



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) DE 10 2008 043 162 A1 2009.04.30

(12)

## Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: 10 2008 043 162.1

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: G03F 7/20 (2006.01)

(22) Anmeldetag: 24.10.2008

(43) Offenlegungstag: 30.04.2009

(66) Innere Priorität:  
10 2007 051 668.3 26.10.2007

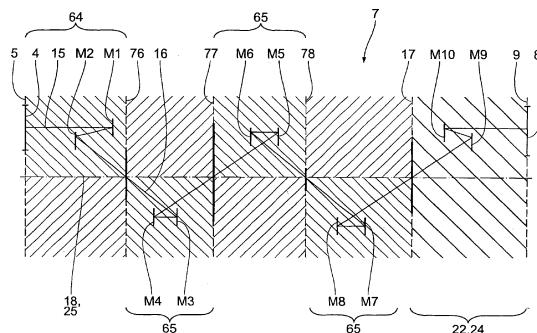
(72) Erfinder:  
Mann, Hans-Jürgen, Dr., 73447 Oberkochen, DE

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

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Abbildende Optik sowie Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie mit einer derartigen abbildenden Optik**

(57) Zusammenfassung: Eine abbildende Optik (7) mit einer Mehrzahl von Spiegeln (M1 bis M10) bildet ein Objektfeld in einer Objektebene (5) in ein Bildfeld (8) in einer Bildebene (9) ab. Abbildungsstrahlen (15) verlaufen im Strahlengang zwischen nicht obskurierten Spiegeln (M1 bis M8) mindestens einen Mehrfachdurchgangsbereich zwischen voneinander beabstandeten Ebenen, die parallel zur Objektebene (5) und/oder zur Bildebene (9) angeordnet sind. Die abbildende Optik (7) hat mindestens eine Pupillenebene (76, 77, 78, 17). Letztere ist außerhalb der Mehrfachdurchgangsbereiche angeordnet. Es resultiert eine abbildende Optik, deren Bildfehlerkorrektur vereinfacht ist. Auch weitere Varianten abbildender Optiken mit entsprechend vereinfachter Bildfehlerkorrektur werden vorgestellt.



## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft eine abbildende Optik nach den Oberbegriffen der Ansprüche 1, 3 und 4. Ferner betrifft die Erfindung eine Projektionsbelichtungsanlage mit einer derartigen abbildenden Optik, ein Verfahren zur Herstellung eines mikrostrukturierten Bauteils mit einer derartigen Projektionsbelichtungsanlage sowie ein mit diesem Verfahren hergestelltes mikrostrukturiertes Bauelement.

**[0002]** Abbildenden Optiken der eingangs genannten Art sind bekannt aus der US 6,750,948 B2, der US 2006/0232867 A1, der EP 0 267 766 A2, der US 7,209,286 B2 und der WO 2006/069 725 A1. Aus der WO 2005/098506 A1 ist eine katadioptrische abbildende Optik mit einem minimalen Ringfeldradius bekannt.

**[0003]** Es ist ein Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine abbildende Optik der eingangs genannten Art derart weiterzubilden, dass deren Bildfehlerkorrektur vereinfacht ist.

**[0004]** Diese Aufgabe ist erfindungsgemäß gelöst durch eine abbildende Optik mit den im Anspruch 1 angegebenen Merkmalen.

**[0005]** Dadurch, dass die mindestens eine Pupillenebene der abbildenden Optik außerhalb von Mehrfachdurchgangsbereichen im Strahlengang zwischen nicht olskurierten Spiegeln angeordnet ist, wird die Möglichkeit geschaffen, die abbildende Optik mit einem gebogenen Objektfeld mit kleinem Feldradius auszuführen, ohne dass dies zu Vignettierungsproblemen zwischen den Spiegeln der abbildenden Optik führt. Der kleine Feldradius führt dazu, dass das Objektfeld bei gegebener Feldgröße nahe an der optischen Achse der abbildenden Optik angeordnet ist. Dies erleichtert die Bildfehlerkorrektur der abbildenden Optik, da auf höhere Asphärenordnungen, die für achsferne Bereich benötigt werden und auch auf höhere Asphäritäten verzichtet werden kann. Die Spiegel der abbildenden Optik können daher mit geringen Abweichungen ihrer Reflexionsflächen von sphärischen Flächen ausgeführt sein. Es ist beispielsweise möglich, die abbildende Optik so auszuführen, dass die maximale Abweichung der Reflexionsflächen von einer an die Reflexionsflächen best angepassten Sphäre auch für Systeme mit einer numerischen Apertur im Bereich von 0,5 geringer ist als 500 µm, insbesondere geringer ist als 200 µm. Zudem vereinfacht sich die interferometrische Prüfung, da sich der Durchmesser der Parentasphäre verringert. Der Parentdurchmesser eines Spiegels ist definiert in dem Fachartikel „EUV Engineering Test Stand“ von D. A. Tichenor et al., Lawrence Livermore National Laboratory, 14. 02. 2000, [Fig. 6](#) (preprint UCRL-JC-137668). Trotz der kleinen Feldradien lässt sich bei der erfindungsgemäß abbildenden Optik die Forderung nach einer vignettierungsfreien Ausgestaltung insbesondere der nicht olskurierten Spiegel erfüllen, da die vom bogenförmigen Objektfeld ausgehenden, senkrecht zur optischen Achse entsprechend bogenförmigen Abbildungsstrahlenbündel in mehrfach von Abbildungslicht durchlaufenen Ebenen senkrecht zur optischen Achse Bogenformen haben, die sich zur gleichen Richtung hin öffnen. Derartige bogenförmige Bündel können ohne größeren Aufwand so ausgelegt werden, dass sie mit in etwa konstantem Abstand nebeneinander liegen, so dass beispielsweise eine einfache Trennung zwischen einem reflektierten und einem durchgelassenen gebogenen Bündel in einer mehrfach von Abbildungslicht durchlaufenden Ebene senkrecht zur optischen Achse möglich ist. Die mindestens eine Pupillenebene ist dabei so außerhalb der Mehrfachdurchgangsbereiche angeordnet, dass die Pupillenebene nicht mit Reflexionsflächen zusammenfällt, die die Mehrfachdurchgangsbereiche begrenzen. Dies stellt sicher, dass im Strahlengang innerhalb der Mehrfachdurchgangsbereiche keine Pupillenebene vorliegt. Bei der abbildenden Optik kann es sich um eine rein katoptrische, prinzipiell aber auch um eine katadioptrische Optik handeln. Soweit die erfindungsgemäß abbildende Optik mehr als eine Pupillenebene hat, liegen alle diese Pupillenebenen außerhalb von Mehrfachdurchgangsbereichen im Strahlengang zwischen nicht olskurierten Spiegeln. Alle diese Pupillenebenen sind dann so außerhalb der Mehrfachdurchgangsbereiche angeordnet, dass die Pupillenebene nicht mit Reflexionsflächen zusammenfällt, die die Mehrfachdurchgangsbereiche begrenzen, die also randseitig noch zu den Mehrfachdurchgangsbereichen gehören.

**[0006]** Die Abbildungsstrahlen können im Strahlengang zwischen olskurierten Spiegeln mindestens einen weiteren Mehrfachdurchgangsbereich zwischen voneinander beabstandeten Ebenen, die parallel zur Objekt ebene und/oder zur Bildebene angeordnet sind, mehrfach durchlaufen, wobei mindestens eine Pupillenebene und bevorzugt alle Pupillenebenen außerhalb sowohl der Mehrfachdurchgangsbereiche zwischen den nicht olskurierten Spiegeln als auch der Mehrfachdurchgangsbereiche zwischen den olskurierten Spiegeln angeordnet sind. Diese Anordnung der mindestens einen Pupillenebene der erfindungsgemäß abbildenden Optik gewährleistet, dass ein Beleuchtungsbündel in dieser Pupillenebene zugänglich ist.

**[0007]** Das Objektfeld kann die Form eines Bogenfeldes haben, das begrenzt ist durch zwei Teilkreise mit gleichem Radius, die zueinander um einen Abstand parallel verschoben sind, sowie begrenzt ist durch zwei

die beiden Enden beider Teilkreise jeweils verbindende Grenzlinien, wobei dieses Bogenfeld einen Azimutwinkel haben kann, der größer ist als  $75^\circ$ . Derartige Bogenfelder haben bei gegebener Feldgröße einen vorteilhaft geringen Bogenfeldradius. Der Azimutwinkel kann größer sein als  $80^\circ$ , als  $90^\circ$ , als  $100^\circ$ , als  $110^\circ$ , als  $120^\circ$ , als  $130^\circ$ , als  $140^\circ$ , als  $150^\circ$ , als  $160^\circ$  und sogar größer sein als  $170^\circ$ . Bei gegebenem Abstand der beiden Teilkreise, der bei einer scannenden Projektionsbelichtungsanlage als Scanschlitzlänge bezeichnet wird, und gegebener Breite des Bogenfeldes, die bei einer scannenden Projektionsbelichtungsanlage als Scanschlitzbreite bezeichnet wird, kann der Azimutwinkel bis zum theoretisch möglichen maximalen Limit gesteigert sein. Entsprechende Bogenfelder werden im Stand der Technik nur durch Verwendung katadioptrischer Designs erreicht, wie beispielsweise in der WO 2005/098506 A1 beschrieben. Dort ist es möglich, in Abschnitten der abbildenden Optik, in denen Vignettierungsprobleme auftreten, z. B. in der Nähe der Objektebene, dioptrische Elemente einzusetzen.

**[0008]** Entsprechende Vorteile hat eine erfindungsgemäße abbildende Optik mit einer Mehrzahl von Spiegeln, die ein Objektfeld in einer Objektebene in ein Bildfeld in einer Bildebene abbilden,

- wobei die abbildende Optik eine optische Achse aufweist,
- wobei die abbildende Optik mindestens eine nicht obskurierte Spiegelgruppe aufweist, die räumlich zwischen einer der nachfolgenden Varianten von Begrenzungsebenen der abbildenden Optik angeordnet ist:
- zwischen einer Feldebene und einer direkt nachgeordneten Pupillenebene;
- zwischen einer ersten Pupillenebene und einer direkt nachgeordneten zweiten Pupillenebene.

**[0009]** Die die mindestens eine nicht obskurierte Spiegelgruppe begrenzenden Feld- beziehungsweise Pupillenebenen sind wiederum außerhalb dieser obskurierten Spiegelgruppe derart angeordnet, dass diese begrenzenden Feld- beziehungsweise Pupillenebenen nicht mit Reflexionsflächen zusammenfallen, die eine Erstreckung der mindestens einen nicht obskurierten Spiegelgruppe längs der optischen Achse begrenzen. Die die mindestens eine nicht obskurierte Spiegelgruppe begrenzenden Feld- beziehungsweise Pupillenebenen liegen also beabstandet zu der mindestens einen zwischenliegenden nicht obskurierten Spiegelgruppe.

**[0010]** Die abbildende Optik kann derart ausgeführt sein, dass ein Hauptstrahl, der von einem zentralen Objektfeldpunkt ausgeht und durch das Zentrum von Pupillen in den Pupillenebenen der abbildenden Optik verläuft, im Meridionalschnitt zwischen Spiegeln der mindestens einen nicht obskurierten Spiegelgruppe der abbildenden Optik derart verläuft, dass er eine Haupt-Trennebene nicht durchtritt,

- in der die optische Achse liegt und
- auf der die Normale von einem zentralen Objektfeldpunkt auf die optische Achse senkrecht steht.

**[0011]** Die abbildende Optik kann eine zentrale Pupillenobskuration haben, also eine Anordnung, bei der in einer Pupillenebene innerhalb eines Bereichs, in dem ein Durchgang von Abbildungsstrahlen möglich ist, kein Durchgang von Abbildungsstrahlen möglich ist.

**[0012]** Eine derartige Pupillenobskuration kann als zentrale Pupillenobskuration ausgeführt sein. Dies ist jedoch nicht zwingend. Es reicht aus, wenn innerhalb eines ansonsten von Abbildungsstrahlen durchlaufenen Bereichs in der Pupillenebene ein Bereich vorliegt, der nicht von Abbildungsstrahlen durchtreten werden kann.

**[0013]** Das Objektfeld und das Bildfeld können beabstandet zur optischen Achse angeordnet sein.

**[0014]** Die erfindungsgemäße abbildende Optik ermöglicht den Einsatz nicht obskurierten Spiegelgruppen auf beiden Seiten der Haupt-Trennebene, ohne dass Vignettierungsprobleme auftreten, da durch die Trennung über die Pupillenebene zwischen den nicht obskurierten Spiegelgruppen sichergestellt ist, dass in mehrfach von Abbildungslicht durchlaufenen Ebenen senkrecht zur optischen Achse der abbildenden Optik eine Trennung der verschiedenen bogenförmigen Abbildungslichtbündel möglich ist.

**[0015]** Die abbildende Optik kann derart gestaltet sein, dass

- Abbildungsstrahlen im Strahlengang zwischen nicht obskurierten Spiegeln mindestens einen Mehrfachdurchgangsbereich zwischen voneinander beabstandeten Ebenen, die parallel zur Objektebene und/oder zur Bildebene angeordnet sind, mehrfach durchlaufen,
- im Meridionalschnitt die Abbildungsstrahlen zwischen diesen, den Mehrfachdurchgangsbereich begrenzenden Ebenen die Haupt-Trennebene nicht durchtreten.

**[0016]** Bei einer derartigen Ausgestaltung lässt sich eine besonders gute Trennung von Abbildungsstrahlbündeln in mehrfach von Abbildungslicht durchlaufenen Ebenen erreichen.

**[0017]** Die abbildende Optik kann eine Mehrzahl von Spiegeln haben, die ein Objektfeld in einer Objektebene in ein Bildfeld in einer Bildebene abbilden, wobei die abbildende Optik mindestens vier Spiegel hat, von denen mindestens zwei nicht obskuriert sind, und wobei der nicht obskurierten Spiegel als sphärischer Spiegel ausgebildet ist. Eine derartige Ausgestaltung ermöglicht den Einsatz eines vergleichsweise kostengünstig herstellbaren sphärischen Spiegels. Es wurde erkannt, dass eine solche Anordnung insbesondere bei Einsatz eines kleinen Ringfeldradius möglich ist.

**[0018]** Die abbildende Optik kann mehrere nicht obskurierte Spiegelgruppen haben, zwischen denen im Abbildungsstrahlengang jeweils eine Pupillenebene angeordnet ist. Eine derartige Anordnung stellt sicher, dass die die nicht obskurierten Systeme trennende Pupillenebene immer in einem nur einfach von Abbildungslicht durchtretenen Bereich der abbildenden Optik, also nicht in einem Mehrfachdurchgangsbereich, liegt. Mindestens ein obskuriertes Spiegel mit einer Durchgangsöffnung zum Durchtritt von Abbildungslicht erleichtert das Design der abbildenden Optik im Blick auf eine Minimierung des maximalen Einfallsinkels.

**[0019]** Die abbildende Optik kann genau sechs Spiegel aufweisen, von denen mindestens drei Spiegel, bevorzugt genau vier Spiegel, obskuriert sind. Die abbildende Optik kann genau acht Spiegel aufweisen, von denen mindestens drei Spiegel, bevorzugt genau vier Spiegel, obskuriert sind. Die abbildende Optik kann genau zehn Spiegel aufweisen, von denen mindestens drei Spiegel, bevorzugt genau vier Spiegel, obskuriert sind. Derartige Designs haben sich zur Minimierung des Verhältnisses aus dem maximalen Einfallsinkel und der bildseitigen numerischen Apertur als besonders geeignet herausgestellt.

**[0020]** Die erfindungsgemäße abbildende Optik kann die vorstehend diskutierten Merkmale auch in anderen als den beanspruchten Kombinationen aufweisen.

**[0021]** Die Vorteile einer erfindungsgemäßen Projektionsbelichtungsanlage entsprechen denen, die vorstehen in Bezug auf die erfindungsgemäße abbildende Optik ausgeführt wurden. Die Lichtquelle der Projektionsbelichtungsanlage kann breitbandig ausgeführt sein und beispielsweise eine Bandbreite haben, die größer ist als 1 nm, die größer ist als 10 nm oder die größer ist als 100 nm. Zudem kann die Projektionsbelichtungsanlage so ausgeführt sein, dass sie mit Lichtquellen unterschiedlicher Wellenlängen betrieben werden kann. Auch Lichtquellen für andere, insbesondere für die Mikrolithographie eingesetzte Wellenlängen, sind im Zusammenhang mit der erfindungsgemäßen abbildenden Optik einsetzbar, beispielsweise Lichtquellen mit den Wellenlängen 365 nm, 248 nm, 193 nm, 157 nm, 126 nm, 109 nm und insbesondere auch mit Wellenlängen, die kleiner sind als 100 nm, beispielsweise zwischen 5 nm und 30 nm.

**[0022]** Die Lichtquelle der Projektionsbelichtungsanlage kann zur Erzeugung von Beleuchtungslicht mit einer Wellenlänge zwischen 5 nm und 30 nm ausgebildet sein. Eine derartige Lichtquelle erfordert Reflexionsbeschichtungen auf den Spiegeln, die, um eine Mindestreflektivität zu erfüllen, nur eine geringe Einfallsinkel-Akzeptanzbandbreite haben. Zusammen mit der erfindungsgemäßen abbildenden Optik kann diese Forderung einer geringen Einfallsinkel-Akzeptanzbandbreite erfüllt werden.

**[0023]** Entsprechende Vorteile gelten für ein erfindungsgemäßes Herstellungsverfahren und das hierdurch hergestellte mikrostrukturierte Bauteil.

