



(10) **DE 10 2009 047 179 B4** 2016.06.30

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2009 047 179.0**
 (22) Anmeldetag: **26.11.2009**
 (43) Offenlegungstag: **09.06.2011**
 (45) Veröffentlichungstag
 der Patenterteilung: **30.06.2016**

(51) Int Cl.: **G02B 17/06 (2006.01)**
G02B 13/14 (2006.01)

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

(73) Patentinhaber:
Carl Zeiss SMT GmbH, 73447 Oberkochen, DE

(72) Erfinder:
Walser, Reinhold, 89077 Ulm, DE

(74) Vertreter:
**Werner & ten Brink Patentanwälte
 Partnerschaftsgesellschaft mbB, 48149 Münster,
 DE**

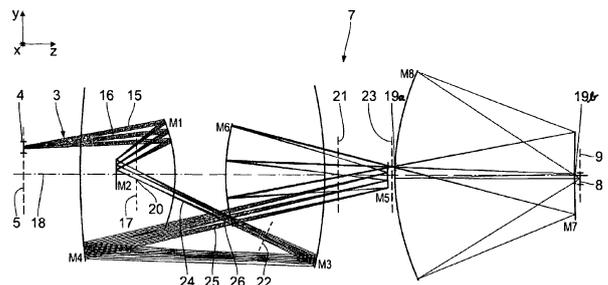
(56) Ermittelter Stand der Technik:
US 6 927 901 B2
EP 1 282 011 A2

(54) Bezeichnung: **Projektionsobjektiv**

(57) Hauptanspruch: Projektionsobjektiv (7) zur Abbildung eines in einer Objektebene (5) angeordneten Musters in eine Bildebene (9) mit Hilfe von elektromagnetischer Strahlung (3) aus dem extremen Ultraviolettbereich (EUV), wobei zwischen der Objektebene (5) und der Bildebene (9) mehrere mit Reflexbeschichtungen versehene, abbildende Spiegel (M1–M8) angeordnet sind und wobei mindestens einer der Spiegel (M1–M8) eine gradierte Reflexbeschichtung aufweist, dadurch gekennzeichnet, dass die gradierte Reflexbeschichtung einen elliptischen, parabolischen oder hyperbolischen Schichtdickenverlauf der Schichtdicke d in der x - y -Ebene hat, der durch

$$d(x, y) = c_1 + \begin{pmatrix} x - c_2 \\ y - c_3 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} c_6 & c_7/2 \\ c_7/2 & c_8 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - c_2 \\ y - c_3 \end{pmatrix}$$

beschrieben wird, wobei $c_1, c_2, c_3, c_6, c_7, c_8$ Koeffizienten sind.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf ein Projektionsobjektiv zur Abbildung eines in einer Objektebene angeordneten Musters in eine Bildebene mit Hilfe von elektromagnetischer Strahlung aus dem extremen Ultraviolettbereich (EUV) gelöst, wobei zwischen der Objektebene und der Bildebene mehrere mit Reflexbeschichtungen versehene, abbildende Spiegel angeordnet sind und wobei mindestens einer der Spiegel eine gradierte Reflexbeschichtung aufweist.

[0002] Um bei der Produktion von Halbleiterbauelementen mit lithographischen Methoden immer feinere Strukturen erzeugen zu können, wird mit immer kurzwelligerem Licht gearbeitet. Arbeitet man im extremen ultravioletten (EUV) Wellenlängenbereich, etwa bei Wellenlängen zwischen ca. 5 nm und 20 nm, lässt sich nicht mehr mit linsenartigen Elementen in Transmission arbeiten, sondern es werden Beleuchtungs- und Projektionsobjektive aus Spiegelementen mit an die jeweilige Arbeitswellenlänge angepasste Reflexbeschichtungen aufgebaut. Im Gegensatz zu Spiegeln im sichtbaren und ultravioletten Wellenlängenbereich lassen sich auch theoretisch pro Spiegel nur maximale Reflektivitäten von weniger als 80% erreichen. Da EUV-Projektive in der Regel mehrere Spiegel aufweisen, müssen diese jeweils eine möglichst hohe Reflektivität aufweisen, um eine hinreichend hohe Gesamtreflektivität sicherzustellen.

[0003] Die US 6 927 901 B2 bzw. die EP 1 282 011 A2 offenbaren ein EUV-Projektionsobjektiv mit mehreren Abbildungsspiegeln zwischen der Objektebene und der Bildebene, die eine optische Achse definieren und Reflexbeschichtungen aufweisen. Mindestens einer der Spiegel weist eine gradierte Reflexbeschichtung auf mit einem Schichtdickengradienten, der rotationssymmetrisch zu einer Beschichtungsachse ist, wobei die Beschichtungsachse exzentrisch zur optischen Achse angeordnet ist, um eine höhere Gesamttransmission des Projektionsobjektivs zu erreichen. Die Reflexbeschichtung kann in Richtung der Beschichtungsachse parabolförmig sein.

[0004] Eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht darin, eine alternative Möglichkeit zur Erhöhung der Gesamttransmission eines Projektionsobjektivs für den extremen Ultraviolettbereich aufzuzeigen.

[0005] Diese Aufgabe wird durch ein Projektionsobjektiv zur Abbildung eines in einer Objektebene angeordneten Musters in eine Bildebene mit Hilfe von elektromagnetischer Strahlung aus dem extremen Ultraviolettbereich (EUV) gelöst, wobei zwischen der Objektebene und der Bildebene mehrere mit Reflexbeschichtungen versehene, abbildende Spiegel angeordnet sind und wobei mindestens einer der Spiegel eine gradierte Reflexbeschichtung aufweist, die einen elliptischen, parabolischen oder hyperbolischen Schichtdickenverlauf der Schichtdicke d in der x - y -Ebene aufweist, der durch

$$d(x, y) = c_1 + \begin{pmatrix} x - c_2 \\ y - c_3 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} c_6 & c_7/2 \\ c_7/2 & c_8 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - c_2 \\ y - c_3 \end{pmatrix}$$

beschrieben wird, wobei $c_1, c_2, c_3, c_6, c_7, c_8$ Koeffizienten sind.

