

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
14. Juni 2018 (14.06.2018)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 2018/104178 A1**

(51) Internationale Patentklassifikation:  
*G03F 7/20* (2006.01) *G02B 17/08* (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2017/081230

(22) Internationales Anmeldedatum:  
01. Dezember 2017 (01.12.2017)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:  
10 2016 224 400.0  
07. Dezember 2016 (07.12.2016) DE

(71) Anmelder: CARL ZEISS SMT GMBH [DE/DE]; Rudolf-Eber-Str. 2, 73447 Oberkochen (DE).

(72) Erfinder: ROCKTÄSCHEL, Martin; Zeppelinstraße 31, 73453 Abtsgmünd (DE). GRUPP, Michael; Mittelbach-

straße 25/1, 73430 Aalen (DE). WAGNER, Hendrik; Karolingerstraße 13, 73432 Aalen (DE).

(74) Anwalt: PATENTANWÄLTE RUFF, WILHELM, BEIER, DAUSTER & PARTNER MBB; Kronenstraße 30, 70174 Stuttgart (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(54) Title: CATADIOPTRIC PROJECTION LENS AND METHOD FOR PRODUCING SAME

(54) Bezeichnung: KATADIOPTRISCHES PROJEKTIONSOBJEKTIV UND VERFAHREN ZU SEINER HERSTELLUNG

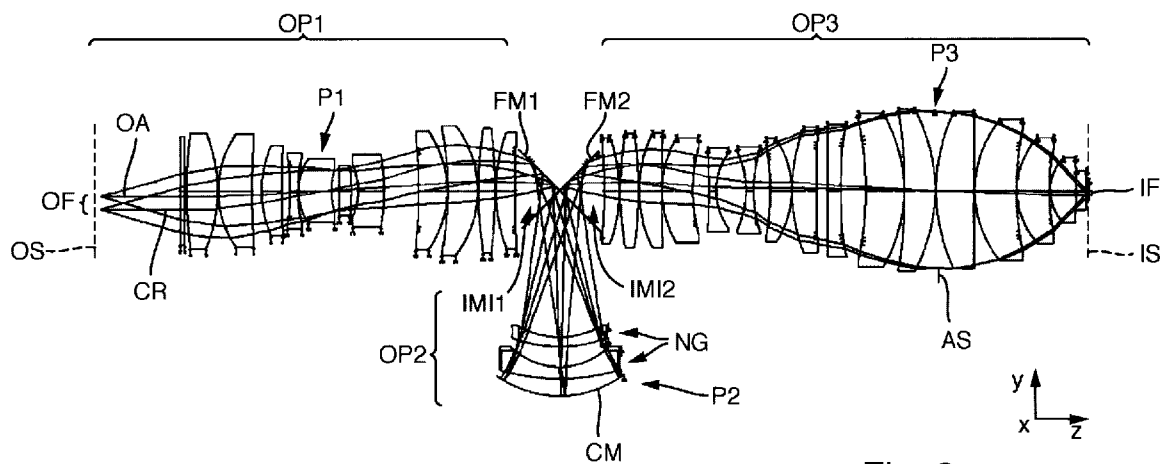


Fig. 2

(57) Abstract: A catadioptric projection lens (PO) is used to image a mask pattern arranged in an effective object field (OF) of an object plane (OS) of the projection lens into an effective image field arranged on the image plane (IS) of the projection lens using electromagnetic radiation with a working wavelength of  $\lambda < 260$  nm. The projection lens comprises a plurality of lenses and a plurality of mirrors comprising at least one concave mirror (CM), and the lenses and the mirrors define a projection beam path which runs from the object plane (OS) to the image plane (IS) and contains at least one pupil plane (P2). The mirrors comprise a first mirror (FM1) with a first mirror surface (MS1), which is arranged in the projection beam path between the object plane and the pupil plane (P2) in the optical vicinity of a first field plane that is optically conjugated to the object plane, and a second mirror (FM2) with a second mirror surface (MS2), which is arranged in the projection beam path between the pupil plane (P2) and the image plane in the optical vicinity of a second field plane that is optically conjugated to the first field plane. The first mirror surface (MS1) and/or the second mirror surface (MS2) is designed as a free-form surface.

