 Oberkochen, DE;
Müllender, Stephan, Dr., 73431 Aalen, DE;
Trenkler, Johann, Dr., 73527 Schwäbisch Gmünd,
DE; Enkisch, Hartmut, Dr., 73431 Aalen, DE

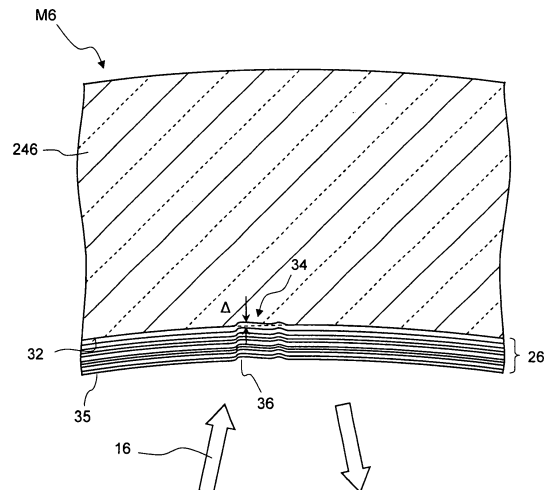
(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:
US 62 66 389 B1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

(54) Bezeichnung: **EUV-Projektionsobjektiv sowie Verfahren zu dessen Herstellung**

(57) Zusammenfassung: Es wird ein Verfahren zur Herstellung eines Projektionsobjektivs (22) einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage (10) beschrieben, bei dem alle abbildenden optischen Elemente Spiegel (M1 bis M6) sind. Jeder der Spiegel weist einen Spiegelträger (241 bis 246) und eine darauf aufgebraachte reflektive Beschichtung (26) auf. Werden auf der Beschichtung (26) der Spiegel (M1 bis M6) Oberflächendeformationen erzeugt, um Abbildungsfehler zu korrigieren, so führt dies zu einer Beeinträchtigung des Reflexionsvermögens der Beschichtung (26). Deswegen wird vorgeschlagen, die Spiegelträger (241 bis 246) noch vor dem Aufbringen der Beschichtung (26) mit der gewünschten Oberflächendeformation (34) zu versehen. Da die Spiegel (M1 bis M6) ohne Beschichtung (26) für Projektionslicht nicht reflektierend sind, erfolgt die Vermessung des vormontierten Projektionsobjektivs (22) entweder mit Meßlicht mit größerer Wellenlänge. Alternativ hierzu kann die Nachbearbeitung auch bei einem Spiegelträger (246) erfolgen, von dem lediglich eine beschichtete Kopie vermessen wurde.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ganz allgemein Projektionsobjektive mikrolithographischer Projektionsbelichtungsanlagen, die mindestens einen Spiegel mit einem Spiegelträger und einer darauf aufgebracht reflektiven Beschichtung aufweisen. Insbesondere betrifft die Erfindung EUV-Projektionsobjektive, die Projektionslicht mit einer Wellenlänge verwenden, die im extremen ultravioletten Spektralbereich (EUV = extreme ultraviolet) liegt.

[0002] Ein Projektionsobjektiv sowie ein Verfahren zu dessen Herstellung dieser Art sind aus der US 6 266 389 B1 bekannt.

[0003] Mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlagen, wie sie zur Herstellung integrierter elektrischer Schaltkreise und sonstiger mikrostrukturierter Bauelemente verwendet werden, bilden Strukturen, die in einem Retikel enthalten sind, im allgemeinen verkleinert auf eine lichtempfindliche Schicht ab, die z.B. auf einem Silizium-Wafer aufgebracht sein kann.

[0004] Eines der wesentlichen Ziele bei der Entwicklung von Projektionsbelichtungsanlagen besteht darin, Strukturen mit zunehmend kleineren Abmessungen auf der lichtempfindlichen Schicht lithographisch definieren zu können. Die dadurch möglichen höheren Integrationsdichten der mit Hilfe derartiger Anlagen hergestellten mikrostrukturierten Bauelemente erhöhen im allgemeinen deren Leistungsfähigkeit beträchtlich. Die Erzeugung besonders kleiner Strukturgrößen setzt ein hohes Auflösungsvermögen der verwendeten Projektionsobjektive voraus. Da das Auflösungsvermögen der Projektionsobjektive umgekehrt proportional zu der Wellenlänge des Projektionslichts ist, verwenden aufeinanderfolgende Produktgenerationen derartiger Projektionsbelichtungsanlagen Projektionslicht mit immer kürzeren Wellenlängen. Zukünftige Projektionsbelichtungsanlagen werden voraussichtlich Projektionslicht verwenden, dessen Wellenlänge im extremen ultravioletten Spektralbereich (EUV) liegt. In Betracht gezogen werden hierbei insbesondere Wellenlängen zwischen 1 nm und 30 nm und insbesondere die Wellenlänge 13,5 nm.

[0005] Bei der Verwendung von Projektionslicht mit derart kurzen Wellenlängen stehen keine Materialien für die Herstellung von Linsen und anderen refraktiven optischen Elementen zur Verfügung, die für das Projektionslicht hinreichend durchlässig sind. Deswegen sind EUV-Projektionsobjektive im wesentlichen aus Spiegeln aufgebaut. Die Spiegel bestehen aus einem Spiegelträger, der z.B. aus einem Glas gefertigt sein kann und dessen dem Projektionslicht ausgesetzte Oberfläche mit hoher Präzision gefertigt wird. Da der Spiegelträger für das Projektionslicht

fast zu 100% absorbierend ist und deswegen kein Projektionslicht reflektiert, bringt man auf dessen dem Projektionslicht zugewandter Oberfläche eine reflektierende Beschichtung auf, deren Reflexionsvermögen in der Größenordnung von etwa 60% bis 70% liegt.

[0006] Beschichtete Spiegel werden jedoch auch in Projektionsobjektiven eingesetzt, die für längere Wellenlängen vorgesehen sind. Zur Vermeidung chromatischer Abbildungsfehler weisen beispielsweise Projektionsobjektive, die für die Wellenlänge 157 nm ausgelegt sind, häufig einen katadioptrischen Aufbau auf, d.h. sie enthalten neben refraktiv wirkenden optischen Elementen wie etwa Linsen auch mindestens einen Spiegel.

[0007] Aufgrund der geringen Größe der abzubildenden Strukturen werden an die Abbildungseigenschaften des Projektionsobjektivs hohe Anforderungen gestellt. Abbildungsfehler können deswegen nur in sehr geringem Umfang toleriert werden.

[0008] Im allgemeinen werden auftretende Abbildungsfehler den beiden folgenden Kategorien zugeordnet. Zum einen gibt es solche Abbildungsfehler, die aus dem Design des Projektionsobjektivs resultieren, d.h. insbesondere aus der Vorgabe der Abmessungen, Materialien und Abstände der in dem Projektionsobjektiv enthaltenen optischen Elemente. Diese Designfehler sollen im folgenden außer Betracht bleiben.