**[0024]** Ausführungsbeispiele der Erfindung werden nachfolgend anhand der Zeichnung näher erläutert. In dieser zeigen:

**[0025]** [Fig. 1](#) schematisch eine Projektionsbelichtungsanlage für die EUV-Mikrolithographie;

**[0026]** [Fig. 2](#) ein Ausführungsbeispiel einer abbildenden Optik der Projektionsbelichtungsanlage, dargestellt im Meridionalschnitt;

**[0027]** [Fig. 3](#) vergrößert ein Objektfeld der abbildenden Optik nach [Fig. 2](#);

**[0028]** [Fig. 4](#) einen Schnitt durch Abbildungsstrahlen ausgewählter Feldpunkte sowie durch eine optische Achse der abbildenden Optik nach [Fig. 2](#) im Bereich einer Objektebene von dieser;

**[0029]** [Fig. 5](#) einen Schnitt durch die Abbildungsstrahlen nach [Fig. 4](#) durch eine Ebene V-V in [Fig. 2](#);

**[0030]** [Fig. 6](#) einen Schnitt durch die Abbildungsstrahlen nach [Fig. 4](#) durch eine Ebene VI-VI in [Fig. 2](#);

[0031] [Fig. 7](#) ein Ergebnis einer partiell kohärenten Luftbildberechnung einer Strukturabbildung mit der abbildenden Optik nach [Fig. 2](#) in Form eines Diagramms, welches eine relative Intensität der Abbildungsstrahlen als Funktion einer Verlagerung im Bildfeld der abbildenden Optik darstellt;

[0032] [Fig. 8](#) in einer zu [Fig. 7](#) ähnlichen Darstellung das Ergebnis einer partiell kohärenten Luftbildberechnung einer Strukturabbildung mit im Vergleich zu [Fig. 7](#) geringerer Strukturbreite;

[0033] [Fig. 9](#) in einer zu [Fig. 2](#) ähnlichen Darstellung ein weiteres Ausführungsbeispiel einer abbildenden Optik für die Projektionsbelichtungsanlage nach [Fig. 1](#);

[0034] [Fig. 10](#) in einer zu [Fig. 4](#) ähnlichen Darstellung Durchstoßpunkte von Abbildungsstrahlen ausgewählter Feldpunkte der abbildenden Optik nach [Fig. 9](#);

[0035] [Fig. 11](#) einen Schnitt durch die Abbildungsstrahlen nach [Fig. 10](#) durch eine Ebene XI-XI in [Fig. 9](#);

[0036] [Fig. 12](#) einen Schnitt durch die Abbildungsstrahlen nach [Fig. 10](#) durch eine Ebene XII-XII in [Fig. 9](#);

[0037] [Fig. 13](#) in einer zu [Fig. 2](#) ähnlichen Darstellung ein weiteres Ausführungsbeispiel einer abbildenden Optik für die Projektionsbelichtungsanlage nach [Fig. 1](#);

[0038] [Fig. 14](#) in einer zu [Fig. 2](#) ähnlichen Darstellung ein weiteres Ausführungsbeispiel einer abbildenden Optik für die Projektionsbelichtungsanlage nach [Fig. 1](#); und

[0039] [Fig. 15](#) und [Fig. 16](#) schematisierte Abbildungsstrahlenverläufe durch eine abbildende Optik, die im Vergleich zu den vorstehend dargestellten Ausführungsbeispielen um weitere, objektseitig nicht obskurierte Spiegelgruppen erweitert sind.

[0040] Eine Projektionsbelichtungsanlage 1 für die Mikrolithographie hat eine Lichtquelle 2 für Beleuchtungslicht bzw. Beleuchtungsstrahlung 3. Bei der Lichtquelle 2 handelt es sich um eine EUV-Lichtquelle, die Licht in einem Wellenlängenbereich beispielsweise zwischen 5 nm und 30 nm, insbesondere zwischen 5 nm und 10 nm erzeugt. Bei der Lichtquelle 2 kann es sich insbesondere um eine Lichtquelle mit einer Wellenlänge von 6,9 nm handeln. Auch andere EUV-Wellenlängen sind möglich. Generell sind sogar beliebige Wellenlängen, zum Beispiel sichtbare Wellenlängen oder auch andere Wellenlängen, die in der Mikrolithographie Verwendung finden können und für die geeigneten Laserlichtquellen und/oder LED-Lichtquellen zur Verfügung stehen (beispielsweise 365 nm, 248 nm, 193 nm, 157 nm, 129 nm, 109 nm), für das in der Projektionsbelichtungsanlage 1 geführte Beleuchtungslicht 3 möglich. Ein Strahlengang des Beleuchtungslights 3 ist in der [Fig. 1](#) äußerst schematisch dargestellt.

[0041] Zur Führung des Beleuchtungslights 3 von der Lichtquelle 2 hin zu einem Objektfeld 4 (vgl. [Fig. 3](#)) in einer Objektebene 5 dient eine Beleuchtungsoptik 6. Mit einer Projektionsoptik bzw. abbildenden Optik 7 wird das Objektfeld 4 in ein Bildfeld 8 (vgl. [Fig. 2](#)) in einer Bildebene 9 mit einem vorgegebenen Verkleinerungsmaßstab abgebildet. Für die Projektionsoptik 7 kann eines der in den [Fig. 2ff.](#) dargestellten Ausführungsbeispiele eingesetzt werden. Die Projektionsoptik 7 nach [Fig. 2](#) verkleinert um einen Faktor 8. Auch andere Verkleinerungsmaßstäbe sind möglich, zum Beispiel 4x, 5x oder auch Verkleinerungsmaßstäbe, die größer sind als 8x. Für das Beleuchtungslight 3 mit EUV-Wellenlänge eignet sich insbesondere ein Abbildungsmaßstab von 8x, da hierdurch ein objektseitiger Einfallsinkel auf einer Reflexionsmaske 10 klein gehalten werden kann. Ein Abbildungsmaßstab von 8x führt zudem nicht zur Notwendigkeit, unnötig große Masken einzusetzen. Die Bildebene 9 ist bei der Projektionsoptik 7 in den Ausführungen nach den [Fig. 2ff.](#) parallel zur Objektebene 5 angeordnet. Abgebildet wird hierbei ein mit dem Objektfeld 4 zusammenfallender Ausschnitt der Reflexionsmaske 10, die auch als Retikel bezeichnet wird.

[0042] Die Abbildung durch die Projektionsoptik 7 erfolgt auf die Oberfläche eines Substrats 11 in Form eines Wafers, der von einem Substrathalter 12 getragen wird. In der [Fig. 1](#) ist schematisch zwischen dem Retikel 10 und der Projektionsoptik 7 ein in diese einlaufendes Strahlenbündel 13 des Beleuchtungslights 3 und zwischen der Projektionsoptik 7 und dem Substrat 11 ein aus der Projektionsoptik 7 auslaufendes Strahlenbündel 14 des Beleuchtungslights 3 dargestellt. Eine bildfeldseitige numerische Apertur der Projektionsoptik 7 in der Ausführung nach [Fig. 2](#) beträgt 0,40. Dies ist in der [Fig. 1](#) nicht maßstäblich wiedergegeben.

[0043] Zur Erleichterung der Beschreibung der Projektionsbelichtungsanlage 1 sowie der verschiedenen Ausführungen der Projektionsoptik 7 ist in der Zeichnung ein kartesisches xyz-Koordinatensystem angegeben, aus

dem sich die jeweilige Lagebeziehung der in den Figuren dargestellten Komponenten ergibt. In der [Fig. 1](#) verläuft die x-Richtung senkrecht zur Zeichenebene in diese hinein. Die y-Richtung verläuft nach rechts und die z-Richtung nach unten.

**[0044]** Die Projektionsbelichtungsanlage **1** ist vom Scannertyp. Sowohl das Retikel **10** als auch das Substrat **11** werden beim Betrieb der Projektionsbelichtungsanlage **1** in der y-Richtung gescannt. Auch ein Steppertyp der Projektionsbelichtungsanlage **1**, bei dem zwischen einzelnen Belichtungen des Substrats **11** eine schrittweise Verlagerung des Retikels **10** und des Substrats **11** in der y-Richtung erfolgt, ist möglich.

**[0045]** [Fig. 2](#) zeigt das optische Design einer ersten Ausführung der Projektionsoptik **7**. Dargestellt ist der Strahlengang jeweils dreier Einzelstrahlen **15**, die von zwei in der [Fig. 2](#) zueinander in der y-Richtung beabstandeten Objektfeldpunkten ausgehen. Die drei Einzelstrahlen **15**, die zu einem dieser zwei Objektfeldpunkte gehören, sind jeweils drei unterschiedlichen Beleuchtungsrichtungen für die zwei Objektfeldpunkte zugeordnet. Hauptstrahlen **16**, die durch das Zentrum einer Pupille in einer Pupillenebene **17** der Projektionsoptik **7** verlaufen, sind in der [Fig. 2](#) nur aus darstellerischen Gründen eingezeichnet, da es sich aufgrund der zentralen Pupillenobskuration nicht um reale Abbildungsstrahlengänge der Projektionsoptik **7** handelt. Diese Hauptstrahlen **16** verlaufen, ausgehend von der Objektebene **5**, zunächst divergent. Dies wird nachfolgend auch als negative Schnittweite einer Eintrittspupille der Projektionsoptik **7** bezeichnet. Die Eintrittspupille der Projektionsoptik **7** nach [Fig. 2](#) liegt nicht innerhalb der Projektionsoptik **7**, sondern im Strahlengang vor der Objektebene **5**. Dies ermöglicht es beispielsweise, im Strahlengang vor der Projektionsoptik **7** eine Pupillenkomponente der Beleuchtungsoptik **6** in der Eintrittspupille der Projektionsoptik **7** anzutreffen, ohne dass zwischen dieser Pupillenkomponente und der Objektebene **5** weitere abbildende optische Komponenten vorhanden sein müssen. Alternativ hierzu ist auch eine positive Schnittweite der Eintrittspupille oder als weitere Alternative ein objektseitig telezentrischer Strahlengang möglich. Letzterer wird beispielsweise im Zusammenhang mit einer Reflexionsmaske als Retikel **10** in der Objektebene **5** unter Zuhilfenahme eines Strahlteilerelements oder in Verbindung mit einer Transmissionsmaske als Retikel in der Objektebene **5** eingesetzt.

**[0046]** Die Projektionsoptik **7** nach [Fig. 2](#) hat insgesamt sechs Spiegel, die in der Reihenfolge des Strahlengangs der Einzelstrahlen **15**, ausgehend vom Objektfeld **4**, mit M1 bis M6 durchnummeriert sind. Dargestellt sind in der [Fig. 2](#) lediglich die berechneten Reflexionsflächen der Spiegel M1 bis M6. Die Spiegel M1 bis M6 sind in der Regel größer als die tatsächlich genutzten Reflexionsflächen.

**[0047]** Die optischen Daten der Projektionsoptik **7** nach [Fig. 2](#) werden nachfolgend anhand zweier Tabellen wiedergegeben. Die erste Tabelle zeigt in der Spalte „Radius“ jeweils den Krümmungsradius der Spiegel M1 bis M6. Die dritte Spalte (Dicke) beschreibt den Abstand, ausgehend von der Objektebene **5**, jeweils zur nachfolgenden Oberfläche in z-Richtung.

**[0048]** Die zweite Tabelle beschreibt die genaue Oberflächenform der Reflexionsflächen der Spiegel M1 bis M6, wobei die Konstanten K sowie A bis E in folgende Gleichung für die Pfeilhöhe z einzusetzen sind:

$$\begin{aligned} z(h) = & \\ & = \frac{ch^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K)c^2h^2}} + \\ & + Ah^4 + Bh^6 + Ch^8 + Dh^{10} + Eh^{12} \end{aligned}$$

h stellt hierbei den Abstand zu einer optischen Achse **18** der Projektionsoptik **7** dar. Es gilt also  $h^2 = x^2 + y^2$ . Für c wird der Kehrwert von „Radius“ eingesetzt.

Oberfläche	Radius (1/c)	Dicke	Betriebsmodus
Objektebene	UNENDLICH	348,222	
M1	-379,407	-157,578	REFL
M2	-202,767	1353,319	REFL
BLENDE	UNENDLICH	0,000	
M3	1127,182	-1195,630	REFL
M4	1374,690	1626,377	REFL
M5	-975,061	-330,747	REFL
M6	681,443	375,745	REFL
Bildebene	UNENDLICH	0,000	

Oberfläche	K	A	B
M1	0,000000E+00	-6,780209E-11	-1,455553E-15
M2	0,000000E+00	2,307286E-09	2,337524E-14
M3	0,000000E+00	1,500225E-09	1,781600E-14
M4	0,000000E+00	-1,573831E-12	-8,140292E-19
M5	0,000000E+00	6,446612E-10	2,597249E-15
M6	0,000000E+00	3,799673E-10	1,680031E-15
Oberfläche	C	D	E
M1	-3,423358E-21	0,000000E+00	0,000000E+00
M2	5,367802E-18	0,000000E+00	0,000000E+00
M3	-2,232896E-19	0,000000E+00	0,000000E+00
M4	-5,798511E-26	0,000000E+00	0,000000E+00
M5	4,409975E-20	1,865473E-25	-9,721913E-32
M6	5,791990E-21	0,000000E+00	0,000000E+00

**[0049]** Die Spiegel M1 und M2 einer ersten Spiegelgruppe **19** werden ringsegmentförmig und in Bezug auf die optische Achse **18** off-axis genutzt. Die genutzte optische Reflexionsfläche der Spiegel M1 und M2 liegt also von der optischen Achse **18** entfernt. Das Objektfeld **4** und das Bildfeld **8** sind beabstandet zur optischen Achse **18** angeordnet. Die Reflexionsflächen aller Spiegel M1 bis M6 sind gemäß obiger Gleichung für die Pfeilhöhe z in Bezug auf die optische Achse **18** rotationssymmetrisch.

**[0050]** Die optisch genutzten Bereiche der Spiegel M1 und M2 haben keine Durchgangsöffnung zum Durchtritt von Abbildungslicht, sind also nicht obskuriert. Bei der ersten Spiegelgruppe **19** handelt es sich also um eine nicht obskurierte Spiegelgruppe. Die Reflexionsflächen der Spiegel M1 und M2 sind einander zugewandt.

**[0051]** Die Spiegel M1, M4, M5 und M6 sind als Konkavspiegel ausgeführt. Die Spiegel M2 und M3 sind als Konvexspiegel ausgeführt.

**[0052]** Im Abbildungsstrahlengang zwischen den Spiegeln M2 und M3 durchtreten die Einzelstrahlen **15** eine Durchgangsöffnung **20** im Spiegel M4. Der Spiegel M4 wird um die Durchgangsöffnung **20** herum genutzt. Beim Spiegel M4 handelt es sich also um einen obskurierten Spiegel. Neben dem Spiegel M4 sind auch die Spiegel M3, M5 und M6 obskuriert, die ebenfalls jeweils eine nahezu zentrische Durchgangsöffnung **20** aufweisen. Insgesamt liegen bei der Projektionsoptik **7** also zunächst zwei nicht obskurierte Spiegel, nämlich die Spiegel M1 und M2, und nachfolgend vier obskurierte Spiegel, nämlich die Spiegel M3 bis M6, vor.

**[0053]** Die Pupillenebene **17** liegt im Strahlengang in der Projektionsoptik **7** im Bereich der Reflexion der Einzelstrahlen **15** am Spiegel M3.

**[0054]** Die Spiegel M1 und M4 sind, was die Orientierung ihrer Reflexionsflächen angeht, Rücken an Rücken angeordnet.

**[0055]** Im Abbildungsstrahlengang zwischen den Spiegeln M4 und M5 liegt eine Zwischenbildebene **21** der Projektionsoptik **7**. Die Einzelstrahlen **15** durchtreten die Zwischenbildebene **21** direkt nach dem Durchgang der Einzelstrahlen **15** durch die Durchtrittsöffnung **20** des Spiegels M3.

**[0056]** Die Spiegel M3 und M4 stellen eine erste obskurierte Spiegelgruppe **22** der Projektionsoptik **7** zwischen der Pupillenebene **17** und der Zwischenbildebene **21** dar, die der nicht obskurierten Spiegelgruppe **19** im Abbildungsstrahlengang nachgeordnet ist. Die Reflexionsflächen der Spiegel M3 und M4 sind einander zugewandt.

**[0057]** Im Strahlengang zwischen der Zwischenbildebene **21** und dem Spiegel M5 durchtreten die Einzelstrahlen **15** die Durchgangsöffnung **20** im Spiegel M6. Im Bereich der Reflexion der Einzelstrahlen **15** am Spiegel M5 liegt eine weitere Pupillenebene **23** der Projektionsoptik **7** vor.

**[0058]** Die Spiegel M5 und M6 stellen eine weitere obskurierte Spiegelgruppe **24** der Projektionsoptik **7** zwischen der Zwischenbildebene **20** und der Bildebene **9** dar, die der obskurierten Spiegelgruppe **22** nachgeordnet ist.

**[0059]** Die Reflexionsflächen der Spiegel M5 und M6 sind einander zugewandt.

**[0060]** Nach der Reflexion der Einzelstrahlen **15** am Spiegel M6 durchtreten die Einzelstrahlen **15** die Durchgangsöffnung **20** im Spiegel M5 und erreichen das Bildfeld **8**. Die nachfolgende Tabelle zeigt die maximalen und minimalen Einfallswinkel für die Einzelstrahlen **15** im Meridionalschnitt nach [Fig. 2](#). Es handelt sich hierbei jeweils um die maximalen und minimalen Einfallswinkel auf den Spiegeln M1 bis M6.

Spiegel	max. Einfallswinkel (Meridionalschnitt) [°]	min. Einfallswinkel (Meridionalschnitt) [°]
M1	7,52	5,87
M2	12,35	9,16
M3	10,38	0,81
M4	2,35	0,42
M5	12,10	1,66
M6	10,41	2,19

**[0061]** Ein Verhältnis aus dem maximalen Einfallswinkel von Abbildungsstrahlung auf den Reflexionsflächen der Spiegel M1 bis M6 und der numerischen Apertur der Projektionsoptik **7** ist also vorgegeben durch den maximalen Einfallswinkel auf dem Spiegel M2, der  $12,35^\circ$  beträgt. Das Verhältnis aus diesem maximalen Einfallswinkel und der numerischen Apertur beträgt bei der Projektionsoptik **7** nach [Fig. 2](#) also  $30,9^\circ$ .