[0006] Es hat sich herausgestellt, dass EUV-Projektionsobjektive, die mindestens einen Spiegel mit elliptisch, parabolisch oder hyperbolisch gradierter Reflexbeschichtung, also mit einem Schichtdickenverlauf, der einem Kegelschnitt entspricht, aufweisen, verglichen mit herkömmlichen EUV-Projektionsobjektiven, bei denen alle Spiegel mit gradierter Reflexbeschichtung einen zentrierten rotationssymmetrischen Schichtdickenverlauf aufweisen, eine höhere Gesamttransmission aufweisen.

[0007] Der Koeffizient c_1 ist eine Hintergrunddicke, c_2 und c_3 stellen die Dezentrierungen in x - und y -Richtung dar. Die reellen Parameter c_6, c_7, c_8 , die größer oder kleiner Null sein können, beschreiben die drei Kegelschnittarten Ellipse, Parabel und Hyperbel. Ein solcher kegelschnittartiger Schichtdickenverlauf führt bereits zu einem Gewinn an Gesamttransmission und ist gleichzeitig bei der Beschichtung des jeweiligen Spiegels prozesstechnisch nicht zu aufwendig.

[0008] In bevorzugten Ausführungsformen definieren die Spiegel des Projektionsobjektivs eine optische Achse des Projektionsobjektivs und ist die Beschichtungsachse der gradierten Reflexbeschichtung mit elliptischem, parabolischen oder hyperbolischen Schichtdickenverlauf exzentrisch zur optischen Achse des Projektionsobjektivs angeordnet ist. Überraschenderweise weisen diese Projektionsobjektive mit mindestens einem Spiegel mit dezentrierter elliptischer, parabolischer oder hyperbolischer gradierter Reflexbeschichtung eine

höhere Gesamttransmission als die bisher bekannten Projektionsobjektive mit mindestens einem Spiegel mit dezentriert rotationssymmetrisch gradierter Reflexbeschichtung auf.

[0009] In bevorzugten Ausführungsformen sind die Spiegel derart ausgebildet und in Bezug zueinander angeordnet, dass jeder Spiegel aus einem für den Spiegel charakteristischen Inzidenzwinkelbereich bestrahlbar ist, wobei zumindest der Spiegel mit dem größten Inzidenzwinkelbereich eine gradierte Reflexbeschichtung mit elliptischem, parabolischen oder hyperbolischen Schichtdickenverlauf aufweist. Es hat sich herausgestellt, dass gerade bei Spiegeln mit großem Inzidenzbereich durch den elliptischen, parabolischen oder hyperbolischen Schichtdickenverlauf der Reflexbeschichtung eine deutliche Reflektivitätssteigerung erreicht werden kann, die sich positiv auf die Gesamttransmission des Projektionsobjektivs auswirkt.

[0010] Vorteilhafterweise sind zwischen Objektebene und Bildebene mehr als fünf Spiegel angeordnet.

[0011] Vorzugsweise sind alle Spiegel koaxial zueinander angeordnet.

[0012] Bevorzugt sind die Spiegel derart ausgebildet und angeordnet, dass zwischen Objektebene und Bildebene ein Zwischenbild erzeugt wird.

[0013] Die vorstehenden und weitere Merkmale gehen außer aus den Ansprüchen auch aus der Beschreibung und den Zeichnungen hervor, wobei die einzelnen Merkmale jeweils für sich alleine oder zu mehreren in Form von Unterkombinationen bei einer Ausführungsform der Erfindung und auf anderen Gebieten verwirklicht sein und vorteilhafte sowie für sich schutzfähige Ausführungen darstellen können.

[0014] Die vorliegende Erfindung soll unter Bezugnahme auf ein bevorzugtes Ausführungsbeispiel näher erläutert werden. Dazu zeigen

[0015] **Fig. 1** schematisch eine Projektionsbelichtungsanlage für die EUV-Mikrolithographie;

[0016] **Fig. 2** eine Ausführung einer abbildender Optik, die als Projektionsobjektiv in der Projektionsbelichtungsanlage nach **Fig. 1** einsetzbar ist, wobei der Abbildungsstrahlengang für die Hauptstrahlen (virtuell) und für den oberen und unteren Komastrahl dreier ausgewählter Feldpunkte dargestellt ist;

[0017] **Fig. 3** die Verteilung der Strahlungsintensität in Abhängigkeit von Spiegelradius und Einfallswinkel bei einem Spiegel mit gradierter Reflexbeschichtung, die einen dezentrierten elliptischen Schichtdickenverlauf aufweist;

[0018] **Fig. 4** die Verteilung der Strahlungsintensität in Abhängigkeit von Spiegelradius und Einfallswinkel bei einem Spiegel mit gradierter Reflexbeschichtung, die einen zentrierten rotationssymmetrischen Schichtdickenverlauf aufweist; und

[0019] **Fig. 5** eine Gegenüberstellung der Reflektivitäten der Spiegel des in **Fig. 2** dargestellten Projektionsobjektivs jeweils mit elliptischem Schichtdickenverlauf einerseits und herkömmlichen Schichtdickenverläufen andererseits.

[0020] Eine Projektionsbelichtungsanlage **1** für die Mikrolithographie, wie sie in **Fig. 1** exemplarisch dargestellt ist, hat eine Lichtquelle **2** für Beleuchtungslicht bzw. Abbildungslicht **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 15 nm erzeugt. Bei der Lichtquelle **2** kann es sich insbesondere um eine Lichtquelle mit einer Wellenlänge von 6,9 nm oder auch um eine Lichtquelle mit einer zentralen Wellenlänge von 13,5 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 Beleuchtungslichts **3** ist in der **Fig. 1** äußerst schematisch dargestellt.

[0021] Zur Führung des Beleuchtungslichts **3** von der Lichtquelle **2** hin zu einem Objektfeld **4** in einer Objektebene **5** dient eine Beleuchtungsoptik **6**. Mit einer Projektionsoptik bzw. abbildenden Optik **7** wird das Objektfeld **4** in ein Bildfeld **8** in einer Bildebene **9** mit einem vorgegebenen Verkleinerungsmaßstab abgebildet. Das Bildfeld **8** hat in der x-Richtung eine Erstreckung von **13** mm und in der y-Richtung eine Erstreckung von 1 mm.