(57) Zusammenfassung: Ein katadioptrisches Projektionsobjektiv (PO) dient zur Abbildung eines in einem effektiven Objektfeld (OF) einer Objektebene (OS) des Projektionsobjektivs angeordneten Musters einer Maske in ein in der Bildebene (IS) des Projektionsobjektivs



WO 2018/104178 A1

**(84) Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

**Veröffentlicht:**

- mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)
- vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderungen eingehen (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe h)

---

tivs angeordnetes effektives Bildfeld mittels elektromagnetischer Strahlung einer Arbeitswellenlänge  $\lambda < 260$  nm. Das Projektionsobjektiv umfasst eine Vielzahl von Linsen und einer Vielzahl von Spiegeln umfassend mindestens einen Konkavspiegel (CM), wobei die Linsen und Spiegel einen Projektionsstrahlengang definieren, welcher von der Objektebene (OS) zur Bildebene (IS) verläuft und mindestens eine Pupillenebene (P2) enthält. Die Spiegel umfassen einen ersten Spiegel (FM1) mit einer ersten Spiegelfläche (MS1), die im Projektionsstrahlengang zwischen der Objektebene und der Pupillenebene (P2) in optischer Nähe einer zur Objektebene optisch konjugierten ersten Feldebene angeordnet ist, sowie einen zweiten Spiegel (FM2) mit einer zweiten Spiegelfläche (MS2), die im Projektionsstrahlengang zwischen der Pupillenebene (P2) und der Bildebene in optischer Nähe einer zu der ersten Feldebene optisch konjugierten zweiten Feldebene angeordnet ist. Die erste Spiegelfläche (MS1) und/oder die zweite Spiegelfläche (MS2) als eine Freiformfläche gestaltet.

### Katadioptrisches Projektionsobjektiv und Verfahren zu seiner Herstellung

Diese Anmeldung bezieht sich auf die deutsche Patentanmeldung 10 2016 224 400.0 eingereicht am 7. Dezember 2016. Der Inhalt dieser Patentanmeldung wird hiermit durch ausdrückliche Bezugnahme zum Inhalt der vorliegenden Anmeldung gemacht.

#### ANWENDUNGSGEBIET UND STAND DER TECHNIK

Die Erfindung bezieht sich auf ein katadioptrisches Projektionsobjektiv zur Abbildung eines in einem Objektfeld einer Objektebene des Projektionsobjektivs angeordneten Musters einer Maske in ein in der Bildebene des Projektionsobjektivs angeordnetes Bildfeld mittels elektromagnetischer Strahlung einer Arbeitswellenlänge  $\lambda < 260$  nm sowie auf ein Verfahren zur Herstellung eines derartigen Projektionsobjektivs.

Zur Herstellung von Halbleiterbauelementen und anderen fein strukturierten Bauteilen, wie z.B. Photolithographiemasken, werden heutzutage überwiegend mikrolithographische Projektionsbelichtungsverfahren eingesetzt. Dabei werden Masken (Retikel) oder andere Mustererzeugungseinrichtungen verwendet, die das Muster einer abzubildenden Struktur tragen oder bilden, z.B. ein Linienmuster einer Schicht (Layer) eines Halbleiterbauelementes. Das Muster wird in einer Projektionsbelichtungsanlage zwischen einem Beleuchtungssystem und einem Projektionsobjektiv im Bereich der Objektebene des Projektionsobjektivs positioniert und mit einer vom Beleuchtungssystem bereit gestellten Beleuchtungsstrahlung beleuchtet. Die durch das Muster veränderte Strahlung läuft als Projektionsstrahlung entlang eines Projektionsstrahlengangs durch das Projektionsobjektiv, welches das Muster auf das zu belichtende Substrat in verkleinertem Maßstab abbildet. Die Oberfläche des Substrats ist in der zur Objektebene optisch konjugierten Bildebene des Projektionsobjektivs angeordnet. Das Substrat ist in der Regel mit einer strahlungsempfindlichen Schicht (Resist, Photolack) beschichtet.