**[0062]** Der kleine maximale Einfallswinkel führt zur Möglichkeit, eine Reflexionsbeschichtung auch für kleine EUV-Wellenlängen beispielsweise im Bereich von 6,9 nm einzusetzen, die aufgrund des kleinen maximalen Einfallswinkels eine vergleichsweise große Einfallswinkel-Akzeptanzbandbreite haben. Dies wird nachfolgend noch anhand der [Fig. 14](#) erläutert. Diese Einfallswinkel-Akzeptanzbandbreite der Reflexionsbeschichtung vergrößert sich, je kleiner der maximale Einfallswinkel ist, für den die Reflexionsbeschichtung ausgelegt ist. Auch Reflexionsbeschichtungen, die als Schichtstapel mit einer großen Anzahl insbesondere alternierend aufeinanderfolgender Schichtmaterialien mit unterschiedlichem Brechungsindex ausgeführt sind, sind möglich. Derartige Beschichtungen haben beim Einsatz vom Beleuchtungslicht **3** mit einer Wellenlänge, die kleiner ist als 10 nm, eine entsprechend geringe Einfallswinkel-Akzeptanzbandbreite. Die Beleuchtungsoptik **7** kann daher mit im Vergleich zum Stand der Technik geringeren Reflexionsverlusten sowie mit geringeren Unterschieden in der Reflektivität der einzelnen Spiegel über deren Reflexionsfläche auch bei derart geringen Wellenlängen eingesetzt werden.

**[0063]** Die optische Achse **18** ist in der [Fig. 2](#) strichpunktiert angedeutet. Diese strichpunktierte Linie stellt gleichzeitig die Schnittlinie einer Haupt-Trennebene **25** (xz-Ebene in der [Fig. 2](#)) mit der Meridionalebene (yz-Ebene in der [Fig. 2](#)) nach [Fig. 2](#) dar. Diese Haupt-Trennebene **25** steht senkrecht auf der Zeichenebene der [Fig. 2](#). In der Haupt-Trennebene **25** liegt die optische Achse **18**. Zudem steht eine Normale **26** von einem in der Meridionalebene nach [Fig. 2](#) liegenden zentralen Objektfeldpunkt auf die optische Achse **18** senkrecht auf der Haupt-Trennebene **25**. Diese Normale **26** liegt ebenfalls in der Zeichenebene nach [Fig. 2](#) und fällt mit der Schnittlinie der Objektebene **5** (xy-Ebene in der [Fig. 2](#)) mit der Meridionalebene, also der Zeichenebene

nach [Fig. 2](#), zusammen.

**[0064]** Die im Meridionalschnitt verlaufenden Abbildungsstrahlen des optischen Systems durchtreten in der ersten, nicht obskurierten Spiegelgruppe **19** der Projektionsoptik **7** die Haupt-Trennebene **25** nicht. Die Haupt-Trennebene **25** wird erst von Einzelstrahlen **15** nach der Reflexion am Spiegel M2 im Abbildungsstrahlengang zwischen den Spiegeln M2 und M3, also am Übergang zwischen den Spiegelgruppen **19** und **22**, durchtreten.

**[0065]** Von den Hauptstrahlen **16** wird die Haupt-Trennebene **25** erst in der Pupillenebene **17** durchtreten.

**[0066]** [Fig. 3](#) zeigt vergrößert das Objektfeld **4** der Projektionsoptik **7**. Das Bildfeld **8** hat, abgesehen davon, dass es um einen Faktor **8** verkleinert ist, exakt die gleiche Form. Das Feld **4** hat die Form eines Bogenfeldes, das begrenzt ist durch zwei Teilkreise **27, 28** mit gleichem Radius **R**, die zueinander in der y-Richtung um einen Abstand **YS** parallel verschoben sind. Zudem ist das Feld **4** begrenzt durch zwei die beiden Enden der Teilkreise **27, 28** jeweils verbindende Grenzlinien **29, 30**, die parallel zur Normalen **26** verlaufen. Die beiden Grenzlinien **29, 30** weisen zueinander einen Abstand **XS**, die sogenannte Scanschlitzbreite, auf. Die Haupt-Trennebene **25** durchtritt die beiden Grenzlinien **29, 30** mittig. Die optische Achse **18** liegt daher genau zwischen den Mitten der beiden Grenzlinien **29, 30**. Das Feld **4** ist aufgrund dieser Anordnung der optischen Achse **18** zwischen den Grenzlinien **29, 30** daher ein Feld mit einem minimalen Ringfeldradius **R**. Dieser ist gegeben durch folgende Beziehung:

$$R = S\sqrt{\left(\frac{XS}{2}\right)^2 + \left(\frac{YS}{2}\right)^2}$$

**[0067]** Das Objektfeld **4** hat bei der Projektionsoptik **7** nach [Fig. 2](#) die Dimensionen **XS** = 104 mm (Scanschlitzbreite) und **YS** = 8 mm (Scanschlitzlänge). Hieraus ergibt sich ein Ringfeldradius **R** des Objektfelds **4** von 52,154 mm.

**[0068]** Zwischen den Grenzlinien **29, 30** und dem in der [Fig. 3](#) oben dargestellten Teilkreis **28** hat das Feld **4** Begrenzungsübergänge **31, 32**, wo der Teilkreis **28** in die gerade verlaufenden Grenzlinien **29, 30** übergeht. Zwischen den Begrenzungsübergängen **31, 32** überstreicht ein Feldradiusvektor **33** einen Azimutwinkel **α**, der sich durch folgende Formel berechnet:

$$\alpha = 2\arcsin(\frac{1}{2} XS/R)$$

**[0069]** Für das Objektfeld **4** ergibt sich ein Azimutwinkel **α** von 171,2°. Den gleichen Azimutwinkel hat das Bildfeld **8**. Dieser hohe Azimutwinkel führt dazu, dass bei einer gegebenen **XS**-Erstreckung das Feld **4** maximal nahe an der optischen Achse **18** angeordnet ist. Dies erleichtert eine Abbildungsfehlerkorrektur bei der Abbildung durch das Projektionsobjektiv **7** zwischen dem Objektfeld **4** und dem Bildfeld **8**. Zudem führt der große Azimutwinkel zu kleinen Parentdurchmessern und zu kleinen Asphäritäten der Spiegel M1 bis M6. Der Parentdurchmesser eines Spiegels ist definiert in dem Fachartikel „EUV Engineering Test Stand“ von D. A. Tichenor et al., Lawrence Livermore National Laboratory, 14. 02. 2000, [Fig. 6](#) (preprint UCRL-JC-137668). Zudem ist es bei dem großem Azimutwinkel möglich, die Einfallswinkel auf den Spiegeln M1 bis M6 klein zu halten.

**[0070]** [Fig. 4](#) bis [Fig. 6](#) zeigen den Verlauf von Strahlenbündeln **34** zu ausgewählten Objektfeldpunkten innerhalb der nicht obskurierten Spiegelgruppe **19**. Die Strahlenbündel **34** aller Strahlenbündel-Gruppen, die nachfolgend im Zusammenhang mit den [Fig. 4](#) bis [Fig. 6](#) erläutert werden, sind jeweils den gleichen fünfundzwanzig Objektfeldpunkten zugeordnet. Dargestellt sind die Strahlenbündel **34** von insgesamt fünf Strahlenbündel-Gruppen **35, 36, 37, 38, 39**. Die Strahlenbündel-Gruppen **35** bis **39** sind in der [Fig. 4](#) von links nach rechts durchnummieriert. Jede Strahlenbündel-Gruppe **35** bis **39** hat fünf Strahlenbündel **34**, die zu Objektfeldpunkten mit dem gleichen x-Wert gehören und in y-Richtung äquidistant zueinander beabstandet sind. Die in der [Fig. 4](#) mittlere Strahlenbündel-Gruppe **37** gehört zu in der Meridionalebene gelegenen Objektfeldpunkten.

**[0071]** [Fig. 4](#) zeigt die Strahlenbündel **34** in der Nähe der Objektebene **5**, so dass die Form des bogenförmigen Objektfelds **4** erkennbar ist. Die beiden randseitigen Strahlenbündel-Gruppen **35** und **39** gehen von auf den Grenzlinien **29, 30** liegenden Objektfeldpunkten aus. Die Darstellung nach [Fig. 4](#) ist in y-Richtung gestaucht, so dass der Bogenfeldradius **R** in y-Richtung kleiner erscheint als in x-Richtung.

**[0072]** Der Feldradiusvektor **R**, der zur mittleren Strahlenbündel-Gruppe **37** gehört, zeigt in der [Fig. 4](#) nach oben. Die Strahlenbündel-Gruppen **35** bis **39** bilden in der [Fig. 4](#) einen Halbkreis um die optische Achse **18**,

der nach unten geöffnet ist.

[0073] [Fig. 5](#) zeigt die Strahlenbündel **34** in einer Schnittebene V der [Fig. 2](#), also im Bereich des Spiegels M1. Am Spiegel M1 reflektierte Strahlenbündel-Gruppen **40** bis **44** liegen auf einem Ringsegment und bilden in der [Fig. 5](#) einen äußeren Halbkreis um die optische Achse **18**, der nach unten geöffnet ist.

[0074] Weiterhin wird die Ebene V von Strahlenbündel-Gruppen **45** bis **49** durchtreten, die im Strahlengang zwischen den Spiegeln M2 und M3 verlaufen.

[0075] Auch die Strahlenbündel-Gruppen **45** bis **49** bilden einen Halbkreis um die optische Achse **18**, der in der [Fig. 5](#) nach unten geöffnet ist. Der Halbkreis der Strahlenbündel-Gruppen **45** bis **49** liegt dabei zwischen der optischen Achse **18** und dem Halbkreis, der durch die Strahlenbündel-Gruppen **40** bis **44** gebildet ist.

[0076] Aufgrund der Tatsache, dass sich die beiden Halbkreise der Strahlenbündel-Gruppen **40** bis **44** einerseits und **45** bis **49** andererseits jeweils nach unten öffnen, lässt sich bei kompakter Anordnung der Strahlenbündel-Gruppen **40** bis **49** ein ausreichend großer Minimalabstand zwischen den einzelnen Strahlenbündeln **34** der Strahlenbündel-Gruppen **40** bis **44** einerseits und **45** bis **49** andererseits realisieren. Dieser Abstand ist in der [Fig. 5](#) mit A bezeichnet. Zwischen den Strahlenbündel-Gruppen **40** bis **44** einerseits und **45** bis **49** andererseits lässt sich also ohne weiteres die Durchgangsöffnung **20** im Spiegel M4 begrenzen, wie in der [Fig. 5](#) durch eine strichpunktisierte Linie angedeutet. In der Praxis ist der Abstand A notwendig, da in der Regel die Spiegel M1 bis M6 nicht in Perfektion randscharf hergestellt werden können. Zudem dient der Abstand A als Toleranz für die Systemmontage und Justage. Üblicherweise beträgt der Abstand A einige Millimeter.

[0077] [Fig. 6](#) zeigt in einer zu [Fig. 5](#) ähnlichen Darstellung die Strahlenbündel **34** zu den fünfundzwanzig Objektfeldpunkten in einer Ebene VI, in deren Bereich der Spiegel M2 angeordnet ist. Benachbart zur optischen Achse **18** liegen Strahlenbündel-Gruppen **50**, **51**, **52**, **53**, **54** am Ort der Reflexion der Strahlenbündel **34** am Spiegel M2. Die Strahlenbündel-Gruppen **50** bis **54** sind in einem Halbkreis angeordnet, der sich in der [Fig. 6](#) nach unten hin öffnet. Dieser Halbkreis wird umgeben von einem sich ebenfalls nach unten öffnenden Halbkreis aus Strahlenbündel-Gruppen **55** bis **59**, die die Ebene VI im Abbildungsstrahlengang zwischen der Objektebene **5** und dem Spiegel M1 durchtreten. Auch in der Ebene VI sind die Halbkreis-Öffnungen der Halbkreise, die den Strahlenbündel-Gruppen **50** bis **54** einerseits und **55** bis **59** andererseits zugeordnet sind, also in der gleichen Richtung geöffnet, so dass zwischen diesen Strahlenbündel-Gruppen **50** bis **54** einerseits und **55** bis **59** andererseits ein Abstand A bei gleichzeitig kompakter Anordnung gewährleistet ist. Auch hier ist daher eine randseitige Begrenzung **60** des Spiegels M2 ohne Vignettierung der Strahlenbündel-Gruppen **50** bis **54** einerseits und **55** bis **59** andererseits möglich, wie in der [Fig. 6](#) strichpunktiert angedeutet.

[0078] Zwischen den Ebenen V und VI durchlaufen die Einzelstrahlen **15** also einen Mehrfachdurchgangsbereich **61** (vgl. [Fig. 2](#)). Dieser Mehrfachdurchgangsbereich **61** wird insgesamt dreifach durchlaufen, nämlich einerseits von Einzelstrahlen **15** zwischen der Objektebene **5** und dem Spiegel M1, andererseits von Einzelstrahlen **15** zwischen den Spiegeln M1 und M2 und zum dritten von Einzelstrahlen **15** zwischen den Spiegeln M2 und M3. Im Mehrfachdurchgangsbereich **61** liegt keine Pupillenebene der Projektionsoptik **7**. Die Pupillenebenen **17** und **23** sind außerhalb des Mehrfachdurchgangsbereichs **61** angeordnet.

[0079] [Fig. 7](#) zeigt das Ergebnis einer partiell kohärenten Luftbildberechnung des Projektionsobjektivs **7**. Dargestellt ist ein Diagramm, bei dem nach oben eine relative Intensität I in Abhängigkeit von einer nach rechts aufgetragenen Position V im Bildfeld **8** aufgetragen ist. Das Diagramm nach [Fig. 7](#) zeigt das Ergebnis einer Abbildung einer Rechteckstruktur mit insgesamt sieben Einzelstrukturen B mit einer bildseitigen Strukturbreite von 10 nm und Zwischenräumen C mit einem bildseitigen Strukturabstand ebenfalls von 10 nm. Die objektseitige Strukturbreite ergibt sich aus der bildseitigen Strukturbreite über den Abbildungsmaßstab und beträgt im vorliegenden Fall  $8 \times 10 \text{ nm} = 80 \text{ nm}$ . Diese Struktur ist im Objektfeld **4**, also auf dem Retikel **10**, angeordnet. Als in etwa sinusförmige Linien sind im Diagramm nach [Fig. 7](#) die relativen Intensitäten bei verschiedenen y-Werten während eines Scans durch das Bildfeld **8** aufgetragen. Die Wellenlänge des Abbildungslichts beträgt 6,9 nm.

[0080] Die relativen Intensitäten schwanken zwischen etwa 0,06 am Ort der 10 nm-Strukturen B und 0,62 in der Mitte der 10 nm-Zwischenräume C.

[0081] Aufgrund der deutlichen Änderung der relativen Intensität zwischen den Strukturbereichen B und den Strukturzwischenräumen C ist diese 10 nm-Struktur ohne weiteres in der Bildebene **9** auflösbar und kann zur Herstellung einer entsprechenden Struktur im Bildfeld **8** durch Belichtung eines entsprechenden Photoresists

auf dem Substrat **11** genutzt werden.

**[0082]** [Fig. 8](#) zeigt in einer zu [Fig. 7](#) ähnlichen Darstellung das Ergebnis einer partiell kohärenten Luftbildberechnung des Projektionsobjektivs **7** nach [Fig. 2](#) bei einer Strukturauflösung von Strukturen **B** mit Strukturzwischenräumen **C** mit einer Ausdehnung von bildseitig jeweils 6 nm. Auch hier wurde eine Wellenlänge von 6,9 nm eingesetzt. Die relative Intensität variiert hierbei ebenfalls in etwa sinusförmig von einem Wert von etwa 0,2 in der Mitte der Strukturen **B** bis hin zu etwa 0,37 in der Mitte des Zwischenraums **C** zwischen den Strukturen **B**. Auch die 6 nm-Strukturen lassen sich daher mit für eine Photoresist-Entwicklung ausreichender Intensitätsvariation abbilden.

**[0083]** Auch hier wurde eine Wellenlänge von 6,9 nm eingesetzt.

**[0084]** [Fig. 9](#) zeigt ein weiteres Ausführungsbeispiel einer Projektionsoptik **7**. Komponenten sowie Einzelheiten, die denjenigen entsprechen, die unter Bezugnahme auf die [Fig. 1](#) bis [Fig. 8](#) bereits erläutert wurden, tragen die gleichen Bezugsziffern und werden nicht nochmals im Einzelnen diskutiert.

**[0085]** Die optischen Daten der Projektionsoptik **7** nach [Fig. 9](#) werden nachfolgend anhand zweier Tabellen wiedergegeben, die vom Aufbau her den Tabellen der Projektionsoptik **7** nach [Fig. 2](#) entsprechen.

Oberfläche	Radius (1/c)	Dicke	Betriebsmodus
Objektebene	UNENDLICH	320,330	
M1	-393,803	-170,123	REFL
M2	-208,260	1326,985	REFL
BLENDE	UNENDLICH	0,000	
M3	3524,853	-1156,745	REFL
M4	1373,092	1633,832	REFL
M5	-2070,870	-417,088	REFL
M6	729,502	462,810	REFL
Bildebene	UNENDLICH	0,000	

Oberfläche	K	A	B
M1	0,000000E+00	-2,256168E-10	-1,464839E-15
M2	0,000000E+00	0,000000E+00	0,000000E+00
M3	0,000000E+00	1,686353E-09	1,384199E-14
M4	0,000000E+00	-1,141200E-12	-1,895182E-19
M5	0,000000E+00	3,648003E-10	9,829850E-16
M6	0,000000E+00	1,500658E-10	5,461440E-16
Oberfläche	C	D	E
M1	-9,891998E-20	4,705529E-24	-1,095685E-28
M2	0,000000E+00	0,000000E+00	0,000000E+00
M3	4,803348E-20	6,493470E-24	-2,340102E-29
M4	1,242408E-24	-7,309532E-30	1,625546E-35
M5	1,150420E-20	-2,504098E-25	2,419328E-30
M6	1,394218E-21	6,518915E-27	1,785169E-32

**[0086]** Die Ausführung nach [Fig. 9](#) hat eine numerische Apertur von 0,50. Die Zwischenbildebene **21** liegt im Strahlengang zwischen den Spiegeln **M4** und **M5** räumlich vor dem Spiegel **M3** und zu diesem benachbart. Der Spiegel **M2** ist sphärisch. Ansonsten entspricht das Design der Projektionsoptik **7** nach [Fig. 9](#) dem der Projektionsoptik **7** nach [Fig. 2](#).