Für die Projektionsoptik 7 kann das in Fig. 2 dargestellte Ausführungsbeispiel eingesetzt werden. Die Projektionsoptik 7 nach Fig. 2 verkleinert um einen Faktor 8. Auch andere Verkleinerungsmaßstäbe sind möglich, etwa 4× oder 5× oder auch andere. Für das Beleuchtungslicht 3 mit EUV-Wellenlänge eignet sich insbesondere ein Abbildungsmaßstab von 8×, da hierdurch ein objektseitiger Einfallswinkel auf einer Reflexionsmaske 10 klein gehalten werden kann. Ein Abbildungsmaßstab von 8× führt zudem nicht zur Notwendigkeit, unnötig große Masken einzusetzen. Die Bildebene 9 ist bei der Projektionsoptik 7 in der Ausführung nach Fig. 2 parallel zur Objektebene 5 angeordnet. Abgebildet wird hierbei ein mit dem Objektfeld 4 zusammenfallender Ausschnitt der Reflexionsmaske 10, die auch als Retikel bezeichnet wird.

[0022] 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 Beleuchtungslichts 3 und zwischen der Projektionsoptik 7 und dem Substrat 11 ein aus der Projektionsoptik 7 auslaufendes Strahlenbündel 14 des Beleuchtungslichts 3 dargestellt. Eine bildfeldseitige numerische Apertur der Projektionsoptik 7 in der Ausführung nach Fig. 2 beträgt 0,50. Dies ist in der Fig. 1 nicht maßstäblich wiedergegeben.

[0023] 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.

[0024] 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.

[0025] Fig. 2 zeigt das optische Design einer ersten Ausführung der Projektionsoptik 7. Dargestellt ist in der Fig. 2 der Strahlengang jeweils dreier Einzelstrahlen 15, die von fünf in der Fig. 2 zueinander in der y-Richtung beabstandeten Objektfeldpunkten ausgehen. Die drei Einzelstrahlen 15, die zu einem dieser fünf 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, sondern um virtuelle Abbildungsstrahlengänge der Projektionsoptik 7 handelt.

[0026] Die Projektionsoptik 7 nach Fig. 2 hat insgesamt acht Spiegel, die in der Reihenfolge des Strahlengangs der Einzelstrahlen 15, ausgehend vom Objektfeld 4, mit M1 bis M8 durchnummeriert sind. Dargestellt sind in Fig. 2 die berechneten Reflexionsflächen der Spiegel M1 bis M8. Genutzt wird, wie in der Darstellung nach Fig. 2 ersichtlich ist, nur ein kleiner Bereich dieser berechneten Reflexionsflächen. Lediglich dieser tatsächlich genutzte Bereich der Reflexionsflächen ist bei den realen Spiegeln M1 bis M8 tatsächlich vorhanden. Diese Nutz-Reflexionsflächen werden in bekannter Weise von Spiegelkörpern getragen. Die Spiegel M1 bis M8 definieren eine gemeinsame optische Achse 18.

[0027] Die optischen Daten der Projektionsoptik 7 werden nachfolgend anhand von Tabelle 1a wiedergegeben. Die Tabelle 1a zeigt in der Spalte „Radius“ jeweils den Krümmungsradius der Spiegel M1 bis M8. Die Spalte „Dicke“ beschreibt den Abstand, ausgehend von der Objektebene 5, jeweils zur nachfolgenden Oberfläche in z-Richtung.

Oberfläche	Radius	Dicke
Objektebene	UNENDLICH	543,757
M1	-449,236	-211,269
M2	-381,481	71,127
BLLENDE	UNENDLICH	678,094
M3	-1293,655	878,647
M4	2575,518	1103,024
M5	340,443	577,829

M6	659,115	1250,269
M7	2394,266	642,054
M8	817,414	663,527
Bildebene	UNENDLICH	0,000

Tabelle 1a

[0028] Die Tabelle 1b beschreibt die genaue Oberflächenform der Reflexionsflächen der Spiegel M1 bis M8, wobei die Konstanten K sowie A bis G in folgende Gleichung für die Pfeilhöhe z einzusetzen sind:

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

[0029] 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. Mit anderen Worten fasst Tabelle 1b die Entwicklungsparameter der Pfeilhöhe z(h) der Spiegelflächen zusammen.

Oberfläche	K	A	B	C
M1	0,000000E + 00	-2,460293E - 10	-1,269784E - 15	2,803303E - 21
M2	0,000000E + 00	6,386979E - 08	-2,318025E - 12	6,696092E - 17
M3	0,000000E + 00	9,799571E - 11	-1,514496E - 15	1,015677E - 20
M4	0,000000E + 00	-1,251897E - 11	-1,029828E - 15	6,301813E - 21
M5	0,000000E + 00	2,958312E - 08	5,028056E - 13	8,066658E - 18
M6	0,000000E + 00	2,017168E - 11	-2,275527E - 17	-9,166209E - 23
M7	0,000000E + 00	1,252401E - 09	4,102615E - 15	2,060274E - 20
M8	0,000000E + 00	2,416984E - 11	5,199686E - 17	8,459189E - 23
Oberfläche	D	E	F	G
M1	1,652701E - 25	0,000000E + 00	0,000000E + 00	0,000000E + 00
M2	-4,001704E - 21	0,000000E + 00	0,000000E + 00	0,000000E + 00
M3	-2,679237E - 26	0,000000E + 00	0,000000E + 00	0,000000E + 00
M4	-1,577707E - 26	0,000000E + 00	0,000000E + 00	0,000000E + 00
M5	-4,143857E - 21	0,000000E + 00	0,000000E + 00	0,000000E + 00
M6	5,861325E - 28	0,000000E + 00	0,000000E + 00	0,000000E + 00
M7	1,022964E - 25	1,423250E - 30	0,000000E + 00	0,000000E + 00
M8	1,424018E - 28	1,255450E - 34	7,241285E - 40	0,000000E + 00

Tabelle 1b

[0030] Das Objektfeld **4** und das Bildfeld **8** sind ringsegmentförmig um die optische Achse **18** herum angeordnet. Die Spiegel M1 bis M4 werden angenähert ringsegmentförmig und in Bezug auf die optische Achse **18** off-axis genutzt. Die genutzte optische Reflexionsfläche der Spiegel M1 bis M4 liegt also von der optischen Achse **18** entfernt. Das Objektfeld **4** und das Bildfeld **8** sind beabstandet zur optischen Achse **18** angeordnet.