Eines der Ziele bei der Entwicklung von Projektionsbelichtungsanlagen besteht darin, Strukturen mit zunehmend kleineren Abmessungen auf dem Substrat lithographisch zu erzeugen. Kleinere Strukturen führen z.B. bei Halbleiterbauelementen zu höheren Integrationsdichten, was sich im Allgemeinen günstig auf die Leistungsfähigkeit der hergestellten mikrostrukturierten Bauelemente auswirkt.

Die Größe der erzeugbaren Strukturen hängt maßgeblich vom Auflösungsvermögen des verwendeten Projektionsobjektivs ab und lässt sich einerseits durch Verringerung der Wellenlänge der für die Projektion verwendeten Projektionsstrahlung und andererseits durch Erhöhung der im Prozess genutzten bildseitigen numerischen Apertur NA des Projektionsobjektivs steigern. Hochauflösende katadioptrische Projektionsobjektive arbeiten heutzutage bei Arbeitswellenlängen von weniger als 260 nm im tiefen Ultraviolettbereich (DUV), insbesondere bei ca. 193 nm.

Um bei Wellenlängen aus dem tiefen Ultraviolettbereich (DUV) eine ausreichende Korrektur von Aberrationen (z.B. chromatischen Aberrationen, Bildfeldkrümmung) zu gewährleisten, werden meist katadioptrische Projektionsobjektive verwendet, welche sowohl mehrere transparente refraktive optische Elemente mit Brechkraft (Linsen), als auch einen oder mehrere reflektive Elemente mit Brechkraft, also einen oder mehrere gekrümmte Spiegel, ggf. auch einen oder mehrere ebene Spiegel, enthalten. Die hier betrachteten Projektionsobjektive weisen mindestens einen Konkavspiegel auf.

Es ist nicht einfach, einen Konkavspiegel in ein Projektionsobjektiv für mikrolithographische Projektionsbelichtungsverfahren zu integrieren, da er die Strahlung im Wesentlichen in die Richtung zurück reflektiert, aus der sie einfällt. Um einen Konkavspiegel so in ein optisches Abbildungssystem zu integrieren, dass weder Probleme mit Strahlvignettierung noch mit Pupillenobskuration auftreten, wurden u.a. katadioptrische Projektionsobjektive entwickelt, die ein vollständig außerhalb der optischen Achse angeordnetes Objektfeld verwenden (off-axis-Systeme). Die off-axis-Systeme können unterteilt werden in gefaltete Systeme mit geometrischer Strahlteilung mittels einem oder mehreren ebenen Umlenkspiegeln (Faltungsspiegeln) und in die sogenannten „In-Line-Systeme“, die eine allen optischen Elementen gemeinsame, gerade (ungefaltete) optische Achse haben.

Eine Gruppe katadioptrischer Projektionsobjektive mit geometrischer Strahlteilung und einem in der Nähe einer Pupillenebene angeordneten Konkavspiegel nutzt zwei in optischer Nähe einer Feldebene angeordnete ebene Umlenkspiegel, um den vom Objektfeld zum Konkavspiegel verlaufenden Teilstrahlengang von dem vom Konkavspiegel zum Bildfeld verlaufenden Teilstrahlengang zu separieren. Manche Projektionsobjektive mit Umlenkspiegeln bestehen aus zwei hintereinander geschalteten, abbildenden Objektivteilen und haben zwischen Objektebene und Bildebene ein einziges reelles Zwischenbild (siehe z.B. US 2006/0077366 A1). Bei anderen Typen sind drei hintereinander geschaltete, abbildende Objektivteile vorhanden, so dass genau zwei reelle Zwischenbilder erzeugt werden (siehe z.B. WO 2004/019128 A1 (entsprechend US 7,362,508 B2) oder EP 1 480 065 A2)

Die internationale Patentanmeldung mit Veröffentlichungsnummer WO 2005/069055 A2 zeigt Ausführungsbeispiele für katadioptrische In-Line-Systeme mit drei hintereinander geschalteten, abbildenden Objektivteilen und zwei jeweils optisch entfernt von einer Pupillenfläche angeordneten Konkavspiegeln.

Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten, das Bild eines Musters einer Maske auf das Substrat zu übertragen. Bei einer Variante wird das gesamte Muster im effektiven Objektfeld des Projektionsobjektivs platziert und in einer Belichtung auf das Substrat abgebildet, wobei sich die Maske und das Substrat während des Belichtungszeitintervalls nicht bewegen. Entsprechende Projektionsbelichtungsanlagen werden im Allgemeinen als „Steppersysteme“ bezeichnet. Bei alternativen Systemen werden zeitlich aufeinander folgend unterschiedliche Bereiche des zu übertragenden Musters auf das Substrat übertragen. Hierzu wird während eines Beleuchtungszeitintervalls eine Scan-Operation durchgeführt, bei der die Maske in der Objektebene relativ zum effektiven Objektfeld des Projektionsobjektivs bewegt wird, während das Substrat synchron mit der Bewegung der Maske im Bereich der Bildebene relativ zum effektiven Bildfeld des Projektionsobjektivs mit angepasster Bewegungsgeschwindigkeit in einer Scanrichtung bewegt wird. Projektionsbelichtungsanlagen, die für solche Scan-Operationen eingerichtet sind, werden im Allgemeinen als „Scannersysteme“ bezeichnet. Das effektive Objektfeld und das effektive Bildfeld sind in der Regel in Scanrichtung wesentlich schmaler als in der dazu senkrechten Cross-Scanrichtung.

Die Herstellung von integrierten Schaltkreisen erfolgt durch eine Abfolge von photolithografischen Strukturierungsschritten (Belichtungen) sowie nachfolgende Prozessschritte, wie Ätzen und Dotierung, des Substrats. Die einzelnen Belichtungen werden üblicherweise mit unterschiedlichen Masken bzw. unterschiedlichen Mustern durchgeführt. Damit der fertige Schaltkreis die gewünschte Funktion zeigt, ist es notwendig, dass die einzelnen photolithografischen Belichtungsschritte möglichst gut aufeinander abgestimmt sind, so dass die gefertigten Strukturen, zum Beispiel Kontakte, Leitungen und die Bestandteile von Dioden, Transistoren und anderen elektrisch funktionellen Einheiten, möglichst nah an das Ideal der geplanten Schaltkreise-Layouts herankommen.

Fertigungsfehler können u.a. dann entstehen, wenn die in aufeinanderfolgenden Belichtungsschritten erzeugten Strukturen nicht ausreichend genau aufeinander liegen, wenn also die Überdeckungsgenauigkeit nicht ausreichend ist. Die Überdeckungsgenauigkeit von Strukturen aus unterschiedlichen Fertigungsschritten eines photolithographischen Prozesses wird üblicherweise mit dem Begriff „Overlay“ bezeichnet. Dieser Begriff bezeichnet z.B. die Überdeckungsgenauigkeit zweier aufeinander folgender lithographischer Ebenen. Das Overlay

ist ein wichtiger Parameter bei der Fertigung von integrierten Schaltkreisen, da Ausrichtungsfehler jeder Art Fertigungsfehler wie Kurzschlüsse oder fehlende Verbindungen verursachen können und somit die Funktionsweise der Schaltung einschränken.

Auch bei Verfahren der Mehrfachbelichtung werden hohe Anforderungen an die Überdeckungsgenauigkeit aufeinanderfolgender Belichtungen gestellt. Beispielsweise wird beim Double Patterning-Verfahren (oder double-exposure-Verfahren) ein Substrat, beispielsweise ein Halbleiterwafer, zweimal hintereinander belichtet und der Fotoresist danach weiterverarbeitet. In einem ersten Belichtungsprozess wird z.B. eine normale Struktur mit geeigneter Strukturbreite projiziert. Für einen zweiten Belichtungsprozess wird eine zweite Maske verwendet, die eine andere Maskenstruktur hat. Beispielsweise können periodische Strukturen der zweiten Maske um eine halbe Periode gegenüber periodischen Strukturen der ersten Maske verschoben sein. Im allgemeinen Fall können insbesondere bei komplexeren Strukturen die Unterschiede zwischen den Layouts der beiden Masken groß sein. Durch Double Patterning kann eine Verkleinerung der Periode periodischer Strukturen am Substrat erreicht werden. Dies kann nur dann gelingen, wenn die Überdeckungsgenauigkeit der aufeinanderfolgenden Belichtungen ausreichend gut ist, wenn also die Overlay-Fehler einen kritischen Wert nicht übersteigen.