**[0087]** In der nachfolgenden Tabelle sind die maximalen Einfallswinkel für die Einzelstrahlen **15** auf den Spiegeln **M1** bis **M6** zusammengestellt. Die dritte Spalte zeigt zudem die maximale Abweichung der Reflexionsflä-

chen der Spiegel M1 bis M6 von einer Kugelfläche, die der Reflexionsfläche fehlerminimiert angepasst ist (Best Fit-Sphäre). Die maximale Abweichung beträgt 180 µm. Damit sind die Asphärizitäten aller Spiegel M1 bis M6 der Projektionsoptik 7 nach [Fig. 9](#) klein und der Spiegel M2 ist sogar sphärisch, was die Herstellung von deren Reflexionsflächen vereinfacht.

Spiegel	Max. Einfallswinkel in der Meridionalebene [°]	min. Einfallswinkel (Meridionalschnitt) [°]	Max. Abweichung der Flächen von einer best-fit-Sphäre [µm]
M1	6,95	4,61	5
M2	11,96	7,45	0
M3	9,75	0,47	160
M4	3,82	0,81	6
M5	15,34	2,27	104
M6	10,41	2,20	180

**[0088]** Das Verhältnis aus dem maximalen Einfallswinkel von Abbildungsstrahlung auf den Reflexionsflächen der Spiegel M1 bis M6 der Projektionsoptik 7 nach [Fig. 9](#), nämlich dem Einfallswinkel 15,34° beim Spiegel M5, und der numerischen Apertur von 0,5 beträgt bei der Projektionsoptik 7 nach [Fig. 9](#) 30,68°.

**[0089]** Das Projektionsobjektiv 7 nach [Fig. 9](#) hat eine Gesamtlänge von 2000 mm. Die maximale zentrale Pupillenobskuration in der Fläche beträgt weniger als 7 Prozent.

**[0090]** [Fig. 10](#) bis [Fig. 12](#) zeigen in einer Darstellung, die derjenigen der [Fig. 4](#) bis [Fig. 6](#) entspricht, die Anordnung der Strahlenbündel-Gruppen 35 bis 39 im Bereich der Objektebene 5 ([Fig. 10](#)), der Strahlenbündel-Gruppen 40 bis 44 sowie 45 bis 49 in einer Ebene XI im Bereich des Spiegels M1 ([Fig. 11](#)) sowie die Strahlenbündel-Gruppen 50 bis 54 sowie 55 bis 59 in einer Ebene XII im Bereich des Spiegels M2 ([Fig. 12](#)). Die Anordnungen der Strahlenbündel-Gruppen unterscheiden sich bei den Projektionsobjektiven 7 nach [Fig. 2](#) und nach [Fig. 9](#) im Durchmesser der Strahlenbündel und im Abstand der Strahlenbündel zueinander, nicht jedoch in der halbkreisförmigen Anordnung der Strahlenbündel-Gruppen und der jeweils gleich orientierten Öffnung dieser zueinander beabstandeten Halbkreise nach unten.

**[0091]** Im Mehrfachdurchgangsbereich 61 des Projektionsobjektivs 7 nach [Fig. 9](#) zwischen den Ebenen XI und XII liegt, wie auch beim Projektionsobjektiv 7 nach [Fig. 2](#), keine Pupillenebene der Projektionsoptik 7.

**[0092]** In den nicht obskurierten Spiegelgruppen ist die numerische Apertur jeweils wesentlich geringer als in den obskurierten Spiegelgruppen.

**[0093]** [Fig. 13](#) zeigt ein weiteres Ausführungsbeispiel einer Projektionsoptik 7 zum Einsatz in der Projektionsbelichtungsanlage 1. Komponenten sowie Einzelheiten, die denjenigen entsprechen, die vorstehend unter Bezugnahme auf die [Fig. 1](#) bis [Fig. 12](#) bereits erläutert wurden, tragen die gleichen Bezugsziffern und werden nicht nochmals im Einzelnen diskutiert.

**[0094]** Die optischen Daten der Projektionsoptik 7 nach [Fig. 13](#) werden nachfolgend anhand zweier Tabellen wiedergegeben, die vom Aufbau her den Tabellen zur [Fig. 2](#) entsprechen.

Oberfläche	Radius (1/c)	Dicke	Betriebsmodus
Objektebene	UNENDLICH	182,885	
M1	312,514	-135,045	REFL
M2	461,057	514,193	REFL
M3	-989,211	-295,490	REFL
M4	-210,779	875,015	REFL
M5	760,298	-545,015	REFL
M6	698,490	798,704	REFL
M7	-576,011	-19,744	REFL
BLENDE	UNENDLICH	-173,945	
M8	347,848	224,078	REFL
Bildebene	UNENDLICH	0,000	

Oberfläche	K	A	B	C
M1	0,000000E+00	2,054833E-08	-4,009641E-13	7,171735E-17
M2	0,000000E+00	3,334553E-10	-7,634038E-15	1,024823E-19
M3	0,000000E+00	-5,191038E-10	-4,805715E-16	1,117253E-19
M4	0,000000E+00	-8,530524E-08	-7,872800E-12	-8,643400E-16
M5	0,000000E+00	-9,493122E-10	-4,519746E-14	2,842871E-19
M6	0,000000E+00	1,067524E-10	3,344389E-16	8,381905E-22
M7	0,000000E+00	3,431647E-10	-3,006760E-15	1,681919E-19
M8	0,000000E+00	-5,212207E-09	-4,936095E-14	3,981107E-19
Oberfläche	D	E	F	G
M1	-2,913353E-21	1,088107E-25	0,000000E+00	0,000000E+00
M2	-9,460244E-25	3,872599E-30	0,000000E+00	0,000000E+00
M3	-1,418804E-24	9,313360E-30	0,000000E+00	0,000000E+00
M4	-1,810090E-20	-3,582650E-23	0,000000E+00	0,000000E+00
M5	-9,298310E-24	-1,362975E-28	0,000000E+00	0,000000E+00
M6	2,378219E-27	2,644241E-33	3,062582E-38	0,000000E+00
M7	-1,186133E-24	2,512989E-29	0,000000E+00	0,000000E+00
M8	3,278180E-24	-3,575793E-29	0,000000E+00	0,000000E+00

**[0095]** Die Konstanten K sowie A bis G, die in der zweiten Tabelle angegeben sind, sind zur Beschreibung der genauen Oberflächenform der Reflexionsflächen der Spiegel M1 bis M8 in folgende Gleichung für die Pfeilhöhe einzusetzen:

$$\begin{aligned}
 z(h) = & \\
 & \frac{ch^2}{1 + \text{SQRT}\{1 - (1 + K)c^2h^2\}} + \\
 & + Ah^4 + Bh^6 + Ch^8 + Dh^{10} + Eh^{12} + Fh^{14} + Gh^{16}
 \end{aligned}$$

**[0096]** Die Projektionsoptik 7 nach [Fig. 13](#) hat insgesamt 8 Spiegel, die in der Reihenfolge des Strahlenweges, ausgehend vom Objektfeld 4, mit M1 bis M8 durchnummeriert sind. Dargestellt sind in der [Fig. 13](#) lediglich die berechneten Reflexionsflächen der Spiegel M1 bis M8.

**[0097]** Die Spiegel M1, M4 und M5 sind als Konvexspiegel ausgeführt. Die Spiegel M2, M3 sowie M6 bis M8 sind als Konkavspiegel ausgeführt. Die Reflexionsflächen der Spiegel M1 und M2 sind einander zugewandt. Die Reflexionsflächen der Spiegel M2 und M3 sind einander zugewandt. Die Reflexionsflächen der Spiegel M1 und M4 sind Rücken an Rücken angeordnet. Die Reflexionsflächen der Spiegel M4 und M5 sowie die Reflexionsflächen der Spiegel M7 und M8 sind einander zugewandt. Die Reflexionsflächen der Spiegel M5 und M8

sind Rücken an Rücken angeordnet.

**[0098]** Die Spiegel M1 bis M4 bilden die erste nicht obskurierte Spiegelgruppe **19** der Projektionsoptik **7** nach [Fig. 13](#). Die Spiegel M1 bis M4 werden ringsegmentförmig und in Bezug auf die optische Achse **18** off-axis genutzt.

**[0099]** Auch hier sind die Ringsegmente der genutzten Reflexionsflächen der Spiegel M1 bis M4 halbkreisförmig, wobei die Halbkreise, gesehen jeweils in Projektion auf die xy-Ebene nach unten, also hin zu negativen y-Werten, geöffnet sind.

**[0100]** Innerhalb der nicht obskurierten Spiegelgruppe **19** der Projektionsoptik **7** nach [Fig. 13](#) durchtreten die im Meridionalschnitt verlaufenden Abbildungsstrahlen die Haupt-Trennebene **25** nicht.

**[0101]** Zwischen den Spiegeln M1 und M2 einerseits und den Spiegeln M3 und M4 andererseits der Projektionsoptik **7** nach [Fig. 13](#) liegen Mehrfachdurchgangsbereiche **62, 63**, die von in der [Fig. 13](#) gestrichelt ange deuteten Ebenen begrenzt sind, die wie beispielsweise die Ebenen V und VI in der [Fig. 2](#) parallel zur Objekt ebene **5** und zur Bildebene **9** verlaufen. Die Mehrfachdurchgangsbereiche **62, 63** werden von den Abbildungs strahlen jeweils dreifach durchlaufen. Im Mehrfachdurchgangsbereich **62** verlaufen die Einzelstrahlen **15** ei nerseits zwischen dem Objektfeld **4** und dem Spiegel M1, andererseits zwischen dem Spiegel M1 und dem Spiegel M2 sowie zum dritten zwischen den Spiegeln M2 und M3. Im Mehrfachdurchgangsbereich **63** verlau fen die Einzelstrahlen **15** einerseits im Strahlengang zwischen den Spiegeln M2 und M3, andererseits zwi schen den Spiegeln M3 und M4 sowie zum dritten zwischen den Spiegeln M4 und M5.

**[0102]** In den Mehrfachdurchgangsbereichen **62, 63** liegt keine Pupillenebene der Projektionsoptik **7** nach [Fig. 13](#).

**[0103]** Das Objektfeld **4** und das Bildfeld **8** haben auch bei der Projektionsoptik **7** nach [Fig. 13](#) die im Zusam menhang mit der Beschreibung der [Fig. 3](#) erläuterte Form und die gleichen Dimensionen XS und YS. Die Fel der **4, 8** haben entsprechend ebenfalls einen Azimutwinkel  $\alpha$  von  $171,2^\circ$ .

**[0104]** Eine erste Pupillenebene **17** liegt bei der Projektionsoptik **7** nach [Fig. 13](#) im Bereich der Reflexion der Einzelstrahlen **15** am Spiegel M5.

**[0105]** Die Spiegel M5 bis M8 sind obskuriert und haben jeweils eine im Wesentlichen zentrale Durchgangs öffnung **20**.

**[0106]** Die Spiegel M5 bis M8 bilden zwei obskurierte Spiegelgruppen **22, 24** entsprechend der Anordnung der obskurierten Spiegel M3 bis M6 bei der Projektionsoptik **7** nach [Fig. 2](#).

**[0107]** Wie bei der Projektionsoptik **7** nach [Fig. 2](#) liegt bei der Projektionsoptik **7** nach [Fig. 13](#) die Zwischen bildebene **21** zwischen den nicht obskurierten Spiegelgruppen **22** und **24**.

**[0108]** Die zweite Pupillenebene **23** und auch die Aperturblende liegen in der Nähe der Reflexion der Einzel strahlen **15** am Spiegel M7.

**[0109]** Die Projektionsoptik **7** nach [Fig. 13](#) hat eine numerische Apertur von 0,60.

**[0110]** [Fig. 14](#) zeigt ein weiteres Ausführungsbeispiel einer Projektionsoptik **7** zum Einsatz in der Projektions anlage **1**. Komponenten sowie Einzelheiten, die denjenigen entsprechen, die vorstehend unter Bezugnahme auf die [Fig. 1](#) bis [Fig. 13](#) bereits erläutert wurden, tragen die gleichen Bezugsziffern und werden nicht noch mals im Einzelnen diskutiert.

**[0111]** Die optischen Daten der Projektionsoptik **7** nach [Fig. 13](#) werden nachfolgend anhand zweier Tabellen wiedergegeben, die vom Aufbau her den Tabellen zur [Fig. 2](#) entsprechen.

Oberfläche	Radius (1/c)	Dicke	Betriebsmodus
Objektebene	UNENDLICH	234,636	
M1	-287,951	-113,003	REFL
M2	-377,077	307,165	REFL
M3	448,125	-138,650	REFL
M4	454,548	458,111	REFL
M5	-589,208	-216,430	REFL
M6	-137,413	922,448	REFL
M7	3248,369	-656,018	REFL
M8	905,405	930,393	REFL
M9	-786,842	-34,144	REFL
BLENDE	UNENDLICH	-180,231	
M10	360,479	239,376	REFL
Bildebene	UNENDLICH	0,000	

Oberfläche	K	A	B
M1	0,000000E+00	-3,635133E-10	-1,272934E-13
M2	0,000000E+00	8,009620E-09	8,547440E-13
M3	0,000000E+00	-3,301069E-08	-3,864784E-13
M4	0,000000E+00	-2,379284E-09	-3,474204E-14
M5	0,000000E+00	-5,239687E-10	-3,534045E-14
M6	0,000000E+00	-1,393622E-07	-2,668110E-10
M7	0,000000E+00	3,133269E-10	-3,363547E-15
M8	0,000000E+00	5,440423E-11	6,900621E-17
M9	0,000000E+00	1,926841E-09	2,339942E-15
M10	0,000000E+00	-1,807405E-09	-9,306119E-15
Oberfläche	C	D	E
M1	1,155813E-17	-4,826930E-22	7,023739E-27
M2	4,549328E-17	4,305677E-21	4,669221E-25
M3	8,526965E-17	-7,012381E-21	2,933090E-25
M4	-1,300936E-19	-5,982917E-24	-5,370645E-29
M5	9,162259E-19	-1,999188E-23	2,164273E-28
M6	2,736516E-13	-1,401026E-16	1,113816E-20
M7	-1,123687E-20	-5,146768E-25	1,194508E-30
M8	9,097747E-23	6,493834E-29	4,098093E-34
M9	2,254061E-19	-2,921628E-24	4,530106E-29
M10	5,958825E-20	-3,478398E-25	7,219935E-30

[0112] Die Pfeilhöhengleichung zur Beschreibung der genauen Oberflächenform der Reflexionsflächen der Spiegel M1 bis M10 entspricht derjenigen, die vorstehend im Zusammenhang mit der Projektionsoptik 7 nach Fig. 2 schon angegeben wurde.

[0113] Die Projektionsoptik 7 nach Fig. 14 hat insgesamt 10 Spiegel, die in der Reihenfolge des Strahlengangs, ausgehend vom Objektfeld 4, mit M1 bis M10 durchnummieriert sind. Dargestellt sind in der Fig. 14 die berechneten Reflexionsflächen der Spiegel M1 bis M10.

[0114] Die Spiegel M1, M4, M5 sowie M8 bis M10 sind als Konkavspiegel ausgeführt. Die Spiegel M2, M3, M6 und M7 sind als Konvexspiegel ausgeführt.

[0115] Die Reflexionsflächen der Spiegel M1 und M2 sind einander zugewandt. Die Reflexionsflächen der Spiegel M2 und M3 sind einander zugewandt. Die Reflexionsflächen der Spiegel M1 und M4 sind Rücken an Rücken angeordnet. Die Reflexionsflächen der Spiegel M3 und M4 sowie die Reflexionsflächen der Spiegel M5 und M6 sind einander zugewandt. Die Reflexionsflächen der Spiegel M3 und M6 sind Rücken an Rücken angeordnet. Die Reflexionsflächen der Spiegel M7 und M8 sowie die Reflexionsflächen der Spiegel M9 und M10 sind einander zugewandt. Die Reflexionsflächen der Spiegel M5 und M8 sowie die Reflexionsflächen der Spiegel M7 und M10 sind Rücken an Rücken angeordnet.

[0116] Die Spiegel M1 bis M6 werden ringsegmentförmig in Bezug auf die optische Achse 18 off-axis genutzt. Diese ringsegmentförmigen Reflexionsbereiche sind bei den Spiegeln M1 und M2 analog zu dem, was vorstehend in Bezug auf die Projektionsoptik 7 nach [Fig. 2](#) erläutert wurde, halbkreisförmig, wobei sich die Halbkreise in [Fig. 14](#) nach unten, also hin zu negativen y-Werten, öffnen.

[0117] Auch auf den Spiegeln M3 bis M6 liegen halbkreisförmige Reflexionsflächen vor, die sich allerdings in der Gegenrichtung, also hin zu positiven y-Werten öffnen.

[0118] Die Spiegel M1 und M2 bilden eine erste nicht obskurierte Spiegelgruppe 64 der Projektionsoptik 7 nach [Fig. 14](#). Die Spiegel M3 bis M6 bilden eine zweite nicht obskurierte Spiegelgruppe 65 der Projektionsoptik 7 nach [Fig. 14](#). Zwischen den beiden Spiegelgruppen 64 und 65, nämlich zwischen den beiden hinsichtlich ihrer Reflexionsflächen Rücken an Rücken angeordneten Spiegeln M1 und M4, ist eine erste Pupillenebene 66 der Projektionsoptik 7 nach [Fig. 14](#) räumlich angeordnet.

[0119] Aufgrund der Anordnung der Pupillenebene 66 zwischen den Spiegelgruppen 64 und 65 durchtreten die Einzelstrahlen 15 beim Durchgang durch die einzelnen Spiegelgruppen 64, 65 die Haupt-Trennebene 25 in der Meridionalebene jeweils nicht. Diese Haupt-Trennebene 25 wird von den Hauptstrahlen 16 lediglich zwischen den nicht obskurierten Spiegelgruppen 64, 65, jedoch nicht innerhalb der nicht obskurierten Spiegelgruppen 64, 65, durchtreten. Außerhalb von Pupillenebenen durchtreten die Hauptstrahlen 16 die Haupt-Trennebene 25 in den nicht obskurierten Spiegelgruppen 64, 65 nicht.