[0031] Die Spiegel M1, M3, M4, M6 und M8 sind als Konkavspiegel ausgeführt. Die Spiegel M2, M5 und M7 sind als Konvexspiegel ausgeführt.

[0032] Die Spiegel M1 und M6 sowie M5 und M8 sind, was die Orientierung ihrer Reflexionsflächen angeht, Rücken an Rücken angeordnet.

[0033] Die optisch genutzten Bereiche der Spiegel M1 bis M6 haben keine Durchgangsöffnung zum Durchtritt von Abbildungslicht, sind also nicht obskuriert.

[0034] Im Abbildungsstrahlengang zwischen den Spiegeln M6 und M7 durchtreten die Einzelstrahlen **15** eine Durchgangsöffnung **19** im Spiegel M8. Der Spiegel M8 wird um die Durchgangsöffnung **19** herum genutzt. Beim Spiegel M8 handelt es sich also um einen obskurierten Spiegel. Neben dem Spiegel M8 ist auch der Spiegel M7 obskuriert, der ebenfalls jeweils eine nahezu zentrische Durchgangsöffnung **19** aufweist. Die Durchgangsöffnung **19** des Spiegels M7 wird vom Abbildungslicht **3** im Abbildungsstrahlengang zwischen dem Spiegel M8 und dem Bildfeld **8** kurz vor dem Erreichen des Bildfeldes **8** durchtreten.

[0035] Die Pupillenebene **17** liegt im hier dargestellten Beispiel im Abbildungsstrahlengang in der Projektionsoptik **7** zwischen den Spiegeln M2 und M3. Die Pupillenebene **17** liegt im Abbildungsstrahlengang zwischen dem Objektfeld **4** und der Durchgangsöffnung **19** des Spiegels M8. In der Pupillenebene **17** ist eine Obskurationsblende **20** angeordnet. Die Obskurationsblende **20** schattet denjenigen zentralen Bereich des Abbildungslichts **3** in der Pupillenebene **17** ab, der aufgrund der Durchgangsöffnungen **19** nicht zur Abbildung des Objektfeldes **4** beiträgt.

[0036] Im Abbildungsstrahlengang zwischen den Spiegeln M2 und M3 liegt nach der Pupillenebene **17** eine erste Zwischenbildebene **22** der Projektionsoptik **7**. Zwischen der zweiten Pupillenebene **21** und der Austrittspupille der Projektionsoptik **7** liegt im Abbildungsstrahlengang zwischen den Spiegeln M6 und M7 eine zweite Zwischenbildebene **23**.

[0037] Zwischen den Spiegeln M2 und M3 verläuft ein erster Abbildungs-Teilstrahl **24** in der Projektionsoptik **7**. Zwischen den Spiegeln M4 und M5 verläuft ein zweiter Abbildungs-Teilstrahl **25**. Diese beiden Abbildungs-Teilstrahlen **24**, **25** kreuzen sich in einem Kreuzungsbereich **26**. Dieser Kreuzungsbereich **26** ist räumlich zum Spiegel M6 benachbart.

[0038] Bei der Projektionsoptik **7** handelt es sich um eine katoptrische Optik, also um eine ausschließlich mit Spiegeln M1 bis M8 ausgeführte Optik.

[0039] In dem in **Fig. 2** dargestellten Beispiel weisen alle Spiegel M1 bis M8 eine dezentrierte gradierte Reflexbeschichtung auf, die einen elliptischen Schichtdickenverlauf der Schichtdicke d in der x - y -Ebene hat. Ebenso könnten Spiegel mit gradierter Reflexbeschichtung eingesetzt werden, die einen hyperbolischen oder parabolischen Schichtdickenverlauf aufweisen, oder Spiegel mit unterschiedlichem Schichtdickenverlauf miteinander kombiniert werden. Der elliptische Schichtdickenverlauf ist, ausgehend von der weiter oben angegebenen allgemeinen quadratischen Form des Schichtdickenverlaufs, beschreibbar durch $d(x, y) = c_1 + c_6 x^2 + c_7 x(y - c_3) + c_8 (y - c_3)^2$, wobei c_1, c_3, c_6, c_7, c_8 Koeffizienten sind. Im vorliegenden Beispiel liegt eine Dezentrierung nur in y -Richtung vor, so dass c_2 aus der allgemeinen Formel gleich Null ist. Dies kann beispielsweise bei spiegelsymmetrischem Strahlengang vorliegen. Die Werte für die Koeffizienten c_1, c_3, c_6, c_7, c_8 , d. h. die Entwicklungskoeffizienten allgemein dezentrierter kegelschnittartiger Schichten für den Spezialfall eines elliptischen Verlaufs, sind für jeden Spiegel M1 bis M8 in der Tabelle 2 aufgelistet.

	c1	c3	c6	c7	c8
M1	1.01E + 00	-1.19E + 02	5.36E - 08	-4.50E - 12	4.01E - 08
M2	1.06E + 00	-5.57E + 01	1.14E - 05	6.62E - 09	7.02E - 06
M3	1.02E + 00	2,26E - 05	1.16E - 08	-1.76E - 12	1.08E - 08
M4	9.88.E - 01	-1.01E + 02	2.02E - 07	5.51E - 11	2.69E - 07
M5	1.18E + 00	1.65E + 02	-8.45E - 06	-1 - 09E - 09	-3.03E - 06
M6	1.01E + 00	-1.09E - 05	-9.27E - 08	-5.09E - 10	-1.65E - 07
M7	9.96E - 01	4.30E + 01	8.44E - 07	-1.12E - 09	8.28E - 07
M8	1.01E + 00	8.54E - 06	1.22E - 07	-2.52E - 10	1.26E - 07

Tabelle 2

[0040] Um den positiven Effekt des elliptischen Schichtdickenverlaufs von gradierten Reflexbeschichtungen auf die Gesamttransmission von Projektionsobjektiven deutlich zu machen, ist in **Fig. 3** die Verteilung der Strah-

lungsintensität in Abhängigkeit von Spiegelradius und Einfallswinkel bei einem Spiegel mit gradierter Reflexbeschichtung, die einen dezentrierten elliptischen Schichtdickenverlauf aufweist, dargestellt. Dabei handelt es sich um die Strahlungsintensitätsverteilung auf dem Spiegel M7 aus dem in **Fig. 2** dargestellten Beispiel, bei dem der Spiegelradius variiert wird. Über die meisten Einfallswinkel und Spiegelradien liegt die Intensität, die mit der Reflektivität äquivalent ist, bei deutlich über 0,64. Nur bei gleichzeitig hohen Einfallswinkeln und sehr großen Spiegelradien sinkt die Intensität darunter. Bei Spiegelradien von über 280 mm und Einfallswinkel um 18° sinkt die Intensität unter 0,6. Der Maximalwert der Intensität liegt bei 0,7, der Minimalwert bei 0,56.