Unzureichender Overlay kann somit die Ausbeute (yield) an Gutteilen bei der Fertigung erheblich reduzieren, wodurch die Fertigungskosten pro Gutteil steigen.

Bei optischen Abbildungssystemen, die eine Vielzahl optischer Elemente aufweisen, ergeben sich die Gesamt-Abbildungsfehler (Gesamt-Aberrationen) aus einem Zusammenspiel der Fehler der einzelnen zur Abbildung beitragenden optischen Elemente. Da Fehlertoleranzen für Einzelkomponenten nicht beliebig reduziert werden können, ist in der Regel eine Feinjustage des Gesamtsystems erforderlich, um die Gesamtfehler des Systems zu minimieren. Ein solcher Justageprozess kann bei Hochleistungs-Projektionsobjektiven für die Mikrolithographie sehr aufwändig sein, da derartige Projektionsobjektive nicht selten mehr als zehn oder mehr als zwanzig optische Elemente umfassen. Ohne eine präzise Justage sind die erforderlichen Abbildungsleistungen mit Auflösungen im Submikrometerbereich bei diesen komplexen Systemen in der Regel nicht zu erreichen.

Ein Feinjustageprozess umfasst meist mehrere unterschiedliche Manipulationen an Linsen oder anderen optischen Elementen. Hierzu gehören laterale Verschiebungen der Elemente senkrecht zur optischen Achse, Verschiebungen von Elementen entlang der optischen Achse zur Änderungen von Luftabständen und/oder Drehungen von Elementen um die optische Achse. Es können auch Kippungen einzelner Elemente vorgesehen sein. Der Justagevorgang

wird unter Kontrolle einer geeigneten Aberrations-Vermessung des Abbildungssystems durchgeführt, um die Auswirkungen der Manipulationen überprüfen und Anweisungen für weitere Justageschritte ableiten zu können.

In dem Maße, wie die Anforderungen an die Abbildungsleistung der Projektionsobjektive immer höher werden, werden auch die Aberrationsspezifikationen für Projektionsobjektive immer weiter verschärft. Dies hat zur Folge, dass auch die Anforderungen an die Justageprozesse immer anspruchsvoller wurden, um die Spezifikationen unter wirtschaftlichen Bedingungen zu erzielen.

### AUFGABE UND LÖSUNG

Es ist eine Aufgabe der Erfindung, ein katadioptrisches Projektionsobjektiv der eingangs erwähnten Art bereitzustellen, das gegenüber herkömmlichen katadioptrischen Projektionsobjektiven dieser Art bei vertretbarem Aufwand für die Herstellung eine verbesserte Abbildungsleistung aufweist. Insbesondere sollen für kritische Kundenanwendungen neue Möglichkeiten der Aberrationsminimierung bereitgestellt werden, die dem Endnutzer signifikante Verbesserungen insbesondere bei der Erzeugung kritischer Layers bei der Halbleiterfertigung ermöglichen können.

Zur Lösung dieser Aufgabe stellt die Erfindung ein katadioptrisches Projektionsobjektiv mit den Merkmalen von Anspruch 1 bereit. Weiterhin wird ein Verfahren zur Herstellung eines katadioptrischen Projektionsobjektivs mit den Merkmalen von Anspruch 12 bereitgestellt. Vorteilhafte Weiterbildungen sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben. Der Wortlaut sämtlicher Ansprüche wird durch Bezugnahme zum Inhalt der Beschreibung gemacht.