[0120] Zwischen den Spiegeln M1 und M2, zwischen den Spiegeln M3, und M4 sowie zwischen den Spiegeln M5 und M6 liegen bei der Projektionsoptik 7 nach [Fig. 14](#) insgesamt drei Mehrfachdurchgangsbereiche 67, 68 und 69 vor. Diese Mehrfachdurchgangsbereiche 67 bis 69 sind jeweils durch Ebenen begrenzt, die parallel zur Objektebene 4 und zur Bildebene 9 angeordnet und in der [Fig. 14](#) durch gestrichelte Linien angedeutet sind. In den Mehrfachdurchgangsbereichen 67 bis 69 findet jeweils ein Dreifachdurchlauf der Einzelstrahlen 15 entsprechend dem, was im Zusammenhang mit den Mehrfachdurchgangsbereichen 61 bis 63 der Ausführungen nach den [Fig. 2](#) und [Fig. 13](#) bereits erläutert wurde, statt.

[0121] In den Mehrfachdurchgangsbereichen 67 bis 69 ist keine Pupillenebene der Projektionsoptik 7 angeordnet.

[0122] In den beiden Begrenzungsebenen der Mehrfachdurchgangsbereiche 67 bis 69 findet ein Mehrfachdurchtritt von Strahlenbündel-Gruppen in Form von jeweils zwei Halbkreisen mit Öffnung in der gleichen Richtung statt, wie vorstehend im Zusammenhang mit der Projektionsoptik 7 nach [Fig. 2](#) erläutert. Entsprechend sind die Anforderungen an eine vignettierungsfreie Gestaltung der randseitigen Begrenzungen der Spiegel M1, M2, M3, M4, M5 und M6 relaxiert.

[0123] Die Form und Größe des Objektfelds 4 und des Bildfelds 8 ist bei der Ausführung der Projektionsoptik 7 nach [Fig. 14](#) genauso wie bei den vorstehend beschriebenen Ausführungen. Auch die Felder 4, 8 der Projektionsoptik 7 nach [Fig. 14](#) haben daher einen Azimutwinkel  $\alpha$  von 171,2°.

[0124] Eine erste Zwischenbildebene 70 ist bei der Projektionsoptik 7 nach [Fig. 14](#) im Strahlengang zwischen den Spiegeln M5 und M6 angeordnet.

[0125] Die Anordnung der Spiegel M7 bis M10 der Projektionsoptik 7 nach [Fig. 14](#) entspricht derjenigen der Spiegel M5 bis M8 der Projektionsoptik 7 nach [Fig. 13](#). Die Spiegel M7 bis M10 sind obskuriert und haben jeweils eine im Wesentlichen zentrale Durchgangsöffnung 20.

[0126] Die Projektionsoptik 7 nach [Fig. 14](#) hat eine numerische Apertur von 0,60.

[0127] [Fig. 15](#) und [Fig. 16](#) zeigen schematisch den Verlauf der Hauptstrahlen 16 durch Projektionsoptiken 7,

die eine Erweiterung der Projektionsoptiken 7 nach den vorstehend beschriebenen Ausführungen der [Fig. 2](#), [Fig. 13](#) und [Fig. 14](#) darstellen. Komponenten sowie Einzelheiten, die denjenigen entsprechen, die vorstehend unter Bezugnahme auf die [Fig. 1](#) bis [Fig. 14](#) bereits erläutert wurden, tragen die gleichen Bezugsziffern und werden nicht nochmals im Einzelnen diskutiert.

**[0128]** Im Unterschied zur Projektionsoptik 7 nach [Fig. 14](#) hat die Projektionsoptik 7 nach den [Fig. 15](#) und [Fig. 16](#) nicht zwei nicht obskurierte Spiegelgruppen, sondern insgesamt vier nicht obskurierte Spiegelgruppen 72, 73, 74, 75. Die Darstellungen nach den [Fig. 15](#) und [Fig. 16](#) unterscheiden sich dadurch, dass die Darstellung nach [Fig. 16](#) zusätzlich noch gefaltete Strahlengänge innerhalb der nicht obskurierten Spiegelgruppen 72 bis 75 sowie zwischen der letzten Pupillenebene 17 und der Bildebene 9 andeutet.

**[0129]** Die erste nicht obskurierte Spiegelgruppe 72 liegt zwischen der Objektebene 5 und einer ersten Pupillenebene 76. Die zweite nicht obskurierte Spiegelgruppe 73 liegt zwischen der ersten Pupillenebene 76 und einer zweiten Pupillenebene 77. Die dritte nicht obskurierte Spiegelgruppe 74 liegt zwischen der zweiten Pupillenebene 77 und einer dritten Pupillenebene 78. Die vierte nicht obskurierte Spiegelgruppe 75 liegt zwischen der dritten Pupillenebene 78 und der Pupillenebene 17 am Übergang zu den obskurierten Spiegelgruppen 22, 24, die in der schematischen Darstellung der [Fig. 15](#) und [Fig. 16](#) als eine einzige obskurierte Spiegelgruppe angedeutet sind. Die nicht obskurierten Spiegelgruppen 72 und 75 der schematischen Darstellungen nach den [Fig. 15](#) und [Fig. 16](#) entsprechen den nicht obskurierten Spiegelgruppen 64 und 65 der Ausführung nach [Fig. 14](#). Die schematischen Darstellungen nach den [Fig. 15](#) und [Fig. 16](#) können daher als Erweiterung der Ausführung nach [Fig. 14](#) um zwei weitere nicht obskurierte Spiegelgruppen, nämlich die Spiegelgruppen 73 und 74, verstanden werden.

**[0130]** Die [Fig. 15](#) und [Fig. 16](#) verdeutlichen, dass die Haupt-Trennebene 25 nur jeweils zwischen den nicht obskurierten Spiegelgruppen 72 bis 75 sowie im Strahlengang nach der Pupillenebene 17 im hochaperturigen Bereich der Projektionsoptik 7, also im Bereich der obskurierten Spiegelgruppen 22, 24 durchtreten wird. Innerhalb der nicht obskurierten Spiegelgruppen 72 bis 75 bleiben die Hauptstrahlen 16 jeweils auf einer Seite der Haupt-Trennebene 25. Dies führt zu dem vorstehend schon beschriebenen Effekt, dass in Mehrfachdurchgangsbereichen innerhalb der nicht obskurierten Spiegelgruppen 72 bis 75 Strahlenbündel-Gruppen 35 mit jeweils nur einer Orientierung der Öffnung des senkrecht zur optischen Achse bogenförmigen Bündelverlaufs vorliegen.

**[0131]** Zur Herstellung eines mikro- oder nanostrukturierten Bauteils wird die Projektionsbelichtungsanlage 1 folgendermaßen eingesetzt: Zunächst werden die Reflexionsmaske 10 bzw. das Retikel und das Substrat bzw. der Wafer 11 bereitgestellt. Anschließend wird eine Struktur, zum Beispiel die Struktur B, C, auf dem Retikel 10 auf eine lichtempfindliche Schicht des Wafers 11 mithilfe der Projektionsbelichtungsanlage projiziert. Durch Entwicklung der lichtempfindlichen Schicht wird dann eine Mikro- oder Nanostruktur auf dem Wafer 11 und somit das mikrostrukturierte Bauteil erzeugt.

**ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG**

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

**Zitierte Patentliteratur**

- US 6750948 B2 [[0002](#)]
- US 2006/0232867 A1 [[0002](#)]
- EP 0267766 A2 [[0002](#)]
- US 7209286 B2 [[0002](#)]
- WO 2006/069725 A1 [[0002](#)]
- WO 2005/098506 A1 [[0002](#), [0007](#)]

**Zitierte Nicht-Patentliteratur**

- „EUV Engineering Test Stand“ von D. A. Tichenor et al., Lawrence Livermore National Laboratory, 14. 02. 2000 [[0005](#)]
- „EUV Engineering Test Stand“ von D. A. Tichenor et al., Lawrence Livermore National Laboratory, 14. 02. 2000 [[0069](#)]

## Patentansprüche

1. Abbildende Optik (7) mit einer Mehrzahl von Spiegeln (M1 bis M6; M1 bis M8; M1 bis M10), die ein Objektfeld (4) in einer Objektebene (5) in ein Bildfeld (8) in einer Bildebene (9) abbilden,

- wobei Abbildungsstrahlen (15) im Strahlengang zwischen nicht obskurierten Spiegeln (M1, M2; M1 bis M4; M1 bis M6) der abbildenden Optik (7) mindestens einen Mehrfachdurchgangsbereich (61; 62, 63; 67, 68, 69) zwischen voneinander beabstandeten Ebenen, die parallel zur Objektebene (5) und/oder zur Bildebene (9) angeordnet sind, mehrfach durchlaufen,

- wobei die abbildende Optik (7) mindestens eine Pupillenebene (17, 23; 66, 17, 23; 76, 77, 78, 17) aufweist, dadurch gekennzeichnet, dass alle Pupillenebenen (17, 23; 66, 17, 23; 76, 77, 78, 17) außerhalb der Mehrfachdurchgangsbereiche (61; 62, 63; 67, 68, 69) angeordnet sind.

2. Abbildende Optik nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Objektfeld (4) die Form eines Bogenfeldes hat, welches begrenzt ist durch

- zwei Teilkreise (27, 28) mit gleichem Radius (R), die zueinander um einen Abstand (YS) parallel verschoben sind,

- zwei die beiden Enden beider Teilkreise jeweils verbindende Grenzlinien (29, 30), wobei das Bogenfeld (4) einen Azimutwinkel ( $\alpha$ ) hat, der größer ist als 75°.

3. Katoptrische abbildende Optik (7) mit einer Mehrzahl von Spiegeln (M1 bis M6; M1 bis M8; M1 bis M10), die ein Objektfeld (4) in einer Objektebene (5) in ein Bildfeld (8) in einer Bildebene (9) abbilden,

- wobei das Objektfeld (4) die Form eines Bogenfeldes hat, welches begrenzt ist durch

- zwei Teilkreise (27, 28) mit gleichem Radius (R), die zueinander um einen Abstand (YS) parallel verschoben sind,

- zwei die beiden Enden beider Teilkreise jeweils verbindende Grenzlinien (29, 30), gekennzeichnet durch einen Azimutwinkel ( $\alpha$ ) des Bogenfeldes (4), der größer ist als 75°.

4. Abbildende Optik (7) mit einer Mehrzahl von Spiegeln (M1 bis M6; M1 bis M8; M1 bis M10), die ein Objektfeld (4) in einer Objektebene (5) in ein Bildfeld (8) in einer Bildebene (9) abbilden,

- wobei die abbildende Optik (7) eine optische Achse (18) aufweist,

- wobei die abbildende Optik (7) mindestens eine nicht obskurierte Spiegelgruppe (19; 64, 65; 72 bis 75) aufweist, die zwischen einer der nachfolgenden Varianten von Begrenzungsebenen der abbildenden Optik angeordnet ist:

- zwischen einer Feldebene (5) und einer direkt nachgeordneten Pupillenebene (17; 66);

- zwischen einer ersten Pupillenebene (66) und einer direkt nachgeordneten zweiten Pupillenebene (17).

5. Abbildende Optik nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass ein Hauptstrahl (16), der von einem zentralen Objektfeldpunkt ausgeht und durch das Zentrum von Pupillen in den Pupillenebenen (17; 66) der abbildenden Optik (7) verläuft, im Meridionalschnitt zwischen Spiegeln (M1, M2; M1 bis M4; M1, M2, M3 bis M6) der mindestens einen nicht obskurierten Spiegelgruppe (19; 64, 65; 72 bis 75) der abbildenden Optik (7) derart verläuft, dass er eine Haupt-Trennebene (25) nicht durchtritt,

- in der die optische Achse (18) liegt und

- auf der eine Normale (26) von einem zentralen Objektfeldpunkt auf die optische Achse (18) senkrecht steht.

6. Abbildende Optik nach Anspruch 5, gekennzeichnet durch eine zentrale Pupillenobskuration, also durch eine Anordnung, bei der in einer Pupillenebene (17) innerhalb eines Bereichs, in dem ein Durchgang von Abbildungsstrahlen (15) möglich ist, kein Durchgang von Abbildungsstrahlen (15) möglich ist.

7. Abbildende Optik nach Anspruch 5 oder 6, dadurch gekennzeichnet, dass das Objektfeld (4) und das Bildfeld (8) beabstandet zur optischen Achse (18) angeordnet sind.

8. Abbildende Optik nach einem der Ansprüche 5 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass

- Abbildungsstrahlen (15) im Strahlengang zwischen nicht obskurierten Spiegeln (M1, M2) mindestens einen Mehrfachdurchgangsbereich (61) zwischen voneinander beabstandeten Ebenen, die parallel zur Objektebene (5) und/oder zur Bildebene (9) angeordnet sind, mehrfach durchlaufen,

- im Meridionalschnitt die Abbildungsstrahlen zwischen diesen, den Mehrfachdurchgangsbereich (61) begrenzenden Ebenen die Haupt-Trennebene (25) nicht durchtreten.

9. Abbildende Optik nach einem der Ansprüche 5 bis 8, gekennzeichnet durch einen Azimutwinkel ( $\alpha$ ) des Bogenfeldes (4), der größer ist als 75°.

10. Abbildende Optik mit einer Mehrzahl von Spiegeln (M1 bis M6), die ein Objektfeld (**4**) in einer Objektebene (**5**) in ein Bildfeld (**8**) in einer Bildebene (**9**) abbilden, umfassend mindestens vier Spiegel (M1 bis M6), von denen mindestens zwei (M1, M2) nicht obskuriert sind, dadurch gekennzeichnet, dass einer der nicht obskurierten Spiegel (M2) als sphärischer Spiegel ausgebildet ist.

11. Abbildende Optik nach Anspruch 10, gekennzeichnet durch einen Azimutwinkel ( $\alpha$ ) des Bogenfeldes (**4**), der größer ist als  $75^\circ$ .

12. Abbildende Optik nach einem der Ansprüche 1 bis 11, gekennzeichnet durch mehrere nicht obskurierte Spiegelgruppen (**64, 65; 72 bis 75**), zwischen denen im Abbildungsstrahlengang jeweils eine Pupillenebene (**66; 76 bis 78**) angeordnet ist.

13. Abbildende Optik nach einem der Ansprüche 1 bis 12, gekennzeichnet durch mindestens einen obskurierten Spiegel (M3 bis M6; M5 bis M8; M7 bis M10) mit einer Durchgangsöffnung (**20**) zum Durchtritt von Abbildungslicht (**3**).

14. Abbildende Optik nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass die abbildende Optik (**7**) genau sechs Spiegel (M1 bis M6) aufweist, von denen mindestens drei Spiegel, bevorzugt genau vier Spiegel (M3 bis M6), obskuriert sind.

15. Abbildende Optik nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass die abbildende Optik (**7**) genau acht Spiegel (M1 bis M8) aufweist, von denen mindestens drei Spiegel, bevorzugt genau vier Spiegel (M5 bis M8), obskuriert sind.

16. Abbildende Optik nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass die abbildende Optik (**7**) genau zehn Spiegel (M1 bis M10) aufweist, von denen mindestens drei Spiegel, bevorzugt genau vier Spiegel (M7 bis M10), obskuriert sind.

17. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie  
– mit einer abbildenden Optik (**7**) nach einem der Ansprüche 1 bis 16,  
– mit einer Lichtquelle (**2**) für das Beleuchtungs- und Abbildungslicht (**3**),  
– mit einer Beleuchtungsoptik (**6**) zur Führung des Beleuchtungslichts (**3**) hin zum Objektfeld (**4**) der abbildenden Optik (**7**).

18. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, dass die Lichtquelle (**2**) zur Erzeugung von Beleuchtungslicht (**3**) mit einer Wellenlänge zwischen 5 und 30 nm ausgebildet ist.

19. Verfahren zur Herstellung eines mikrostrukturierten Bauteils mit folgenden Verfahrensschritten:  
– Bereitstellen eines Retikels (**10**) und eines Wafers (**11**),  
– Projizieren einer Struktur auf dem Retikel (**10**) auf eine lichtempfindliche Schicht des Wafers (**11**) mithilfe der Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 17 oder 18,  
– Erzeugen einer Mikrostruktur auf dem Wafer (**11**).