[0041] Dies lässt sich mit der Intensitätsverteilung des Spiegels M7 eines Projektionsobjektivs vergleichen, das mit dem in **Fig. 2** dargestellten übereinstimmt, mit dem Unterschied, dass alle Spiegel M1 bis M8 eine gradierete Reflexbeschichtung mit zentriertem rotationssymmetrischen Schichtdickenverlauf aufweisen, der sich ebenfalls mit $d(x, y) = c_1 + c_6x^2 + c_7x(y - c_3) + c_8(y - c_3)^2$ beschreiben lässt, wobei die Koeffizienten c_3 und c_7 durchgehend gleich Null und $c_6 = c_8$ sind. Die Werte für die Koeffizienten c_1, c_3, c_6, c_7, c_8 , d. h. die Entwicklungskoeffizienten einer zentrierten, rotationssymmetrischen Schicht, sind für jeden Spiegel M1 bis M8 in der Tabelle 3 aufgelistet.

	c1	c3	c6	c7	c8
M1	1.01E + 00	0.00E + 00	5.66E - 08	0.00E + 00	5.66E - 08
M2	1.08E + 00	0.00E + 00	1.98E - 05	0.00E + 00	1.98E - 05
M3	1.02E + 00	0.00E + 00	1.09E - 08	0.00E + 00	1.09E - 08
M4	9.79.E - 01	0.00E + 00	2.04E - 07	0.00E + 00	2.04E - 07
M5	1.10E + 00	0.00E + 00	-1.68E - 05	0.00E + 00	-1.68E - 05
M6	1.01E + 00	0.00E + 00	-1.52E - 07	0.00E + 00	-1.52E - 07
M7	1.00E + 00	0.00E + 00	8.58E - 07	0.00E + 00	8.58E - 07
M8	1.01E + 00	0.00E + 00	1.24E - 07	0.00E + 00	1.24E - 07

Tabelle 3

[0042] Die Verteilung der Strahlungsintensität für Spiegel M7 des Vergleichsprojektivs mit zentrierten rotationssymmetrischen Reflexbeschichtungen ist in **Fig. 4** analog zu **Fig. 3** dargestellt. Es fällt auf, dass insgesamt die Strahlungsintensität geringer ist und nur 0,6 übersteigt und die Strahlungsintensität bereits viel kleineren Spiegelradien unter diese Marke absinkt. Bei sehr hohen Einfallswinkeln und einem Spiegelradius von mehr als 280 mm sinkt die Intensität sogar unter 0,35. Zwar erreicht die maximale Intensität 0,7 wie bei der Ausführungsform mit dezentrierten elliptischen Reflexbeschichtungen, der Minimalwert beträgt aber lediglich 0,25. Der verfügbare Parameterraum zur Optimierung des Spiegels M7 innerhalb des Projektionsobjektivs ist daher bei einer zentrierten rotationssymmetrischen Reflexbeschichtung viel geringer.

[0043] Sowohl für das in **Fig. 2** beispielhaft dargestellte Projektionsobjektiv mit gradierten Reflexbeschichtungen mit dezentriertem elliptischen Schichtdickenverlauf wie auch für das Vergleichsprojektiv wurde außerdem die Intensitätsverteilung in der Pupille untersucht. Für einen Feldpunkt in der Feldmitte beträgt bei dem Projektionsobjektiv mit dezentrischen elliptischen Reflexbeschichtungen die mittlere Intensität 0,0378 bei einem Maximalwert von 0,0403 und einem Minimalwert von 0,0269. Dies ist eine deutliche Intensitätssteigerung gegenüber dem Vergleichsprojektiv mit zentrierten rotationssymmetrischen Reflexbeschichtungen, das an demselben Feldpunkt eine mittlere Intensität von 0,0316 bei einem Maximalwert von 0,0395 und einem Minimalwert von 0,0098 aufweist. Die Intensitätsverteilung über der Pupille führt bei elliptischen Reflexbeschichtungen nicht nur zu insgesamt höheren Werten, was sich positiv auf die Gesamttransmission des Projektionsobjektivs auswirkt, sondern die geringeren Intensitätsschwankungen führen auch zu einem verbesserten Abbildungsverhalten.

[0044] Die Situation stellt sich für einen Feldpunkt am Rande des Feldes ähnlich dar. Bei dem Projektionsobjektiv mit dezentrischen elliptischen Reflexbeschichtungen beträgt die mittlere Intensität 0,0296 bei einem Maximalwert von 0,0390 und einem Minimalwert von 0,0034. Dies ist eine deutliche Intensitätssteigerung gegenüber dem Vergleichsprojektiv mit zentrierten rotationssymmetrischen Reflexbeschichtungen, das an demselben Feldpunkt eine mittlere Intensität von 0,0277 bei einem Maximalwert von 0,0381 und einem Minimalwert von 0,0066 aufweist. Auch am Feldrand führen elliptische Reflexbeschichtungen zu einer höheren Intensität und damit höheren Gesamttransmission gegenüber rotationssymmetrischen Reflexbeschichtungen.