[0009] Zum anderen gibt es Abbildungsfehler, die auf Herstellungs- oder Materialfehler zurückgehen und sich im allgemeinen nur noch am fertigen Projektionsobjektiv sinnvoll korrigieren lassen. Bei Spiegeln für Projektionsobjektive stellen sog. Paßfehler die wichtigsten Herstellungsfehler dar. Unter Paßfehlern versteht man ganz allgemein Abweichungen von der Flächentreue bei optischen Flächen.

[0010] Um derartige herstellungs- oder materialbedingte Abbildungsfehler zu korrigieren, schlägt die eingangs bereits erwähnte US 6 266 398 B1 im Zusammenhang mit einem EUV-Projektionsobjektiv vor, das fertig montierte und justierte EUV-Projektionsobjektiv zu vermessen und anschließend die Oberfläche einer oder mehrerer Spiegel so nachzubearbeiten, daß bestimmte Abbildungseigenschaften des Projektionsobjektivs verbessert werden. Die Nachbearbeitung erfolgt dabei derart, daß von der Beschichtung der Spiegel lokal Material abgetragen und/oder lokal Material durch Laminieren auf die Beschichtung aufgebracht wird.

[0011] Es hat sich allerdings gezeigt, daß das Reflexionsvermögen der Beschichtung durch die lokale Nachbearbeitung erheblich verändert – und zwar im allgemeinen verringert – wird. Das bekannte Herstell-

lungsverfahren ermöglicht somit zwar eine Verringerung von Wellenfrontfehlern, die Gleichmäßigkeit der Intensitätsverteilung des Projektionslichts in der Bildebene des Projektionsobjektivs kann durch das lokal veränderte Reflexionsvermögen einzelner Spiegel jedoch untolerierbar verschlechtert werden.

[0012] Aufgabe der Erfindung ist es deswegen, ein Verfahren zur Herstellung eines Projektionsobjektivs der eingangs genannten Art anzugeben, mit dem sich herstellungsbedingte Abbildungsfehler verringern lassen, ohne daß dabei das Reflexionsvermögen der Spiegel durch nachträgliche Bearbeitung nennenswert verändert wird.

[0013] Gemäß einem ersten Aspekt der Erfindung wird diese Aufgabe durch ein Verfahren mit den folgenden Schritten gelöst:

- a) Bereitstellen eines Spiegelträgers für den mindestens einen Spiegel;
- b) Einbau und Justierung der optischen Elemente einschließlich des Spiegelträgers für den mindestens einen Spiegel in ein Gehäuse des Projektionsobjektivs;
- c) Bestimmen von Meßwerten bezüglich mindestens einer Abbildungseigenschaft des Projektionsobjektivs unter Verwendung von Meßlicht, das vorzugsweise eine andere Wellenlänge als Projektionslicht hat, für dessen Verwendung das Projektionsobjektiv ausgelegt ist;
- d) Vergleichen der Meßwerte mit Sollwerten;
- e) Bestimmen einer Oberflächendeformation auf dem Spiegelträger des mindestens einen Spiegels, durch die eine Verbesserung der mindestens einen Abbildungseigenschaft erzielt werden kann;
- f) Erzeugen der in Schritt e) bestimmten Oberflächendeformation auf der Oberfläche des Spiegelträgers;
- g) Aufbringen der Beschichtung auf der in Schritt f) nachbearbeiteten Oberfläche des Spiegelträgers;
- h) Einbau des in Schritt g) beschichteten Spiegelträgers in das Gehäuse.

[0014] Gemäß einem zweiten Aspekt der Erfindung wird die genannte Aufgabe durch ein Verfahren mit den folgenden Schritten gelöst:

- a) Bereitstellen eines Master-Spiegelträgers für den mindestens einen Spiegel;
- b) Bereitstellen einer im wesentlichen identischen Kopie des Master-Spiegelträgers;
- c) Aufbringen der Beschichtung auf den Master-Spiegelträger;
- d) Einbau und Justierung der optischen Elemente einschließlich des in Schritt c) beschichteten Master-Spiegelträgers in ein Gehäuse des Projektionsobjektivs;
- e) Bestimmen von Meßwerten bezüglich mindestens einer Abbildungseigenschaft des Projektionsobjektivs;

- f) Vergleichen der Meßwerte mit Sollwerten;
- g) Bestimmen einer Oberflächendeformation, durch deren Erzeugung auf dem Spiegelträger des mindestens einen Spiegels die mindestens eine Abbildungseigenschaft verbessert wird;
- h) Erzeugen der in Schritt g) bestimmten Oberflächendeformation) auf der Kopie des Spiegelträgers;
- i) Aufbringen der Beschichtung auf der in Schritt h) nachbearbeiteten Kopie des Spiegelträgers;
- j) Ersetzen des in Schritt d) in das Gehäuse eingebauten Spiegelträgers durch dessen in Schritt i) beschichtete Kopie.

[0015] Als Oberflächendeformationen werden in diesem Zusammenhang alle asphärischen Veränderungen der Oberflächenstruktur im Nanometer- und Subnanometerbereich bezeichnet. In der Literatur hat sich für diese Art der Oberflächendeformationen teilweise die Bezeichnung "Nanometer-Asphären" eingebürgert, vgl. den Aufsatz von C. Hofmann et al. mit dem Titel "Nanometer-Asphären: Wie herstellen und wofür?", *Feinwerktechnik und Meßtechnik* 99 (1991), 10, Seiten 437 bis 440, der sich allerdings auf die Nachbearbeitung von Linsen und anderen refraktiv wirkenden optischen Elementen bezieht.

[0016] Erfindungsgemäß wird also nicht die empfindliche Beschichtung eines oder mehrerer Spiegel zur Verbesserung der Abbildungseigenschaften nachbearbeitet, sondern stets der unbeschichtete Spiegelträger. Es findet somit kein lokales Abtragen der Beschichtung statt, welches zu einer Beeinträchtigung des Reflexionsvermögens der Beschichtung führen könnte.

[0017] Da die Oberflächendeformation vor dem Aufbringen der Beschichtung auf dem Spiegelträger erzeugt wird, besteht auch keine Notwendigkeit, eine bereits aufgebrachte Beschichtung teilweise wieder zu entfernen, um auf dem dann freigelegten Bereich auf der Oberfläche des Spiegelträgers die gewünschte Oberflächendeformation zu erzeugen und diesen Bereich anschließend wieder mit einer neuen Beschichtung zu überdecken.

[0018] Bei EUV-Projektionsobjektiven reflektieren die unbeschichteten Spiegelträger das Projektionslicht praktisch überhaupt nicht. Die Messung erfolgt deswegen bei EUV-Projektionsobjektiven gemäß dem ersten Aspekt der Erfindung mit einer anderen, vorzugsweise längeren Wellenlänge, bei der auch die Spiegelträger ein so hohes Reflexionsvermögen aufweisen, daß eine Vermessung des Projektionsobjektivs möglich ist. Bei katadioptrischen Projektionsobjektiven, die für längerwelliges Projektionslicht ausgelegt sind, kann zur Vermessung auch das Projektionslicht selbst verwendet werden.