20. Mikrostrukturiertes Bauteil, hergestellt nach einem Verfahren nach Anspruch 19.

Es folgen 15 Blatt Zeichnungen

## Anhängende Zeichnungen

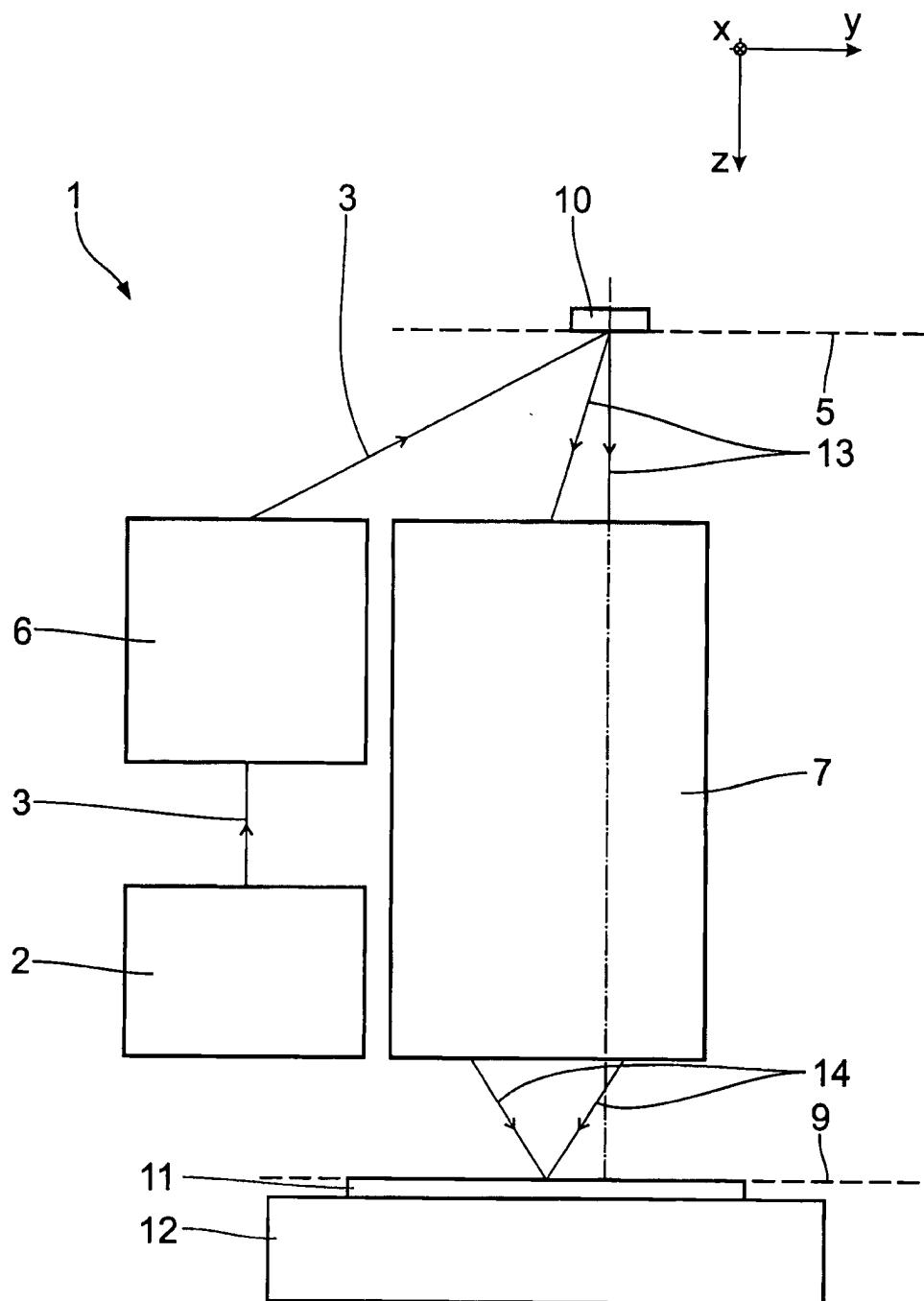


Fig. 1

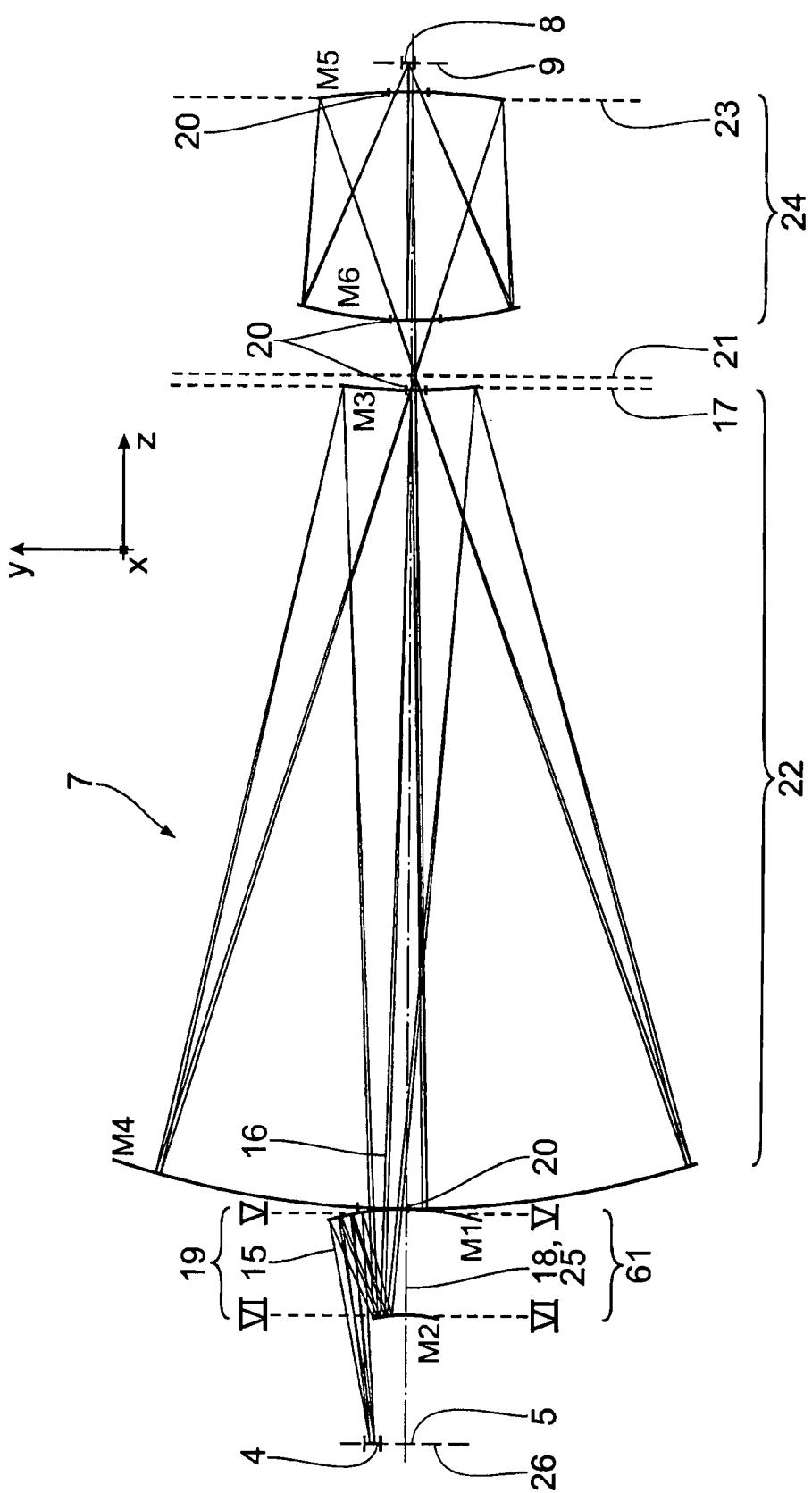


Fig. 2

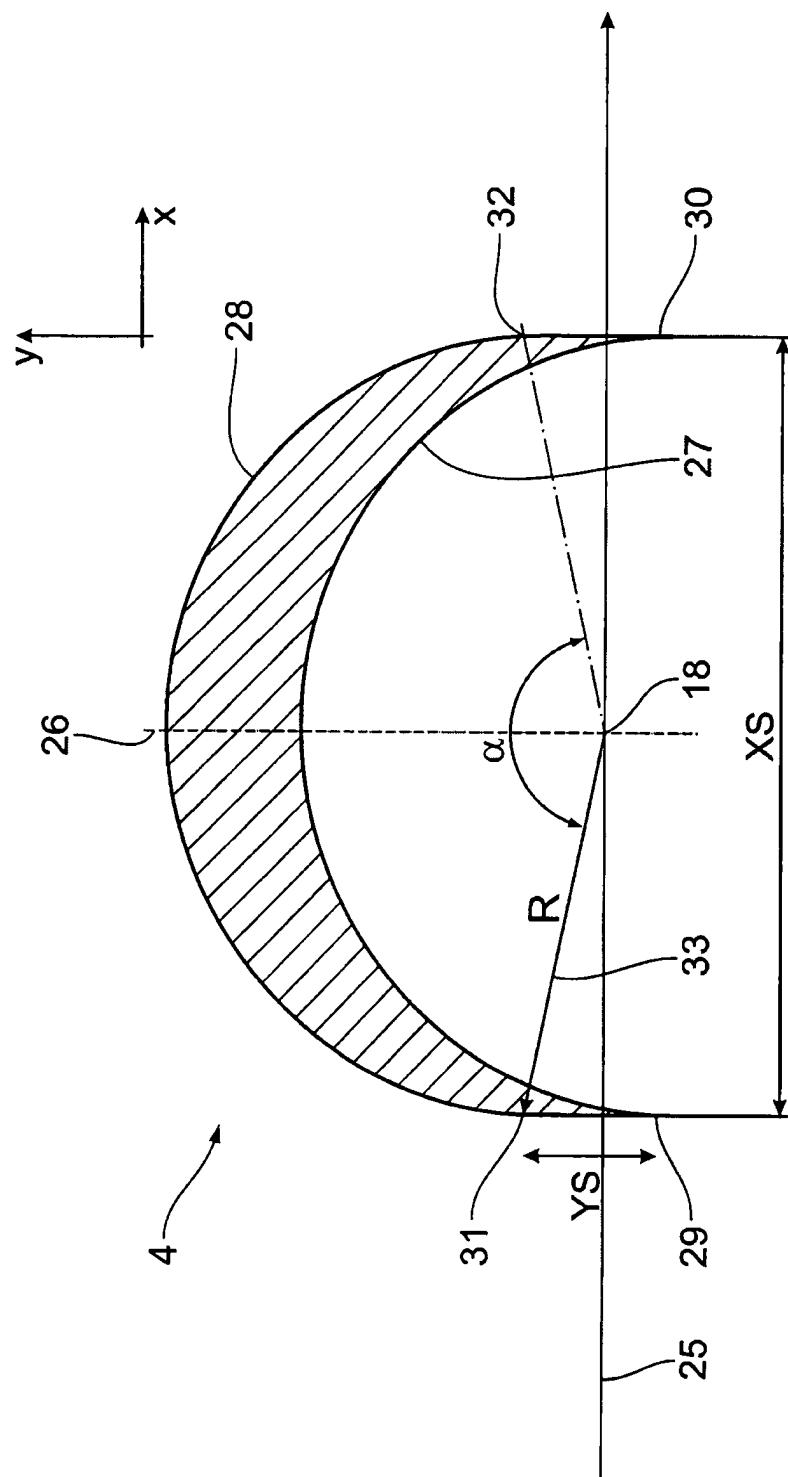


Fig. 3

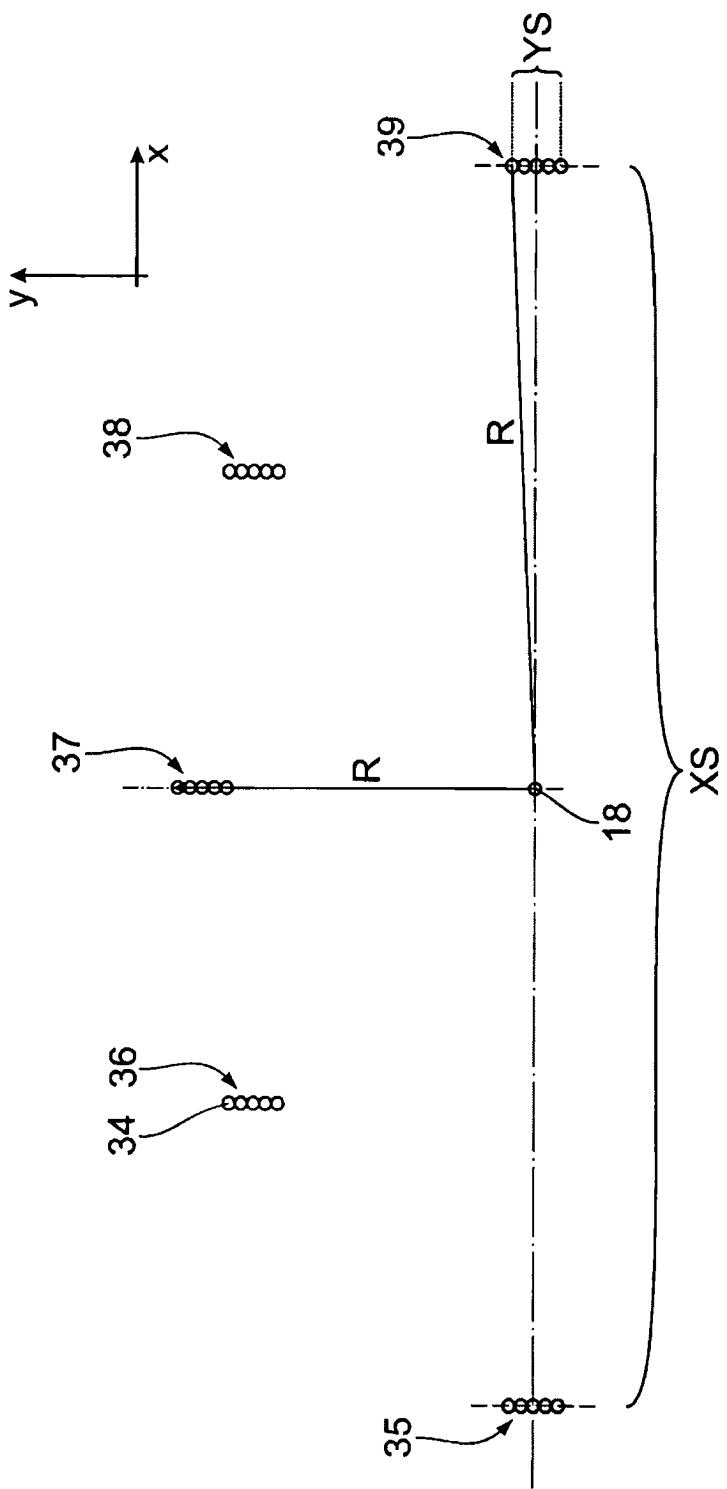