Die hier betrachteten katadioptrischen Projektionsobjektive haben eine Vielzahl von Linsen und eine Vielzahl von Spiegeln, zu denen mindestens ein Konkavspiegel gehört. Die Linsen und Spiegel definieren einen Projektionsstrahlengang, welcher von der Objektebene zur Bildebene verläuft und mindestens eine Pupillenebene enthält. Zu den Spiegeln gehört ein erster Spiegel mit einer ersten Spiegelfläche, die im Projektionsstrahlengang zwischen der Objektebene und der Pupillenebene in optischer Nähe einer zur Objektebene optisch konjugierten ersten Feldebene angeordnet ist. Zu den Spiegeln gehört weiterhin ein zweiter Spiegel mit einer zweiten Spiegelfläche, die im Projektionsstrahlengang zwischen der Pupillenebene und der Bildebene in optischer Nähe einer zur ersten Feldebene optisch konjugierten zweiten Feldebene angeordnet ist. Die beiden Spiegel (erster Spiegel und zweiter Spiegel) zeichnen sich somit unter anderem dadurch aus, dass (i) beide Spiegel relativ feldnah (in optischer Nähe

einer Feldebene bzw. optisch entfernt von einer Pupillenebene) angeordnet sind und dass (ii) entlang des Projektionsstrahlengangs zwischen den Spiegeln eine Pupillenebene liegt.

Die Erfinder haben erkannt, dass diese besonderen Bedingungen genutzt werden können, um bei vertretbarem Aufwand während des Justageprozesses systematisch Projektionsobjektive aufzubauen, die sich durch ein sehr geringes Restaberrationsniveau auszeichnen. Insbesondere wurde erkannt, dass unter diesen Bedingungen höhere Ordnungen der Feldverläufe von Aberrationen beeinflusst werden können, die mit anderen Justagemaßnahmen nicht oder nur mit sehr hohem Aufwand angegriffen bzw. korrigiert werden können. Dies wird dadurch erreicht, dass die erste Spiegelfläche und/oder die zweite Spiegelfläche als eine Freiformfläche gestaltet ist.

Der Begriff „Freiformfläche“ im Sinne dieser Anmeldung bezeichnet eine nicht-rotationssymmetrische Fläche, die von einer bestangepassten rotationssymmetrisch gekrümmten Bezugsfläche oder einer ebenen Bezugsfläche an einer oder mehreren Stellen um einen Abweichungsbetrag abweicht, der außerhalb der Fertigungstoleranzen liegt. Eine Freiformfläche hat somit eine signifikante und gewollte Abweichung von einer rotationssymmetrischen Gestalt. Eine ebene Gestalt wird hierbei auch als eine rotationssymmetrische Gestalt betrachtet. Die Oberflächenform der ersten Spiegelfläche und/oder der zweiten Spiegelfläche kann gezielt so gestaltet werden, dass bestimmte Aberrationen, welche sich aufgrund des optischen Designs und/oder aufgrund von Fertigungsfehlern ergeben können, teilweise oder vollständig kompensiert werden können. Diejenigen Aberrationen, die primär beeinflusst werden sollen, werden in dieser Anmeldung auch als Ziel-Aberrationen bezeichnet.

Die erste Spiegelfläche und/oder die zweite Spiegelfläche kann somit mit einer nicht-rotationssymmetrischen Asphäre bzw. einer nicht-ebenen Fläche in Form einer Freiformfläche versehen werden. Da diese Gestaltung der Fläche vor allem der Korrektur einer Aberration oder mehrerer Aberrationen dient, kann sie auch als „Korrekturasphäre“ bezeichnet werden. Eine „Korrekturasphäre“ ist von einer sogenannten „Designasphäre“ zu unterscheiden. Während die Form einer Designasphäre im Rahmen des ursprünglichen optischen Designs festgelegt wird und häufig eine Rotationssymmetrie aufweist, ergibt sich die Gestalt einer Korrekturasphäre typischerweise für jedes einzelne Projektionsobjektiv individuell, zum Beispiel aufgrund von Messungen während der Justage. Der Abweichungsbetrag, um den eine Freiformfläche von der bestangepassten rotationssymmetrisch gekrümmten oder ebenen Bezugsfläche abweicht, liegt typischerweise im Bereich einiger Nanometer (nm), beispielsweise im Bereich von ca. 5 nm bis ca. 100 nm, gegebenenfalls aber auch darüber oder darunter.