[0019] Gemäß dem zweiten Aspekt der Erfindung

wird die Vermessung des Projektionsobjektivs zwar mit dem später verwendeten Projektionslicht bei beschichtetem Spiegelträger durchgeführt. Nachbearbeitet wird dann jedoch nicht ein Spiegel, der in das vermessene Projektionsobjektiv eingebaut ist, sondern eine noch unbeschichtete, im wesentlichen identische Kopie desselben. Diese Kopie sollte möglichst exakt mit dem vermessenen Spiegel übereinstimmen. Da allerdings aufgrund von Herstellungstoleranzen keine Spiegel hergestellt werden können, die mit mathematischer Genauigkeit vollkommen identisch sind, wird die Kopie mit dem vermessenen Spiegel lediglich im wesentlichen identisch sein können.

[0020] Vorzugsweise werden zur Korrektur von Abbildungsfehlern nicht mehrere Spiegel, sondern nur einige wenige oder sogar nur ein einziger Spiegel an der Oberfläche der Spiegelträger nachbearbeitet. Bei der erstgenannten Variante der Erfindung, bei der vorzugsweise Meßlicht mit einer anderen Wellenlänge als das später verwendete Projektionslicht eingesetzt wird, können deswegen alle Spiegel, die nicht einer späteren Nachbearbeitung unterworfen werden sollen, bereits vor der Vermessung mit der Beschichtung versehen werden. Dies ist insbesondere deswegen vorteilhaft, da dann lediglich der oder die nachzubearbeitenden Spiegel nach der Vermessung aus dem Projektionsobjektiv ausgebaut und nach erfolgter Nachbearbeitung und Beschichtung wieder in das Projektionsobjektiv eingebaut werden müssen. Die Sollwerte, mit denen die bei der Vermessung aufgenommenen Meßwerte verglichen werden, sind dabei in Abhängigkeit davon zu bestimmen, welche der in das Projektionsobjektiv eingebauten Spiegel eine Beschichtung tragen.

[0021] Selbstverständlich ist es auch bei dieser Variante möglich, anstelle des unbeschichteten Spiegelträgers, der während der Vermessung in das Projektionsobjektiv eingebaut war, eine im wesentlichen identische Kopie desselben nachzubearbeiten und nach der Beschichtung in das Projektionsobjektiv einzubauen.

[0022] Wird gemäß der zweiten Variante die Oberflächendeformation auf einer im wesentlichen Kopie des vermessenen beschichteten Spiegelträgers erzeugt, so können systematisch Fehler, wie sie z.B. in optischen Prüfeinrichtungen zur Überprüfung der Maßhaltigkeit erzeugter Oberflächendeformationen auftreten, kompensiert werden, da diese systematischen Fehler bei den Master-Spiegelträgern in gleicher Weise wie bei deren Kopien auftreten.

[0023] Weitere Vorteile und Merkmale der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung von Ausführungsbeispielen anhand der Zeichnung. Darin zeigen:

[0024] **Fig. 1** eine schematische Darstellung eines erfindungsgemäßen Projektionsobjektivs in einem Meridionalschnitt;

[0025] **Fig. 2** einen vergrößerten, nicht maßstäblichen Ausschnitt aus einem der Spiegel in einer Schnittdarstellung;

[0026] **Fig. 3** ein Flußdiagramm zur Erläuterung eines ersten Ausführungsbeispiels der Erfindung;

[0027] **Fig. 4** ein Flußdiagramm zur Erläuterung eines zweiten Ausführungsbeispiels der Erfindung.

[0028] In der **Fig. 1** ist eine mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlage in einem stark schematisierten und nicht maßstäblichen Meridionalschnitt dargestellt und insgesamt mit **10** bezeichnet. Die Projektionsbelichtungsanlage **10** umfaßt eine Beleuchtungseinrichtung **12**, in der eine Lichtquelle **14** angeordnet ist. Die Lichtquelle **14** dient der Erzeugung von Projektionslicht, das mit **16** angedeutet ist und eine im extremen ultravioletten Spektralbereich liegende Wellenlänge von beispielsweise 13,5 nm hat. Zur Beleuchtungseinrichtung **12** gehört außerdem eine mit **18** lediglich angedeutete Beleuchtungsoptik, mit der sich das Projektionslicht **16** auf ein Retikel **20** richten läßt. Die Beleuchtungseinrichtung **12** ist als solche im Stande der Technik, z.B. aus der EP 1 123 195 A1, bekannt und wird deswegen hier nicht näher beschrieben.

[0029] Das von dem Retikel **20** reflektierte Projektionslicht **16** tritt in ein Projektionsobjektiv **22** ein, das im dargestellten Ausführungsbeispiel 6 in einem Gehäuse **23** angeordnete asphärische Abbildungsspiegel M1, M2,..., M6 enthält. Jeder der Spiegel M1 bis M6 hat einen Spiegelträger **241**, **242**,..., **245** bzw. **246**, auf dem eine Beschichtung **26** aufgebracht ist. Die Beschichtungen **26** können von Spiegel zu Spiegel unterschiedlich sein und beispielsweise aus einer alternierenden Abfolge von dünnen Molybdän- und Silizium-Schichten bestehen, die jeweils mehr als 60% des auftreffenden Projektionslichts **16** reflektiert. Als Beschichtung **26** sind aber auch andere im Stand der Technik bekannte Schichtstrukturen verwendbar.

[0030] Das Projektionslicht **16** trifft nach Reflexion an den Spiegeln M1 bis M6 auf eine für Licht dieser Wellenlänge empfindliche Schicht **28**, die auf einem Silizium-Wafer **30** aufgebracht ist, und erzeugt auf dieser ein verkleinertes Abbild der in dem Retikel **20** enthaltenen Strukturen. Da die grundsätzliche Anordnung der Spiegel M1 bis M6 in dem Projektionsobjektiv **22** an sich im Stand der Technik, z.B. aus der US 6 353 470 B1, bekannt ist, wird auf die Erläuterung weiterer Einzelheiten hierzu verzichtet.

[0031] Die Spiegelträger **241** bis **246** bestehen aus einem Material, das sich hoch genau bearbeiten läßt

und vorzugsweise einen geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten besitzt. In Betracht kommen in diesem Zusammenhang beispielsweise titandotierte Quarzgläser wie z.B. ULE[®], wobei ULE für "ultra low expansion" steht und eingetragene Marke der Firma CORNING, USA, ist. Als Material für die Spiegelträger **241** bis **246** geeignet sind ferner bestimmte Glaskeramiken wie etwa ZERODUR[®] (eingetragene Marke der Firma Schott Glas, Mainz). ZERODUR[®] ist ein Zwei-Phasen-Material, dessen kristalline Phase die Eigenschaft hat, sich bei einer Temperaturerhöhung zusammenzuziehen, während sich die amorphe Phase bei einer Temperaturerhöhung ausdehnt. Durch Wahl des Mischungsverhältnisses der beiden Phasen kann die Temperaturabhängigkeit des thermischen Ausdehnungskoeffizienten recht genau eingestellt werden.