[0045] In Fig. 5 sind die Reflektivitäten der einzelnen Spiegel M1 bis M8 sowohl für das in Fig. 2 dargestellte Projektionsobjektiv mit gradierten Reflexbeschichtungen mit dezentriertem elliptischen Schichtdickenverlauf sowie für das Vergleichsprojektionsobjektiv mit gradierten Reflexbeschichtungen mit zentriertem rotationssymmetrischen Schichtdickenverlauf wie auch für ein zweites Vergleichsprojektionsobjektiv mit gradierten Reflexbeschichtungen mit dezentriertem rotationssymmetrischen Schichtdickenverlauf. Dessen Schichtdickenverlauf lässt sich ebenfalls mit $d(x, y) = c_1 + c_6x^2 + c_7x(y - c_3) + c_8(y - c_3)^2$ beschreiben, wobei der Koeffizient c_7 durchgehend gleich Null und $c_6 = c_8$ ist. Die Werte für die Koeffizienten c_1, c_3, c_6, c_7, c_8 , d. h. die Entwicklungskoeffizienten einer dezentrierten, rotationssymmetrischen Schicht, sind für jeden Spiegel M1 bis M8 in der Tabelle 4 aufgelistet.

	c1	c3	c6	c7	c8
M1	1.01E + 00	-2.48E + 01	5.24E - 08	0.00E + 00	5.24E - 08
M2	1.07E + 00	-3.11E + 01	1.01E - 05	0.00E + 00	1.01E - 05
M3	1.02E + 00	-1,03E + 01	1.11E - 08	0.00E + 00	1.11E - 08
M4	9.79.E - 01	3.14E + 00	2.03E - 07	0.00E + 00	2.03E - 07
M5	1.12E + 00	5.45E + 01	-6.86E - 06	0.00E + 00	-6.86E - 06
M6	1.01E + 00	4.24E - 06	-1.52E - 07	0.00E + 00	-1.52E - 07
M7	9.96E - 01	4.26E + 01	8.37E - 07	0.00E + 00	8.37E - 07
M8	1.01E + 00	2.11E - 05	1.24E - 07	0.00E + 00	1.24E - 07

Tabelle 4

[0046] Wie aus der Übersicht in Fig. 5 zu erkennen, wirkt sich die Ausgestaltung der Reflexbeschichtung als zentriert-rotationssymmetrisch, dezentriert-rotationssymmetrisch oder dezentriert-elliptisch insbesondere bei den Spiegeln M2, M5 und M7 aus, bei denen es sich um Spiegel mit einem großen Inzidenzwinkelbereich handelt. Bevorzugt wird bei Spiegeln mit einem Inzidenzwinkelbereich von Winkeln unterhalb von 5° bis 10° bis zu Winkeln oberhalb von 10° bis 15°. Beispielsweise kann der Inzidenzwinkelbereich von ca. 1° bis ca. 17° reichen. Gegenüber einer gradierten Reflexbeschichtung mit zentriert-rotationssymmetrischem Schichtdickenverlauf lässt sich die Reflektivität bei den Spiegeln M2, M5 und M7 über den Einsatz einer gradierten Reflexbeschichtung mit dezentriert-elliptischem oder dezentriert-rotationssymmetrischem Schichtdickenverlauf deutlich erhöhen.

[0047] Bemerkenswert ist, dass insbesondere bei den Spiegeln M2 und M5 mit einem dezentriert-elliptischen Schichtdickenverlauf eine bei sonst identischen Bedingungen eine höhere Reflektivität erreicht wird als mit einem dezentriert-rotationssymmetrischen Schichtdickenverlauf.

[0048] Da bei Objektiven für den Einsatz EUV-Bereich theoretisch erreichbaren Reflektivitäten nicht sehr hoch sind, was durch die recht hohe Anzahl von Spiegeln potenziert wird, ist die Gesamttransmission der Objektiv eine kritische Größe. Jede noch so kleine Reflektivitätserhöhung ist in diesem Kontext bereits von Vorteil. Die hier vorgestellten Projektionsobjektive mit mehreren Spiegeln, von denen mindestens ein Spiegel eine gradierte Reflexbeschichtung mit einem elliptischen, parabolischen oder hyperbolischen Schichtdickenverlauf aufweist, erlauben eine merkbare Reflektivitätserhöhung des jeweiligen Spiegels, was zu einer höheren Gesamttransmission des Projektionsobjektivs führt.

[0049] Es sei darauf hingewiesen, dass im hier diskutierten Ausführungsbeispiel sowie den Vergleichsbeispielen jeweils alle Spiegel eine gradierte Reflexbeschichtung mit einer bestimmten Schichtverlaufsgeometrie aufweisen. Ebenso können aber in einem Projektionsobjektiv sowohl Spiegel mit und ohne gradierten Reflexbeschichtung bzw. Spiegel mit gradierten Reflexbeschichtungen, aber jeweils unterschiedlichen Schichtverlaufsgeometrien vorgesehen sein. Ferner sei darauf hingewiesen, dass ein EUV-Projektionsobjektiv nicht nur genau acht Spiegel, sondern auch zwei, drei, vier, fünf, sechs, sieben oder neun, zehn oder mehr Spiegel aufweisen kann.

Bezugszeichenliste

1	Projektionslichtanlage
2	Lichtquelle
3	Abbildungslicht
4	Objektfeld
5	Objektebene
6	Beleuchtungsoptik
7	Projektionsoptik
8	Bildfeld
9	Bildebene
10	Reflexionsmaske
11	Substrat
12	Substrathalter
13	Strahlenbündel
14	Strahlenbündel
15	Einzelstrahlen
16	Hauptstrahlen
17	Pupillenebene
18	optische Achse
19	Durchgangsöffnung
20	Obskurationsblende
21	Pupillenebene
22	Zwischenbildebene
23	Zwischenbildebene
24	Abbildungsteilstrahl
25	Abbildungsteilstrahl
26	Kreuzungsbereich
M1–M8	Spiegel

Patentansprüche

1. Projektionsobjektiv (7) zur Abbildung eines in einer Objektebene (5) angeordneten Musters in eine Bildebene (9) mit Hilfe von elektromagnetischer Strahlung (3) aus dem extremen Ultraviolettbereich (EUV), wobei zwischen der Objektebene (5) und der Bildebene (9) mehrere mit Reflexbeschichtungen versehene, abbildende Spiegel (M1–M8) angeordnet sind und wobei mindestens einer der Spiegel (M1–M8) eine gradierte Reflexbeschichtung aufweist, **dadurch gekennzeichnet**, dass die gradierte Reflexbeschichtung einen elliptischen, parabolischen oder hyperbolischen Schichtdickenverlauf der Schichtdicke d in der x - y -Ebene hat, der durch

$$d(x, y) = c_1 + \begin{pmatrix} x - c_2 \\ y - c_3 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} c_6 & c_7/2 \\ c_7/2 & c_8 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - c_2 \\ y - c_3 \end{pmatrix}$$

beschrieben wird, wobei $c_1, c_2, c_3, c_6, c_7, c_8$ Koeffizienten sind.

2. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, bei dem die Spiegel (M1–M8) eine optische Achse (18) des Projektionsobjektivs (7) definieren, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Beschichtungsachse der gradierten Reflexbeschichtung mit elliptischem, parabolischen oder hyperbolischen Schichtdickenverlauf exzentrisch zur optischen Achse (18) des Projektionsobjektivs (7) angeordnet ist.

3. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Spiegel (M1–M8) derart ausgebildet und in Bezug zueinander angeordnet sind, dass jeder Spiegel (M1–M8) aus einem für den Spiegel (M1–M8) charakteristischen Inzidenzwinkelbereich bestrahlbar ist, wobei zumindest der Spiegel (M2, M5, M7) mit dem größten Inzidenzwinkelbereich eine gradierte Reflexbeschichtung mit elliptischem, parabolischen oder hyperbolischen Schichtdickenverlauf aufweist.

4. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass zwischen Objektebene (5) und Bildebene (9) mehr als fünf Spiegel (M1–M8) angeordnet sind.

5. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass alle Spiegel (M1–M8) koaxial zueinander angeordnet sind.

6. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Spiegel (M1–M8) derart ausgebildet und angeordnet sind, dass zwischen Objektebene (5) und Bildebene (9) ein Zwischenbild (22, 23) erzeugt wird.