Fig. 4

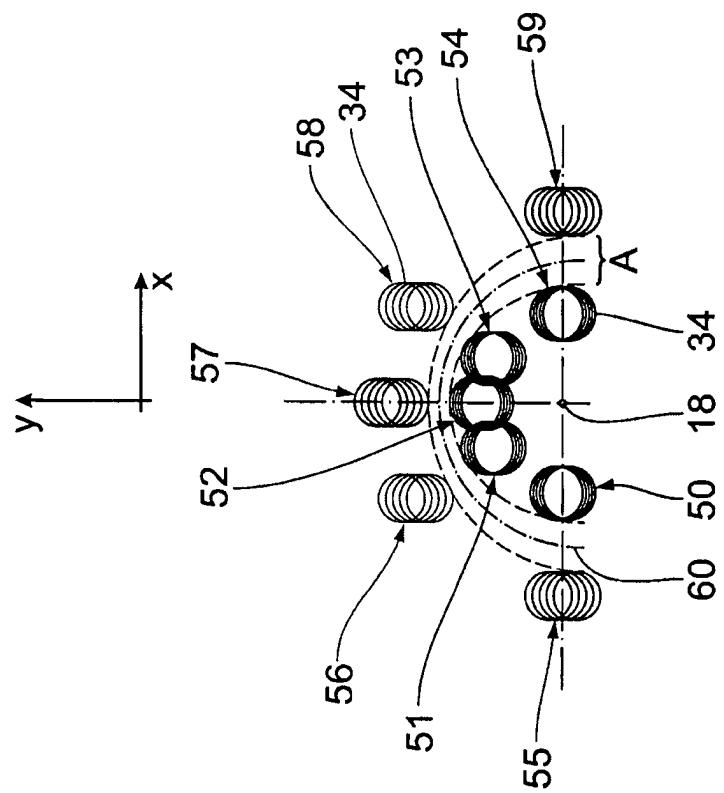


Fig. 6

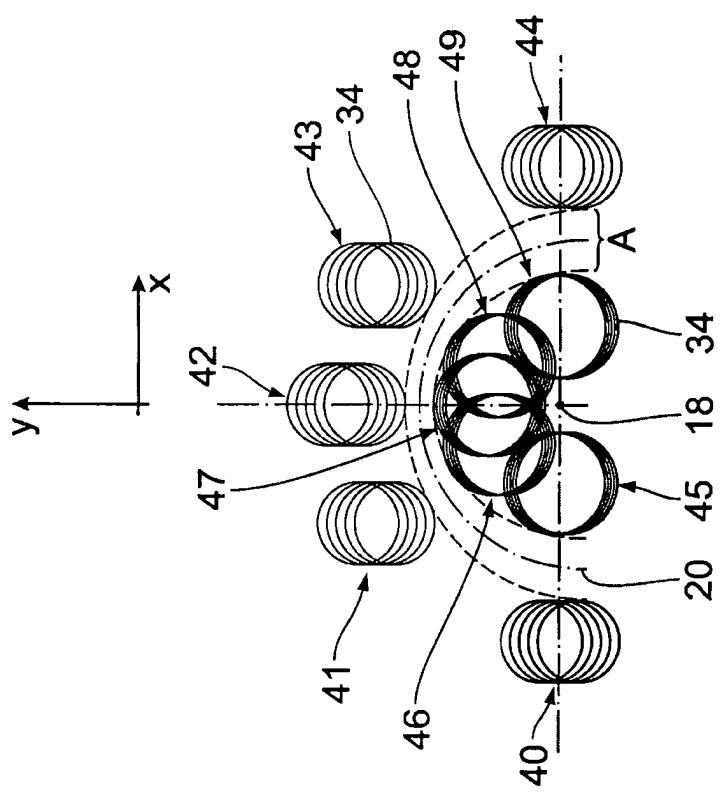


Fig. 5

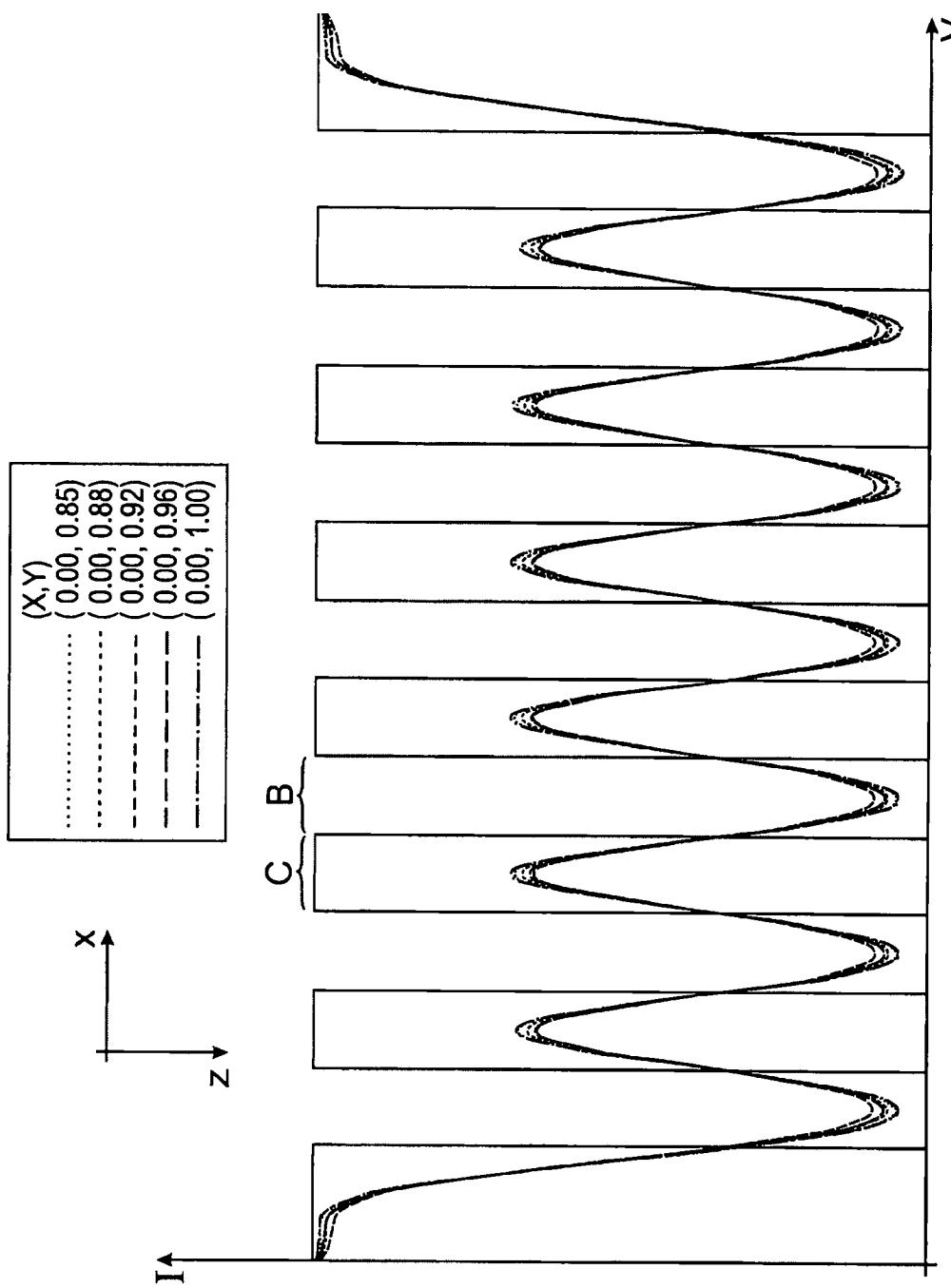


Fig. 7

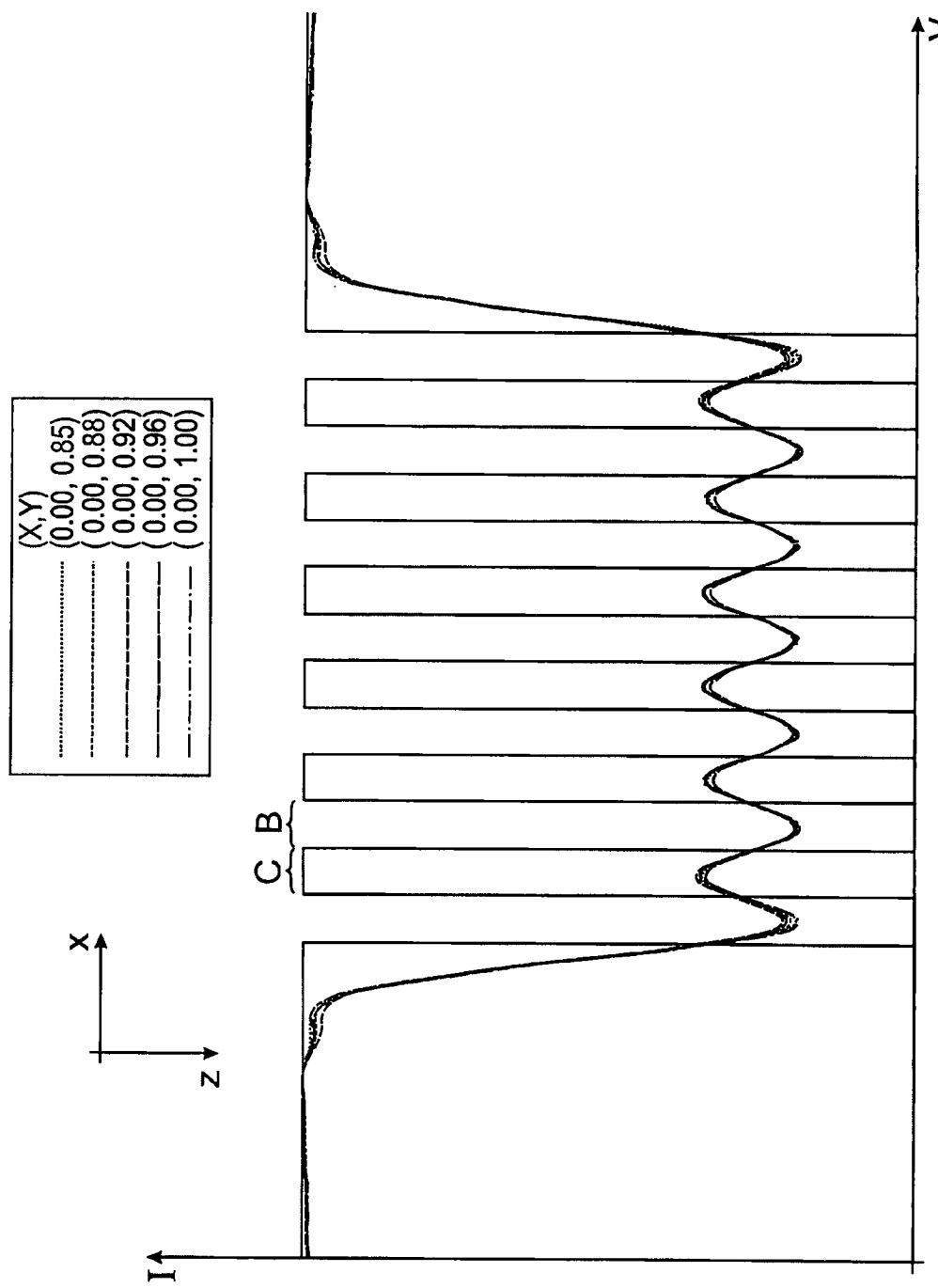


Fig. 8

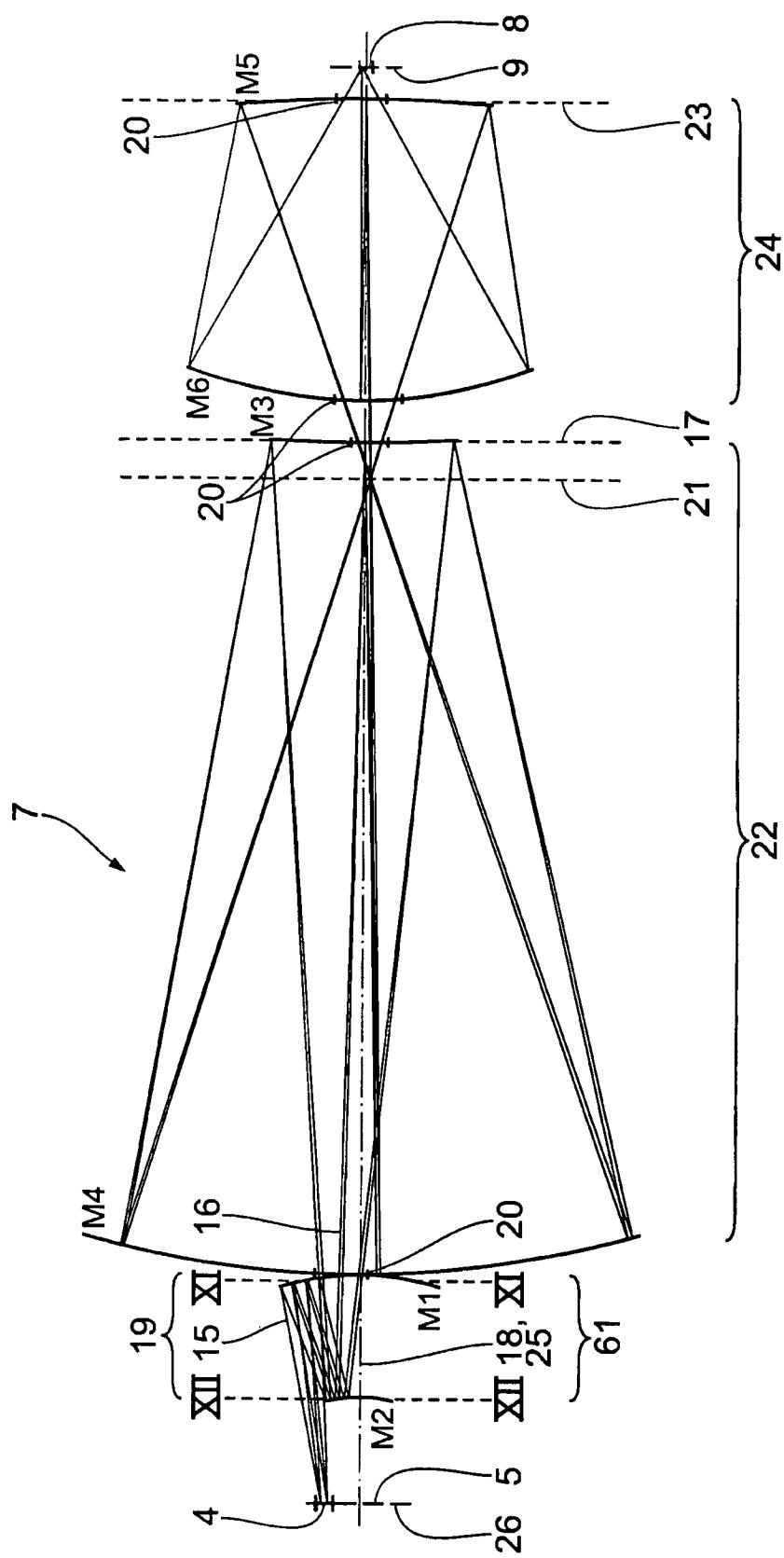


Fig. 9

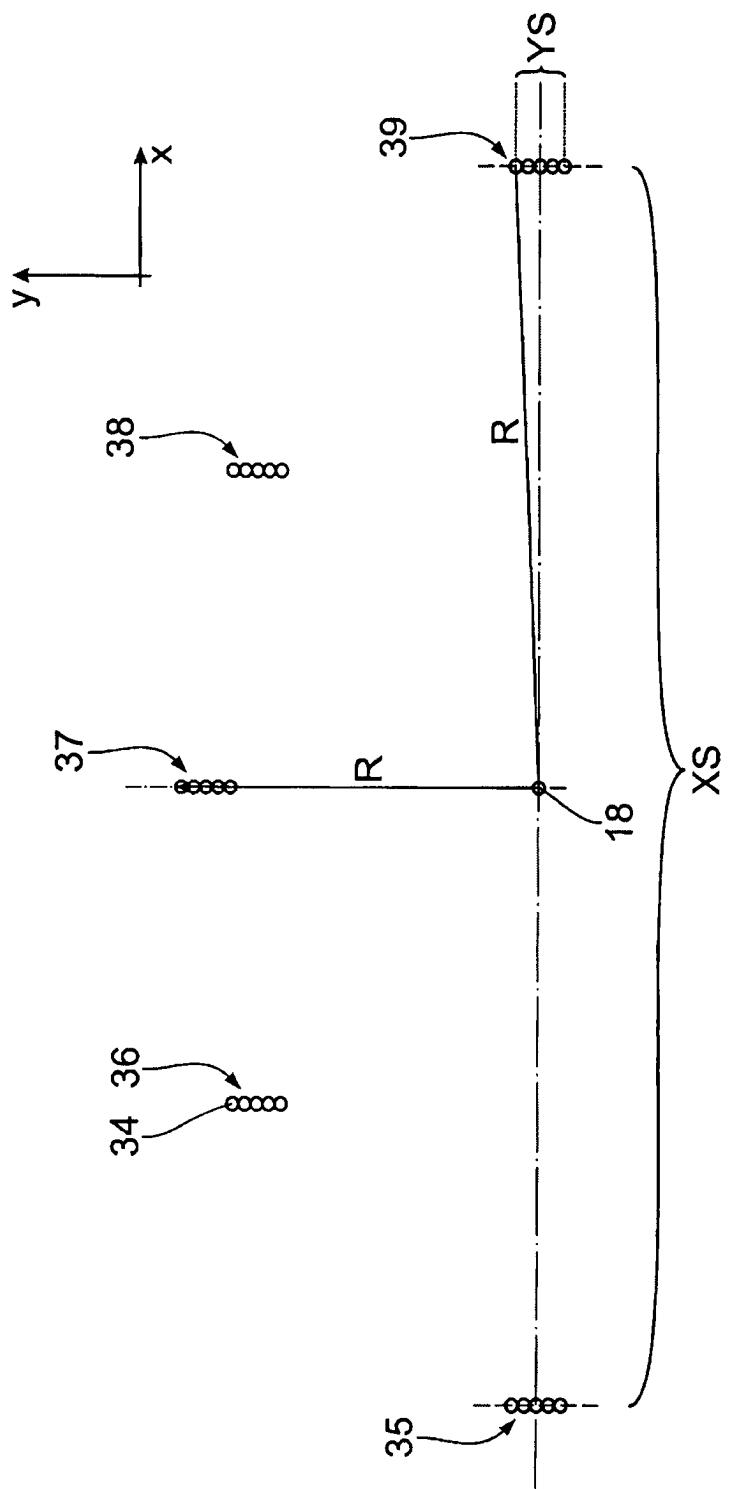