[0032] Die [Fig. 2](#) zeigt einen Ausschnitt aus dem bildseitig letzten Spiegel M6 in einer vergrößerten, nicht maßstäblichen Schnittdarstellung. In der Schnittdarstellung ist erkennbar, daß die Beschichtung **26**, die auf der optisch wirksamen Oberfläche **32** des Spiegelträgers **246** aufgebracht ist, wie oben erläutert aus einer Vielzahl dünner Einzelschichten besteht. Reale Schichtsysteme können wesentlich mehr Einzelschichten enthalten, als dies aus Gründen der Übersichtlichkeit in der [Fig. 2](#) dargestellt ist.

[0033] Mit **34** ist eine Deformation an der Oberfläche **32** des Spiegelträgers **246** bezeichnet, die im Wege eines nachträglichen Materialabtrags auf der ansonsten gleichmäßig gekrümmten Oberfläche **32** erzeugt wurde. Die maximale Tiefe Δ der Oberflächendeformation **34** liegt in der Größen-Ordnung von einigen Angström oder wenigen Nanometern. Die – in der [Fig. 2](#) übertrieben dick dargestellten – Einzelschichten der Beschichtung **26** zeichnen den Verlauf der Oberflächendeformation **34** nach, ohne daß sich dabei ihre Dicke wesentlich verändert. Somit setzt sich die Oberflächendeformation **34** gewissermaßen bis an der äußerste Schicht **35** der Beschichtung **26** fort und führt dort zur Ausbildung einer Ausnehmung **36**, deren Form der Oberflächendeformation **34** im wesentlichen entspricht.

[0034] Die sich auf die Beschichtung **26** übertragende Oberflächendeformation **34** auf der Oberfläche **32** des Spiegelträgers **246** führt dazu, daß die Wellenfront auftreffenden Projektionslichts **16** gezielt in ihrer Phase beeinflußt wird. Die Form der Oberflächendeformation **34** ist dabei so bestimmt, daß die in der Beschichtung **26** hervorgerufenen Phasenänderungen der Wellenfront herstellungsbedingte Abbildungsfehler des Projektionsobjektivs **22** zumindest teilweise korrigieren. Da von der Beschichtung **26** kein Material abgetragen ist und somit alle Einzelschichten auch in der Nähe der Ausnehmung **36** ihre Solldicke haben, wird das Reflexionsvermögen des über der Oberflächendeformation **34** liegenden Teils der Be-

schichtung **26** nicht verändert.

[0035] Im folgenden wird anhand des in der [Fig. 3](#) gezeigten Flußdiagramms ein erstes Ausführungsbeispiel für ein Verfahren zur Herstellung des in den [Fig. 1](#) und [Fig. 2](#) dargestellten Projektionsobjektivs **22** beschrieben.

[0036] Zunächst werden in einem Schritt S11 die sechs Spiegelträger **241** bis **246** bereitgestellt.

[0037] Dann werden in einem Schritt S12 die Spiegelträger **241** bis **245** der Spiegel M1 bis M5 mit der Beschichtung **26** versehen.

[0038] In einem Schritt S13 werden sämtliche Spiegelträger, nämlich sowohl die beschichteten Spiegelträger **241** bis **245** als auch der noch unbeschichtete Spiegelträger **246**, in das Projektionsobjektiv **22** eingebaut und justiert.

[0039] In einem Schritt S14 wird das Projektionsobjektiv **22** vermessen. Die Vermessung kann dabei in der gleichen Weise erfolgen, wie dies etwa aus der eingangs bereits erwähnten US 6 266 389 B1 bekannt ist. Im Gegensatz zu dem dort beschriebenen Verfahren wird nun jedoch das Projektionsobjektiv **22** speziellem Meßlicht ausgesetzt, dessen Wellenlänge derart gewählt ist, daß auch der noch unbeschichtete Spiegelträger **246** das Meßlicht reflektiert. In Betracht kommt hierzu beispielsweise Meßlicht mit einer Wellenlänge von einigen Hundert Nanometern, z.B. 365 nm oder 248 nm. Die Beleuchtungseinrichtung **12** ist zu diesem Zweck gegen eine andere Beleuchtungseinrichtung auszutauschen, die Licht mit der gewünschten Wellenlänge erzeugt und in das Projektionsobjektiv **22** einkoppelt. Mit Hilfe an sich bekannter interferometrischer Meßeinrichtungen wird in der Bildebene des Projektionsobjektivs **22**, in der die lichtempfindliche Schicht **28** angeordnet ist, der Wellenfrontverlauf des Meßlichts ermittelt.

[0040] Der gemessene Wellenfrontverlauf wird in einem weiteren Schritt S15 mit Sollwerten verglichen, wie sie zuvor für das Design des Projektionsobjektivs **22** bestimmt wurden. Bei dieser Bestimmung ist die Tatsache zu berücksichtigen, daß das Meßlicht eine längere Wellenlänge als das später verwendete Projektionslicht **16** hat. Zwar ist der Lichtweg in dem Projektionsobjektiv **22** in erster Näherung unabhängig von der Wellenlänge des an den Spiegeln M1 bis M6 reflektierten Lichts, jedoch kommt es insbesondere auf Grund der Beschichtungen **26** bei der Verwendung von längerwelligem Meßlicht zu Abweichungen gegenüber der Wirkung bei EUV-Projektionslicht. Das längerwellige Meßlicht dringt nämlich, anders als das EUV-Projektionslicht, nicht in die Beschichtung **26** der Spiegel M1 bis M6 ein, sondern wird von deren nach außen weisenden Oberfläche fast vollständig reflektiert. Dadurch erscheinen die beschichteten

Spiegel M1 bis M5 bei Beleuchtung mit längerwelligem Meßlicht im Vergleich zu einer Beleuchtung mit kurzwelligem EUV-Projektionslicht translatorisch geringfügig versetzt.

[0041] In einem Schritt S16 wird auf der Grundlage des in dem Schritt S15 gezogenen Vergleichs zwischen Meßwerten und Sollwerten eine Oberflächen deformation **34** für den noch unbeschichteten Spiegelträger **246** derart berechnet, daß eine vorgegebene Abbildungseigenschaft des Projektionsobjektivs verbessert wird. Berechnungen dieser Art sind an sich im Stand der Technik bekannt; Einzelheiten hierzu sind beispielsweise der bereits erwähnten US 6 266 389 B1 zu entnehmen, deren Offenbarungsgelalt hiermit vollumfänglich aufgenommen wird.

[0042] In einem Schritt S17 wird die in dem Schritt S16 bestimmte Oberflächen deformation **34** auf den zuvor aus dem Projektionsobjektiv **22** ausgebauten Spiegelträger **246** in an sich bekannter Weise erzeugt. In Betracht kommt hierzu beispielsweise ein Materialabtrag durch reaktives Ionenstrahlätzen.

[0043] Die so nachbearbeitete Oberfläche **32** des Spiegelträgers **246** wird in einem Schritt S18 mit der Beschichtung **26** versehen, wodurch der Spiegel M6 den in der [Fig. 2](#) gezeigten Aufbau erhält.