Es folgen 5 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

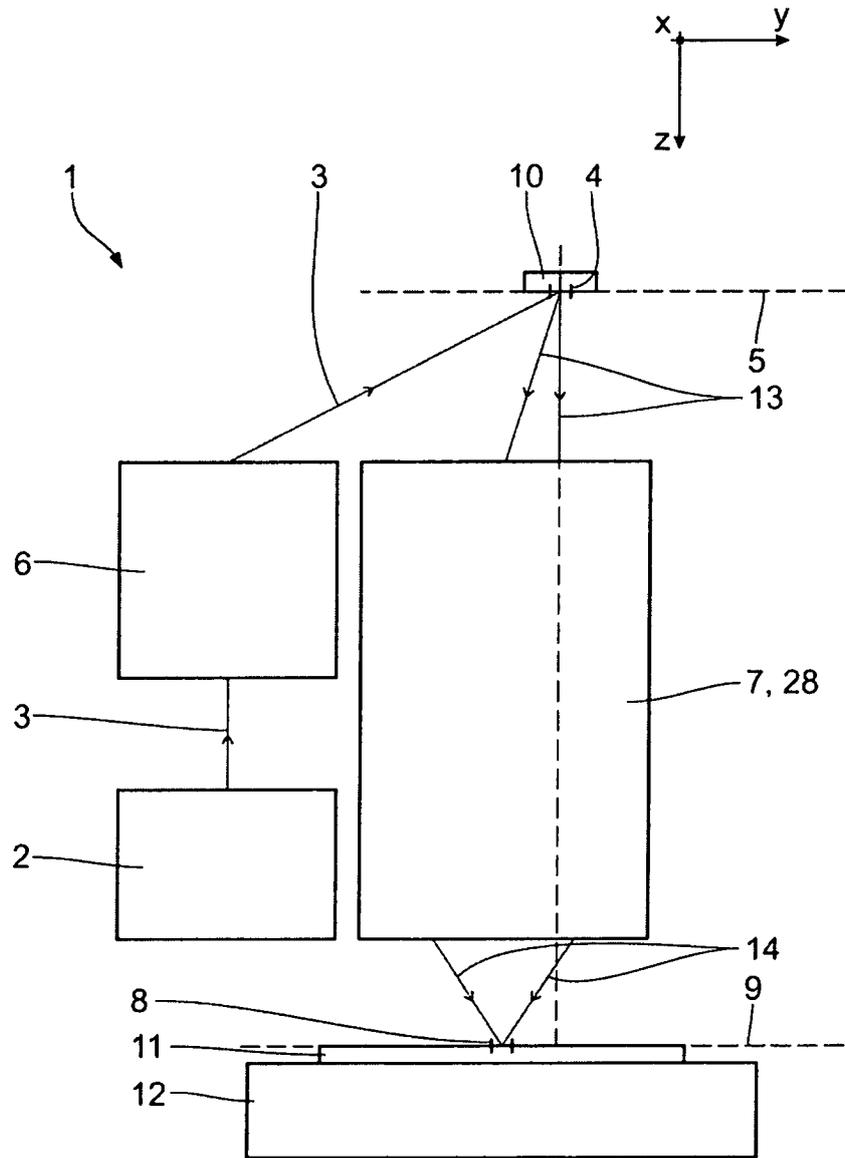


Fig. 1

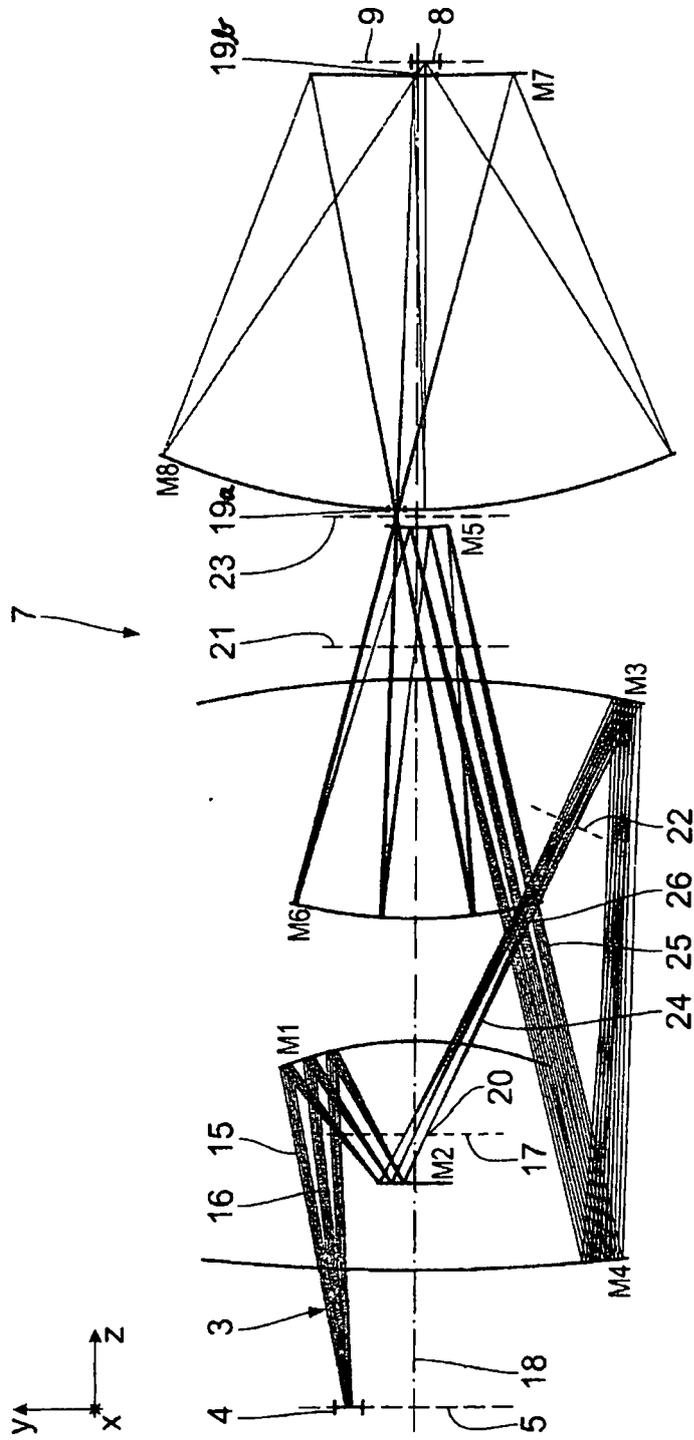
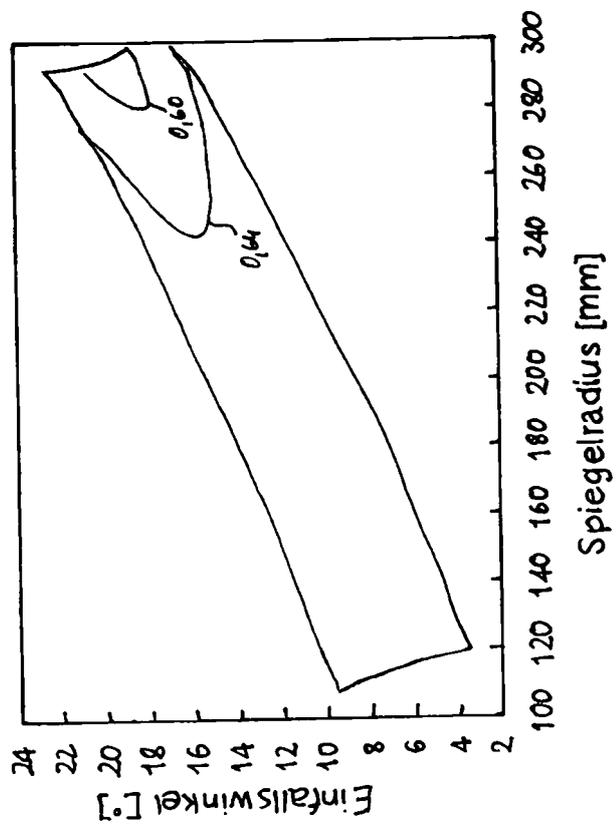


Fig. 2

Fig. 3



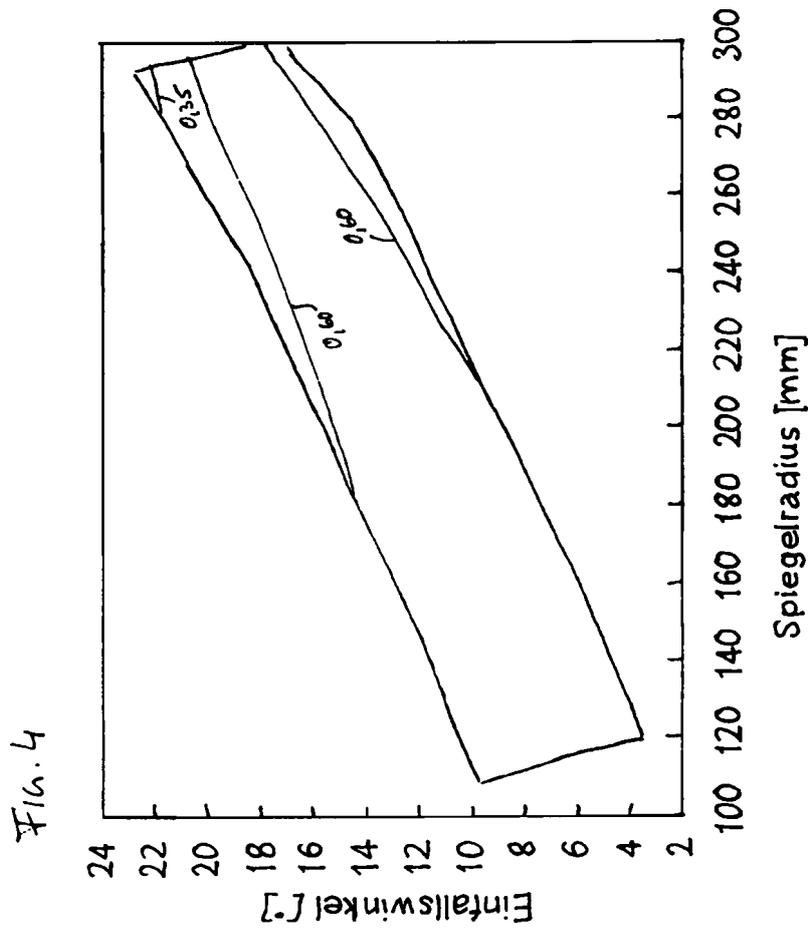


FIG. 5