Fig. 10

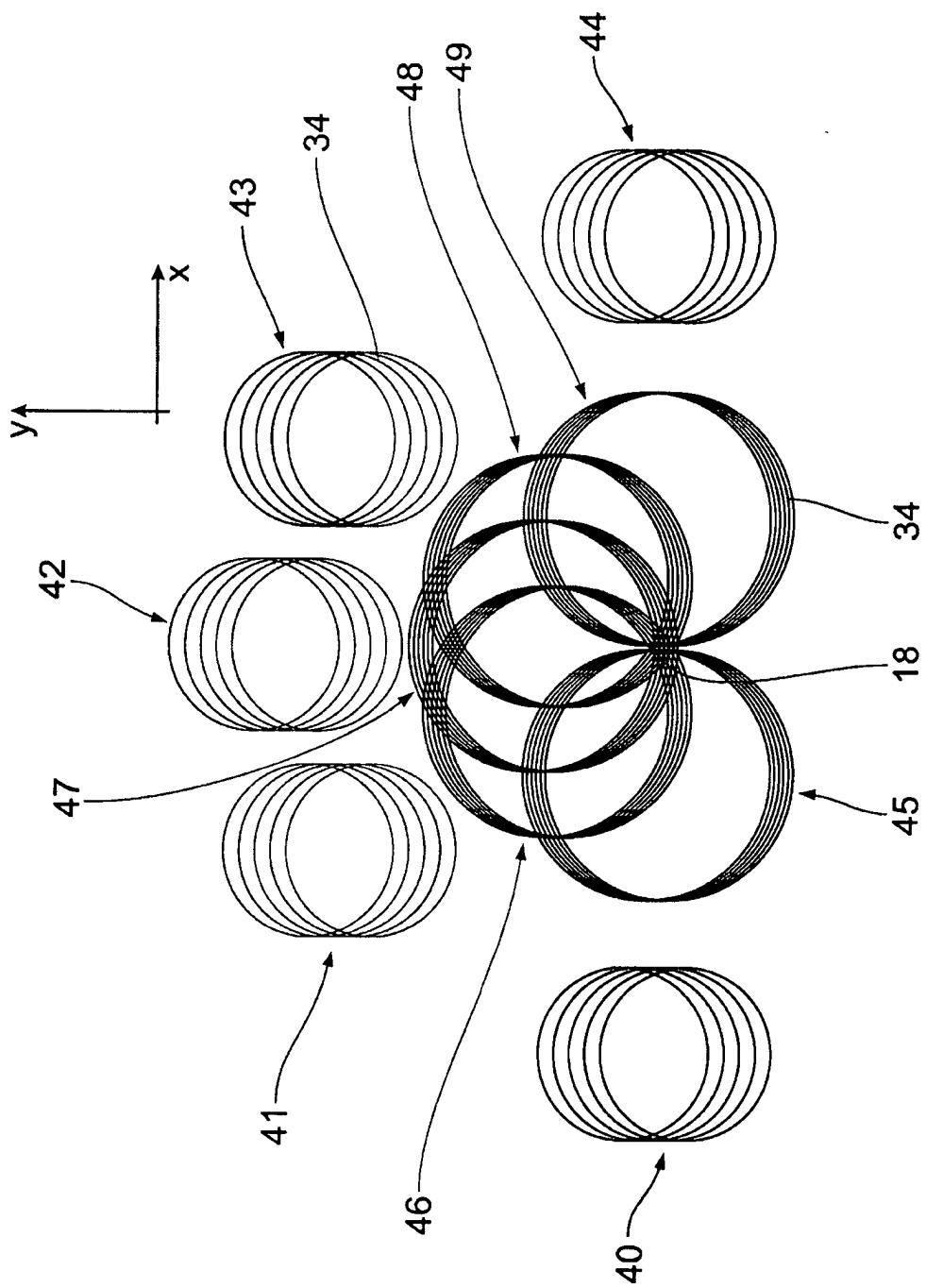


Fig. 11

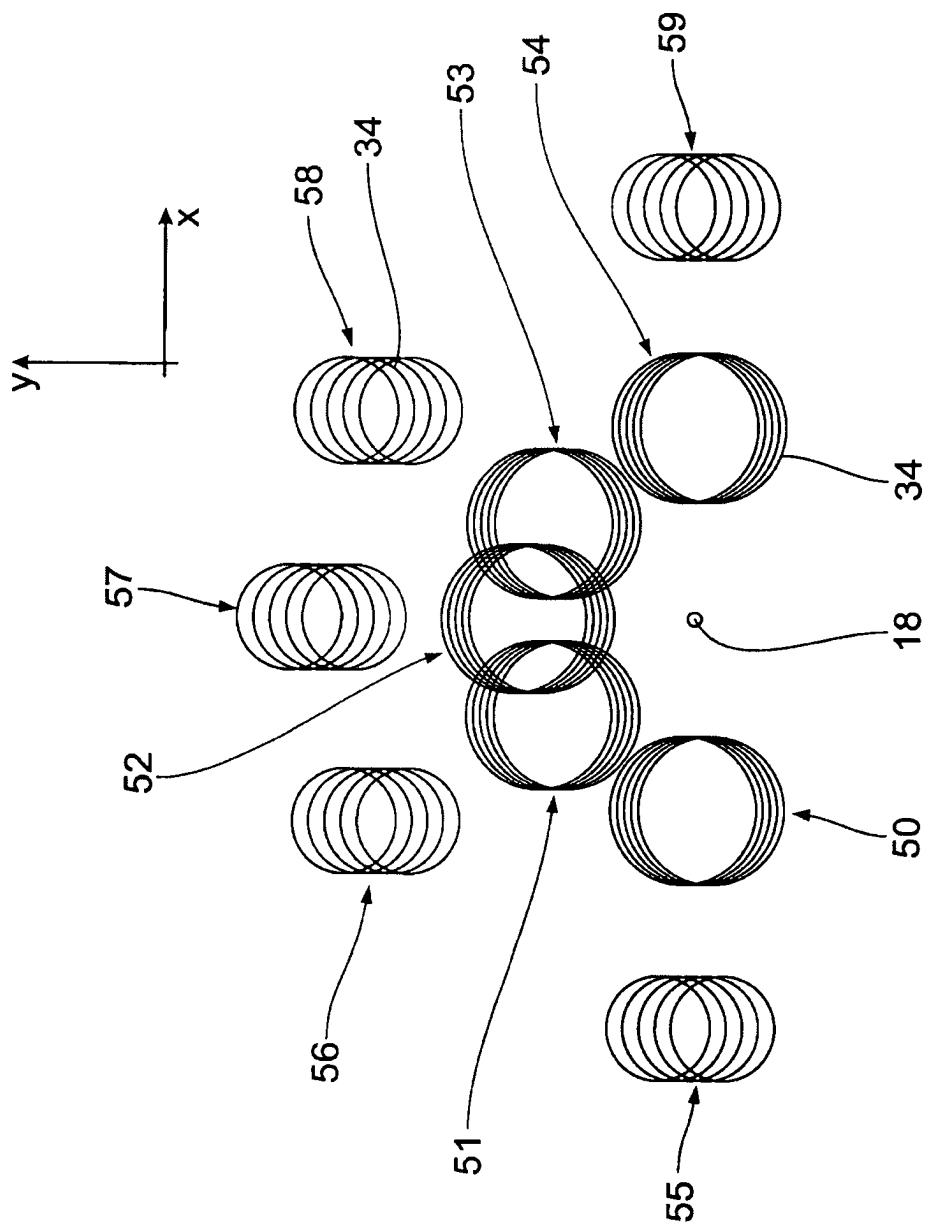


Fig. 12

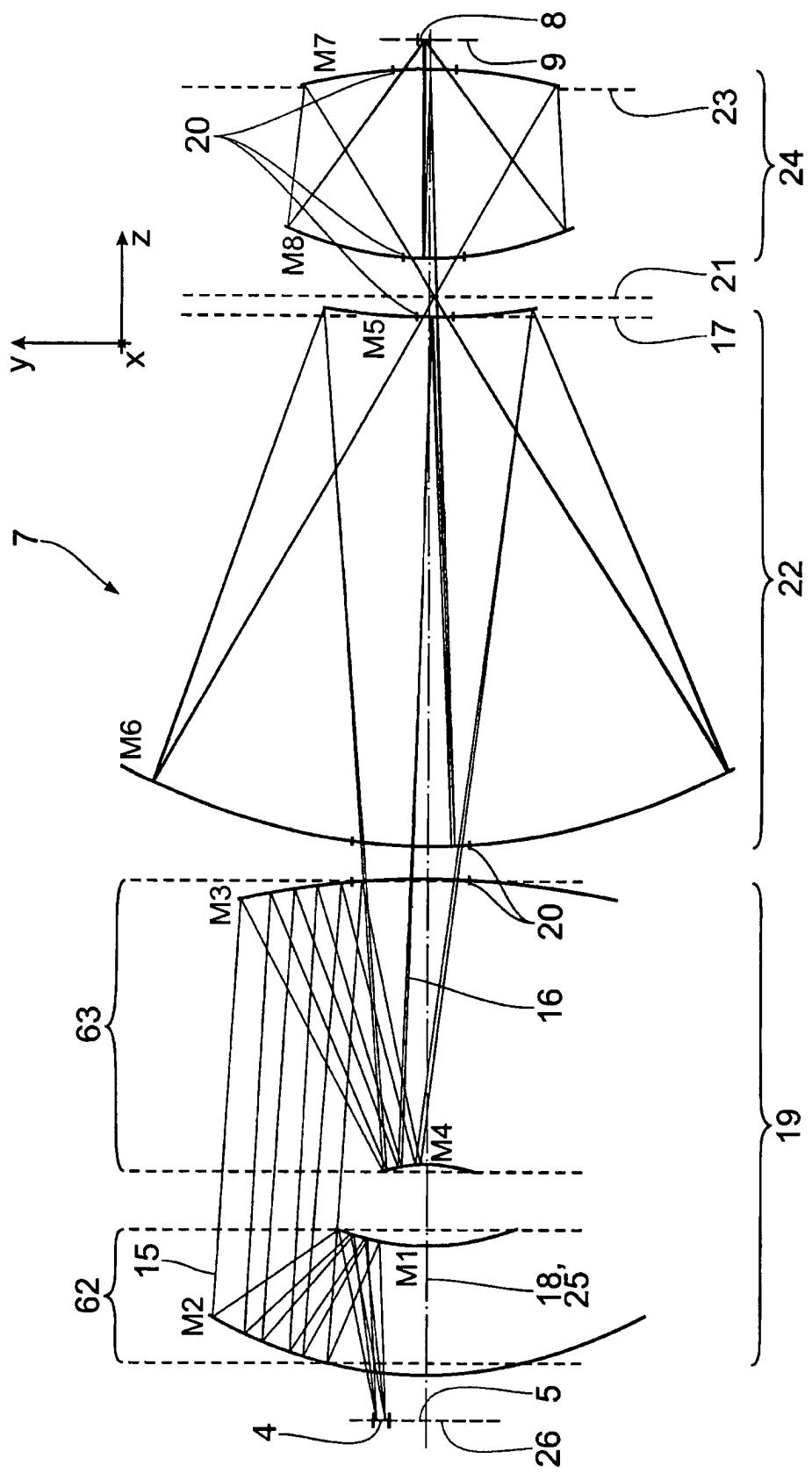


Fig. 13

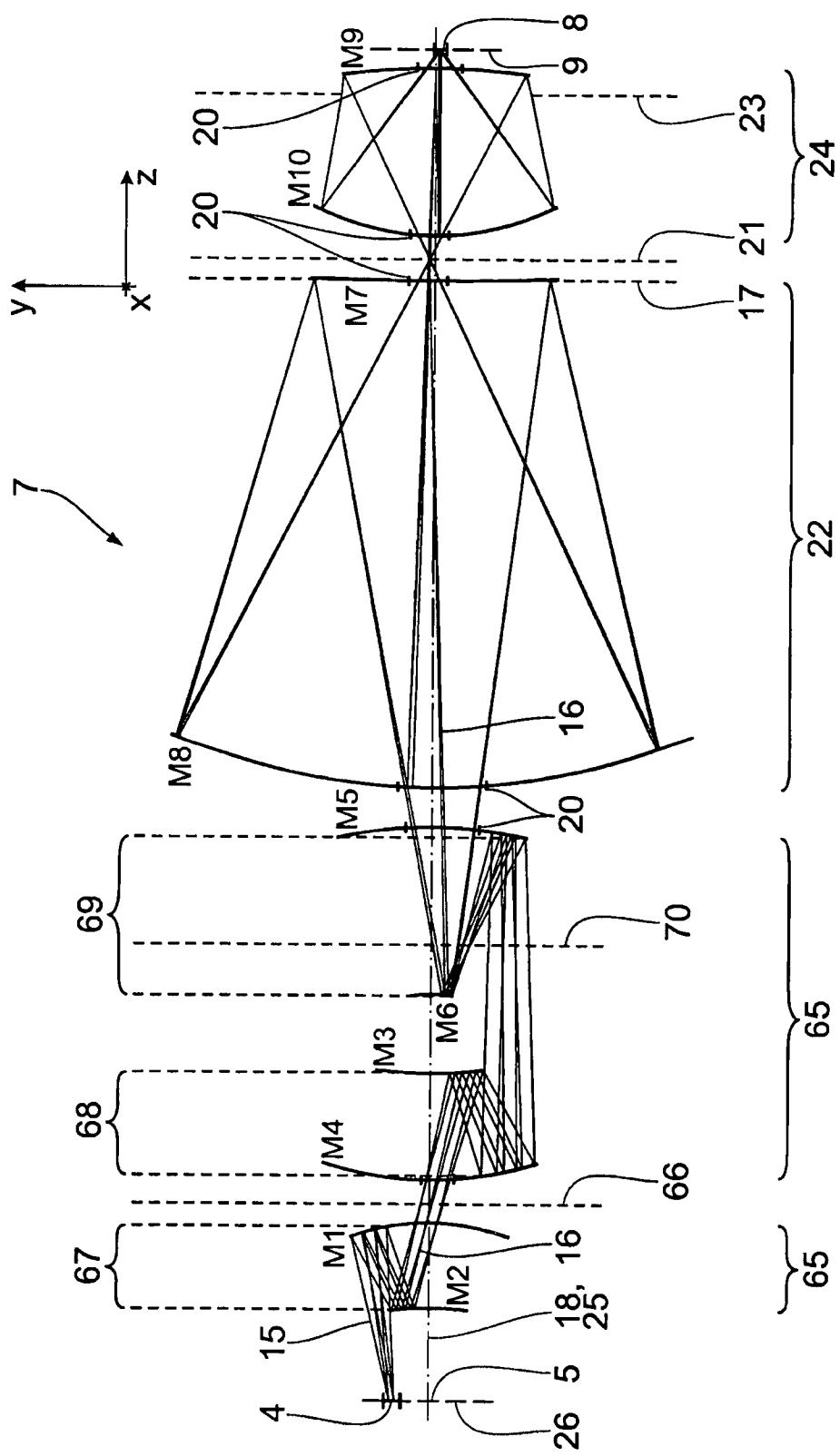


Fig. 14

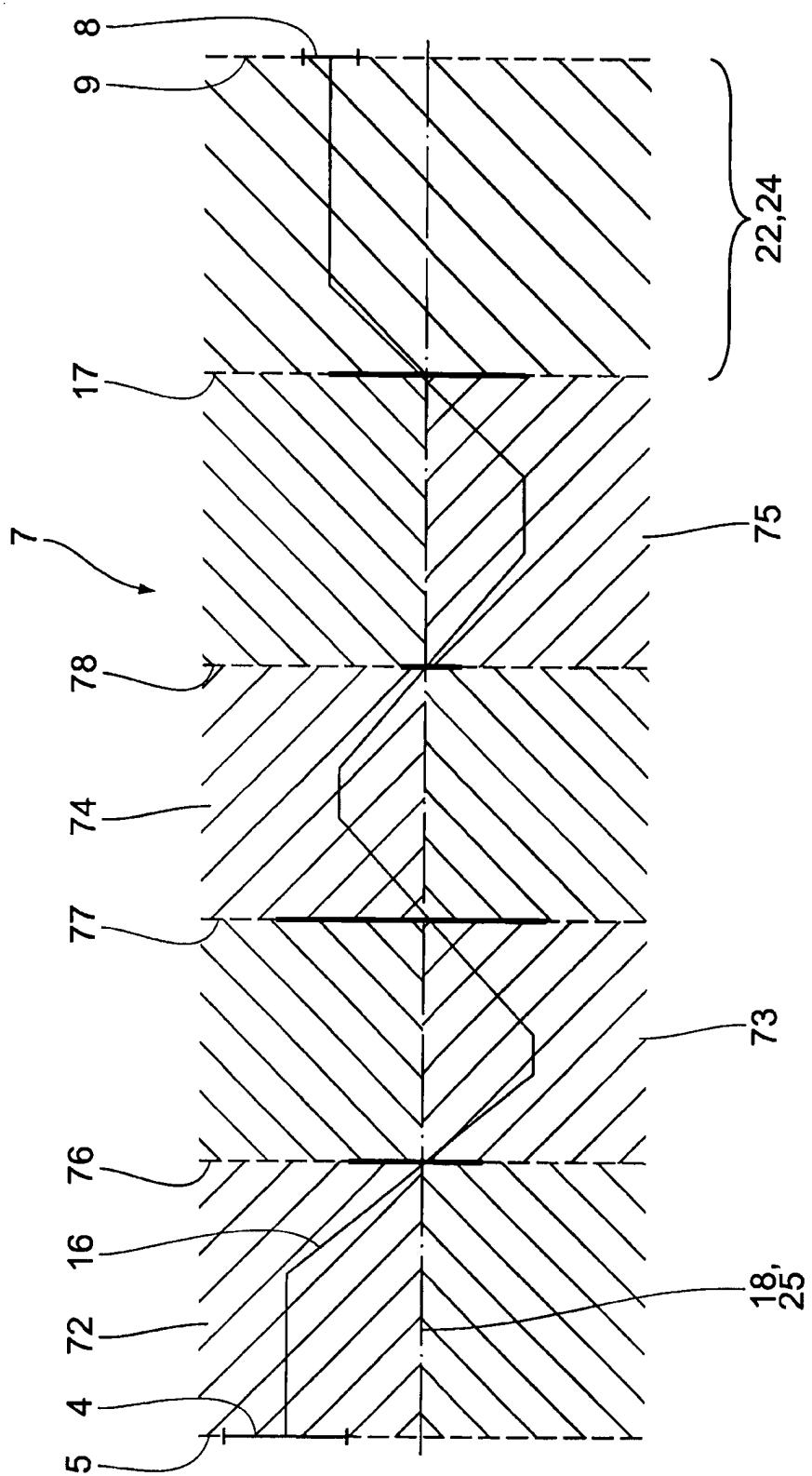


Fig. 15

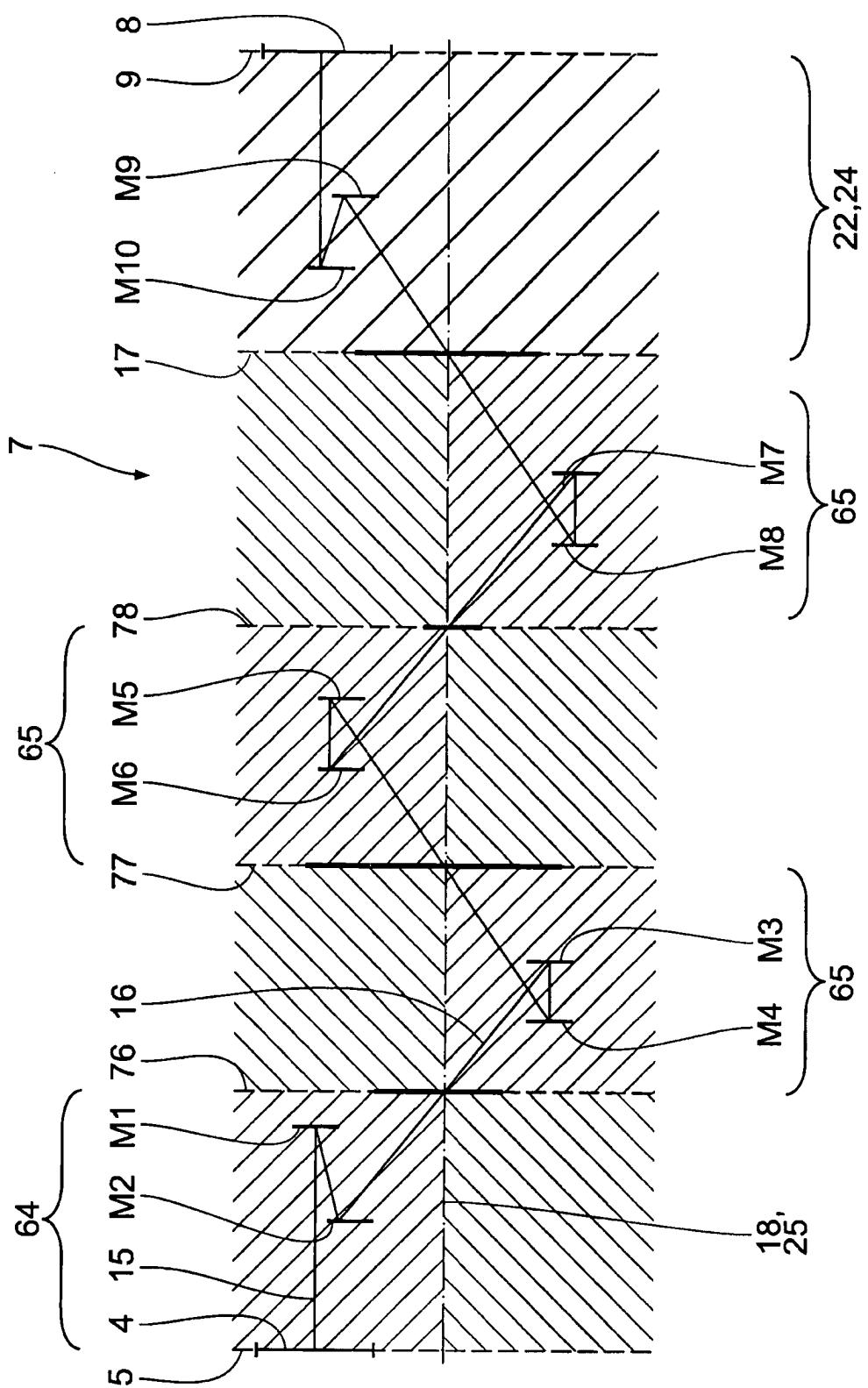


Fig. 16