[0044] Der beschichtete Spiegelträger **246** wird anschließend in einem Schritt S19 wieder in das Projektionsobjektiv **22** eingebaut und justiert. Nach einer abschließenden Feinjustage unter Verwendung des Projektionslichts ist das Projektionsobjektiv **22** fertiggestellt.

[0045] In Abwandlung des vorstehend beschriebenen Herstellungsverfahrens werden alle Spiegelträger **241** bis **246** ohne vorhergehende Beschichtung in das Projektionsobjektiv **22** eingebaut und justiert (Schritt S13). Der Schritt S12, in dem zumindest einige der Spiegelträger **241** bis **246** beschichtet werden, entfällt somit. In dem Schritt S18 sind dann nicht nur der nachbearbeitete Spiegelträger **246** zu beschichten, sondern auch alle übrigen Spiegelträger **241** bis **245**, die nicht nachbearbeitet wurden. Ein Nachteil dieser Variante besteht darin, daß die nicht nachbearbeiteten Spiegelträger **241** bis **245** nach dem erstmaligen Einbau in das Projektionsobjektiv **22** in dem Schritt S13 wieder ausgebaut und nach Aufbringen der Beschichtung **26** erneut wieder in das Projektionsobjektiv **22** eingebaut werden müssen.

[0046] Andererseits hat diese Variante den Vorteil, daß man sich nicht bereits vor der Vermessung des Projektionsobjektivs **22** festlegen muß, welche Spiegelträger **241** bis **246** an ihrer Oberfläche **32** nachbearbeitet werden sollen. Zwar gibt es im allgemeinen innerhalb der Projektionsobjektive **22** bestimmte Spiegel, die sich besonders zur Anbringung von

Oberflächendeformationen eignen, mit denen Abbildungsfehler korrigiert werden können. Je nach Art der aufgetretenen Herstellungsfehler kann es jedoch manchmal sinnvoll sein, auch andere oder sogar alle Spiegelträger **241** bis **246** mit Oberflächen deformationen **34** zu versehen.

[0047] Im folgenden wird ein anderes Ausführungsbeispiel für ein Verfahren zur Herstellung des in den [Fig. 1](#) und [Fig. 2](#) gezeigten Projektionsobjektivs **22** anhand des in der [Fig. 4](#) gezeigten Flußdiagramms erläutert.

[0048] Das Herstellungsverfahren beginnt ebenfalls mit der Bereitstellung von Spiegelträgern **241** bis **246** in einem Schritt **521**.

[0049] Während für die Spiegel M1 bis M5 jeweils nur ein einziger Spiegelträger **241**, **242**, **243**, **244** bzw. **245** angefertigt wird, werden für den Spiegel M6 zwei möglichst identische Spiegelträger **246** angefertigt. Zur Unterscheidbarkeit wird der erste vollständige Satz von Spiegelträgern **241** bis **246** im folgenden als Master-Spiegelträger bezeichnet, während der zusätzliche eine Spiegelträger für den Spiegel M6 als Kopie des Master-Spiegelträgers **246** bezeichnet wird.

[0050] In einem Schritt S23 wird auf jeden der Master-Spiegelträger **241** bis **246** die Beschichtung **26** aufgebracht.

[0051] In einem Schritt S24 werden die Master-Spiegelträger **241** bis **246** in das Projektionsobjektiv **22** eingebaut und justiert.

[0052] In einem Schritt S25 wird das insoweit fertiggestellte Projektionsobjektiv **22** in der gleichen Weise vermessen, wie dies bei dem oben beschriebenen Ausführungsbeispiel mit Bezug auf den Schritt S14 erörtert wurde. Alternativ hierzu kann als Meßlicht auch Projektionslicht verwendet werden, da sämtliche Spiegel M1 bis M6 mit der hochreflektiven Beschichtung **26** versehen sind.

[0053] Nach einem Vergleich der Meßwerte mit entsprechenden Sollwerten in einem Schritt S26 wird auch bei diesem Ausführungsbeispiel in einem Schritt S27 eine Oberflächen deformation **34** ermittelt, deren Anbringung auf dem Spiegelträger **246** zu einer Verbesserung der Abbildungseigenschaften des Projektionsobjektivs **22** führt.

[0054] Diese Oberflächen deformation **34** wird nun allerdings nicht auf dem Master-Spiegelträger **246** des Spiegels M6, sondern auf der noch unbeschichteten Kopie dieses Master-Spiegelträgers **246** in an sich bekannter Weise in einem Schritt S28 erzeugt. Die so nachbearbeitete Kopie wird dann in einem Schritt S29 mit der Beschichtung **26** versehen, wo-

durch der Spiegel M6 den in der [Fig. 2](#) gezeigten Aufbau erhält.

[0055] In einem Schritt S30 wird der ursprüngliche Spiegel M6 mit dem Master-Spiegelträger **246** gegen die nachbearbeitete und beschichtete Kopie dieses Spiegelträgers ausgetauscht. Das nach einer abschließenden Justage fertiggestellte Projektionsobjektiv **22** weist nun einen Spiegel M6 mit einer Oberflächendeformation **34** auf, wie dies in den [Fig. 1](#) und [Fig. 2](#) dargestellt ist.

[0056] Ergänzend ist darauf hinzuweisen, daß die vorstehend beschriebene Erfindung zwar besonders für die Herstellung von EUV-Projektionsobjektiven geeignet ist, grundsätzlich aber auch bei der Herstellung von Projektionsobjektiven eingesetzt werden kann, die für längere Wellenlängen, z.B. 365 nm, 248 nm, 193 nm oder 157 nm, ausgelegt sind.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung eines Projektionsobjektivs (**22**) einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage (**10**), die mehrere optische Elemente aufweist, von denen mindestens eines ein Spiegel (M1 bis M6) ist, der einen Spiegelträger (**241** bis **246**) und eine darauf aufgebrauchte reflektive Beschichtung (**26**) umfaßt, mit folgenden Schritten:

- a) Bereitstellen (S11) eines Spiegelträgers (**241** bis **246**) für den mindestens einen Spiegel (M1 bis M6);
- b) Einbau (S13) und Justierung der optischen Elemente (M1 bis M16) einschließlich des Spiegelträgers für den mindestens einen Spiegel in ein Gehäuse (**23**) des Projektionsobjektivs (**22**);
- c) Bestimmen (S14) von Meßwerten bezüglich mindestens einer Abbildungseigenschaft des Projektionsobjektivs (**22**) unter Verwendung von Meßlicht, das vorzugsweise eine andere Wellenlänge als Projektionslicht hat, für dessen Verwendung das Projektionsobjektiv ausgelegt ist;
- d) Vergleichen (**515**) der Meßwerte mit Sollwerten;
- e) Bestimmen (S16) einer Oberflächendeformation (**34**) auf dem Spiegelträger (**246**) des mindestens einen Spiegels (M1 bis M6), durch die eine Verbesserung der mindestens einen Abbildungseigenschaft erzielt werden kann;
- f) Erzeugen (S17) der in Schritt e) bestimmten Oberflächendeformation (**34**) auf der Oberfläche (**32**) des Spiegelträgers (**246**);
- g) Aufbringen (S18) der Beschichtung (**26**) auf der in Schritt f) nachbearbeiteten Oberfläche (**32**) des Spiegelträgers (**246**);
- h) Einbau (S19) des in Schritt g) beschichteten Spiegelträgers (**246**) in das Gehäuse (**23**).

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der in Schritt f) nachbearbeitete und in Schritt g) beschichtete Spiegelträger (**246**) eine identische Kopie des Spiegelträgers ist, der in Schritt b) in

das Projektionsobjektiv eingebaut wird und in Schritt c) Gegenstand der Meßwertbestimmung ist.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Sollwerte unter Berücksichtigung der Wellenlänge des Meßlichts ermittelt werden.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Projektionsobjektiv mehrere Spiegel (M1 bis M6) enthält.

5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß mindestens einer, aber nicht alle Spiegelträger (**241** bis **245**) vor der Bestimmung von Meßwerten in Schritt c) mit einer Beschichtung (**26**) versehen (S12) werden.

6. Verfahren nach Anspruch 4 oder 5, dadurch gekennzeichnet, daß auf mehreren Spiegelträgern nach Schritt f) Oberflächendeformationen erzeugt werden.

7. Verfahren nach Anspruch 4 oder 5, dadurch gekennzeichnet, daß nur auf einem einzigen Spiegelträger (**246**) nach Schritt f) eine Oberflächendeformation (**34**) erzeugt wird.

8. Verfahren zur Herstellung eines Projektionsobjektivs (**22**) einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage (**10**), die mehrere optische Elemente aufweist, von denen mindestens eines ein Spiegel (M1 bis M6) ist, der einen Spiegelträger (**241** bis **246**) und eine darauf aufgebrauchte reflektive Beschichtung (**26**) umfaßt, mit folgenden Schritten:

- a) Bereitstellen (**521**) eines Master-Spiegelträgers (**241** bis **246**) für den mindestens einen Spiegel (M1 bis M6);
- b) Bereitstellen (S22) einer im wesentlichen identischen Kopie des Master-Spiegelträgers (**246**);
- c) Aufbringen (S23) der Beschichtung (**26**) auf den Master-Spiegelträger (**241** bis **246**);
- d) Einbau (S24) und Justierung der optischen Elemente einschließlich des in Schritt c) beschichteten Master-Spiegelträgers (**241** bis **246**) in ein Gehäuse (**23**) des Projektionsobjektivs (**22**);
- e) Bestimmen (S25) von Meßwerten bezüglich mindestens einer Abbildungseigenschaft des Projektionsobjektivs (**22**);
- f) Vergleichen (S26) der Meßwerte mit Sollwerten;
- g) Bestimmen (S27) einer Oberflächendeformation (**34**), durch deren Erzeugung auf dem Spiegelträger (**246**) des mindestens einen Spiegels (M1 bis M6) die mindestens eine Abbildungseigenschaft verbessert wird;
- h) Erzeugen (S28) der in Schritt g) bestimmten Oberflächendeformation (**34**) auf der Kopie des Spiegelträgers (**246**);
- i) Aufbringen (S29) der Beschichtung auf der in Schritt

h) nachbearbeiteten Kopie des Spiegelträgers (**246**);
 j) Ersetzen (S30) des in Schritt d) in das Gehäuse (**23**) eingebauten Spiegelträgers (**246**) durch dessen in Schritt i) beschichtete Kopie.

Strukturen enthält;

c) Projizieren wenigstens eines Teils des Retikels (**20**) auf einen Bereich auf der Schicht (**28**) unter Verwendung eines Projektionsobjektivs nach Anspruch 13 oder 14.

9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß das Projektionsobjektiv mehrere Spiegel (M1 bis M6) enthält.

18. Mikrostrukturiertes Bauelement, das nach dem Verfahren nach Anspruch 17 hergestellt ist.

10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß von mehreren Spiegelträgern nach Schritt b) Kopien bereitgestellt, nach Schritt h) nachbearbeitet, nach Schritt i) beschichtet und nach Schritt j) in das Gehäuse (**23**) eingebaut werden.

Es folgen 4 Blatt Zeichnungen

11. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß nur von einem Spiegelträger (**246**) nach Schritt b) ein Kopie bereitgestellt, nach Schritt h) nachbearbeitet, nach Schritt i) beschichtet und nach Schritt j) in das Gehäuse (**23**) eingebaut wird.

12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Oberflächendeformation durch (34) lokalen Materialabtrag erzeugt wird.

13. Projektionsobjektiv für eine mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlage (**10**), mit mehreren optischen Elementen, von denen mindestens eines ein Spiegel (M1 bis M6) ist, der jeweils einen Spiegelträger (**241** bis **246**) und eine darauf aufgebraachte reflektive Beschichtung (**26**) umfaßt, dadurch gekennzeichnet, daß mindestens ein Spiegelträger (**246**) an einer die Beschichtung (**26**) tragenden Oberfläche (**32**) eine Oberflächendeformation (**34**) zur nachträglichen Korrektur mindestens eines Abbildungsfehlers aufweist.

14. Projektionsobjektiv nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Oberflächendeformation (**34**) durch lokalen Materialabtrag erzeugt ist.

15. Mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlage mit einer Beleuchtungseinrichtung (**12**) zur Erzeugung von kurzwelligem Projektionslicht und mit einem Projektionsobjektiv (**22**) nach Anspruch 13 oder 14.

16. Mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß die Beleuchtungseinrichtung (**12**) eine Quelle (**14**) für Röntgenstrahlung enthält.

17. Verfahren zur mikrolithographischen Herstellung mikrostrukturierter Bauelemente mit folgenden Schritten:

- a) Bereitstellen eines Trägers (**30**), auf den zumindest teilweise eine Schicht (**28**) aus einem lichtempfindlichen Material aufgebracht ist;
- b) Bereitstellen eines Retikels (**20**), das abzubildende

Anhängende Zeichnungen

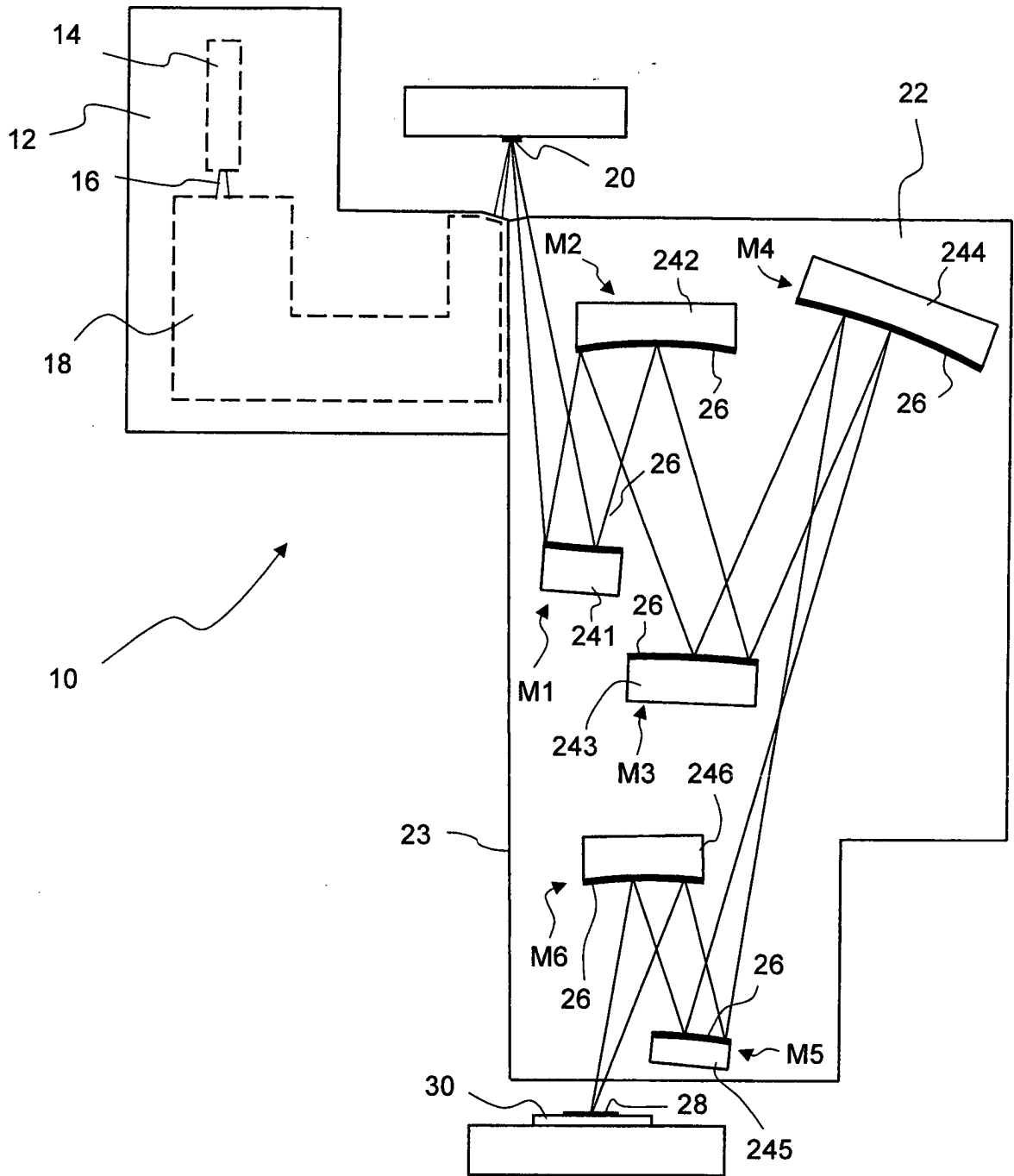


Fig. 1

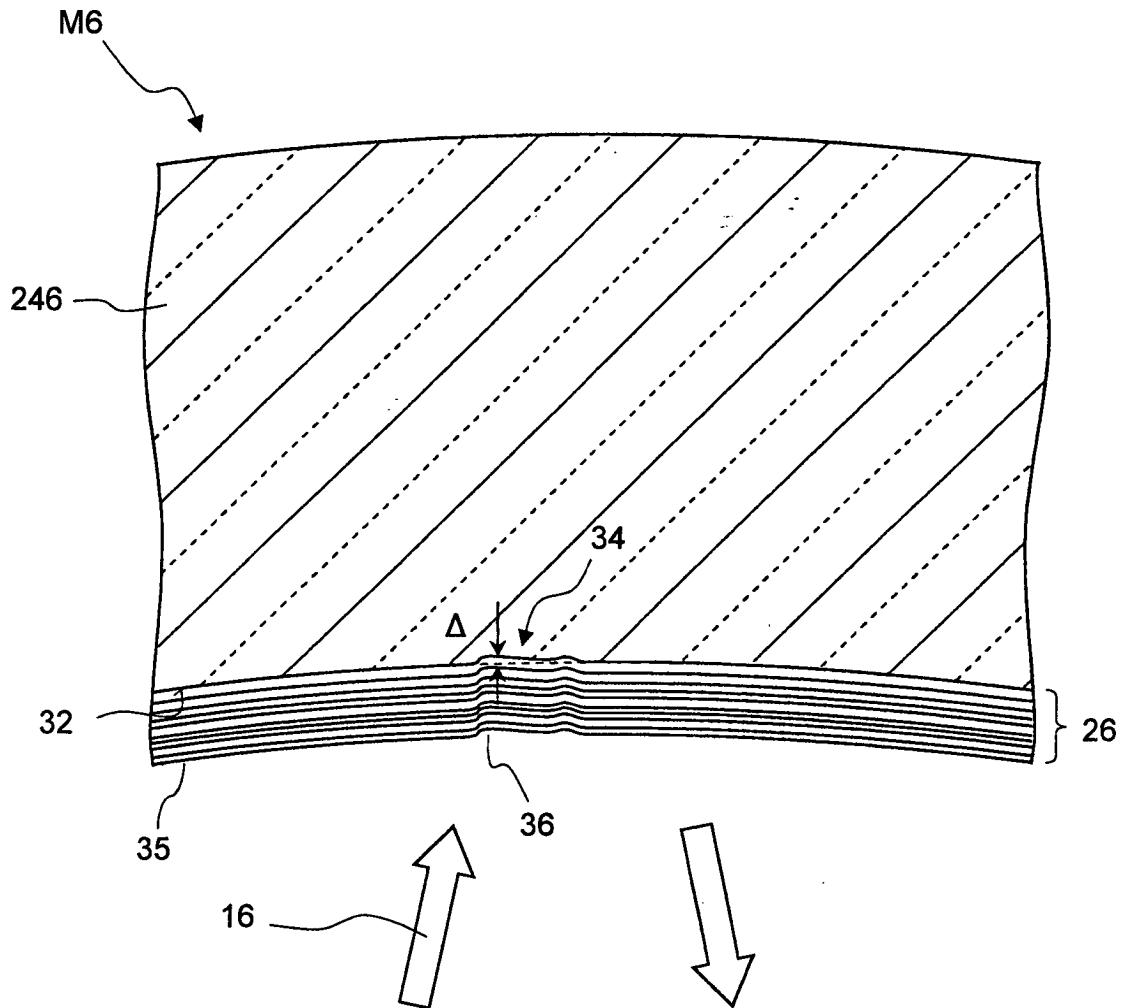


Fig. 2

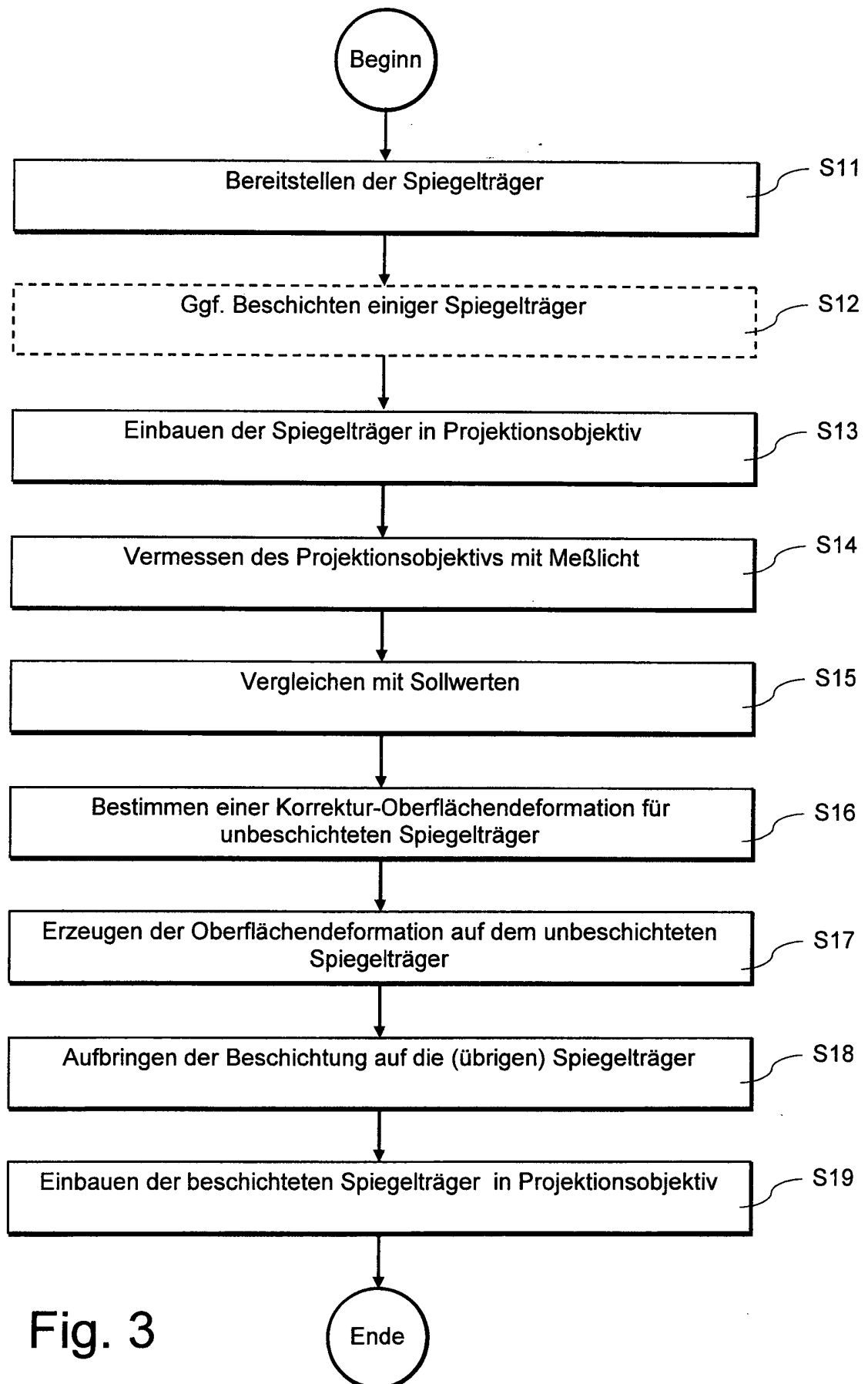


Fig. 3

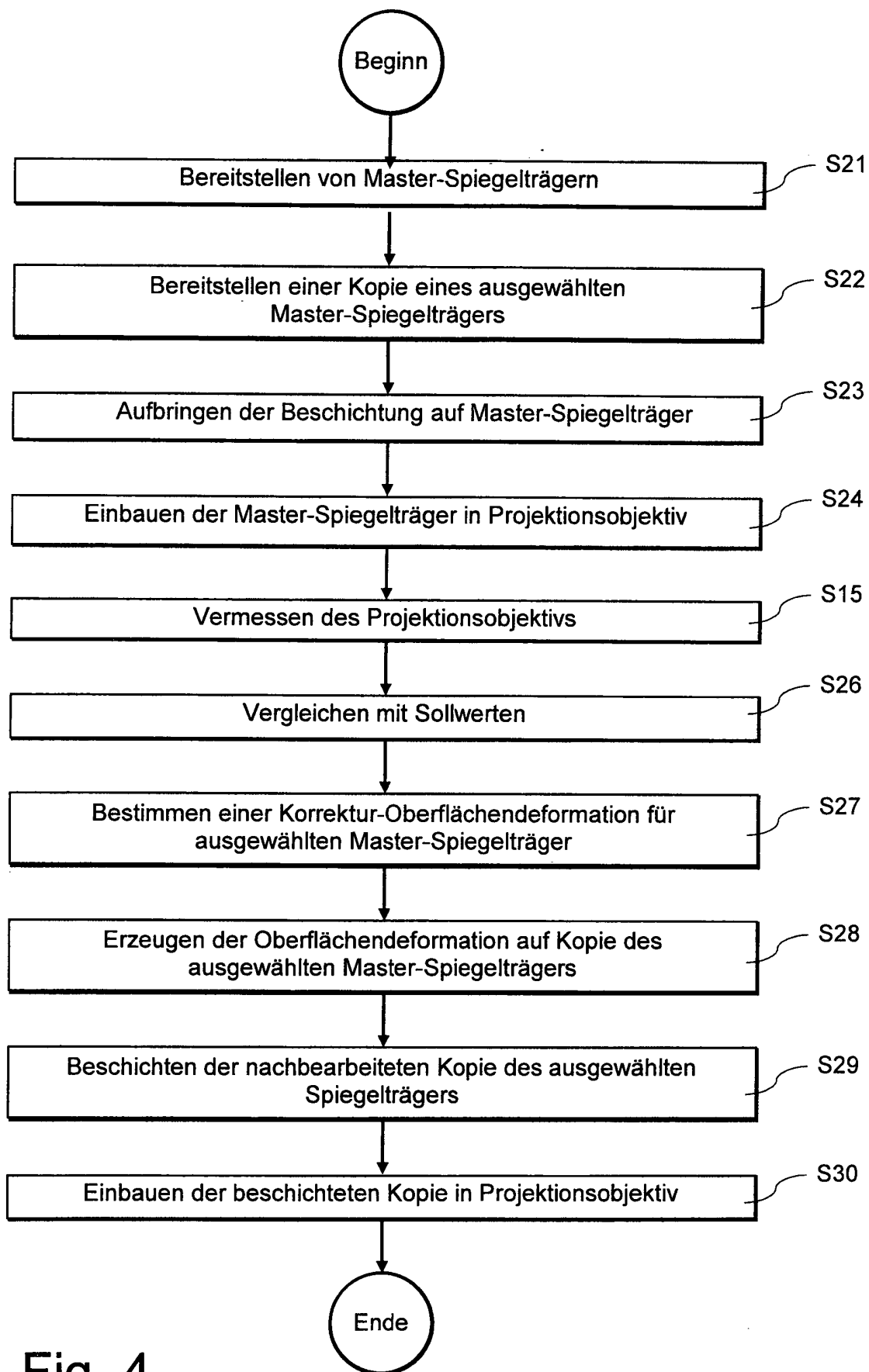


Fig. 4