Aufgrund der Anordnung der ersten Spiegelfläche und der zweiten Spiegelfläche in optischer Nähe einer nächstliegenden Feldebene können mithilfe einer Freiformfläche an einem der Spiegel oder beiden Spiegeln besonders gut solche Aberrationen beeinflusst werden, deren Ausmaß innerhalb des Bildfeldes von Feldpunkt zu Feldpunkt unterschiedlich sein kann.

Insbesondere kann es so sein, dass die Abbildungsqualität des (noch nicht korrigierten) Ausgangs-Projektionsobjektivs durch eine höhere Ordnung der Feldvariation (bzw. eine mehrwellige Variation) der Größe mindestens einer Ziel-Aberration in einer Feldrichtung des Bildfelds charakterisierbar ist, wobei die Freiformfläche von einer bestangepassten ebenen oder rotationssymmetrischen Bezugsfläche an einer oder mehreren Positionen abweicht und eine örtliche Verteilung der Abweichungen derart eingestellt ist, dass diese Variation im Vergleich zu einer Bezugskonfiguration, in der die Spiegelfläche die Gestalt der bestangepassten Bezugsfläche aufweist, reduziert ist. Der Begriff „mehrwellige Variation“ beschreibt hierbei, dass das Ausmaß der Aberration in der betrachteten Feldrichtung mehrere lokale Minima und mehrere lokale Maxima aufweist. Je höher die Anzahl der lokalen Extrema ist, desto höher ist die Feldvariation über das Bildfeld.

Die Variation der Größe der Ziel-Aberration kann beispielsweise durch das sogenannte Peak-to-Valley-Verhältnis (PV-Wert) quantifiziert werden, das als Differenz zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Wert der Ziel-Aberration entlang der Feldrichtung des Bildfelds definiert ist. Die mindestens eine Freiformfläche an einer feldnahen Spiegelfläche kann also so gestaltet sein, dass eine Reduzierung höherer Ordnungen von Feldverläufen von Aberrationen erreicht wird. Insbesondere solche höheren Ordnungen von Feldverläufen können mit Korrekturmaßnahmen, insbesondere Korrekturasphären, an anderen Positionen im Projektionsstrahlengang nicht oder nur schlecht angegriffen werden, insbesondere wenn diese keine optische Flächen in feldnahen Positionen aufweisen.

Die Ordnung der Zielaberrationskorrekturen hängt hierbei von der Ortsfrequenz der in einer Richtung aufeinander folgenden Berge und Täler auf der Freiformfläche ab.

Man kann mithilfe von Symmetriebetrachtungen zwischen geraden Aberrationen und ungeraden Aberrationen unterscheiden. Als Kriterium kann die azimutale Zähligkeit eines Pupillenzernikes genutzt werden, also die Zähligkeit einer Symmetrie bezüglich des Zentrums der Pupille bei einer Rotation in Umfangsrichtung. Ist die azimutale Zähligkeit eines Pupillenzernikes gerade (z.B. zweizählig oder vierzählig), so wird dies im Rahmen dieser Anmeldung als gerade Aberration bezeichnet. Ist die azimutale Zähligkeit eines Pupillenzernikes ungerade (z.B. dreizählig), so wird dies als ungerade Aberration bezeichnet.

Insbesondere können für eine Overlay-Korrektur die ungeraden Pupillenzernikes angegriffen werden. Das Overlay kann als vom Beleuchtungssetting abhängige Linearkombination ungeradzahligter Pupillenzernikes beschrieben werden. Zu den ungeraden Ziel-Aberrationen, die besonders gut mithilfe von als Freiformflächen gestalteten Spiegelflächen feldnaher Spiegel korrigierbar sind, zählen unter anderem der Wellenfrontkipp (beschreibbar durch Zernike-Koeffizienten  $Z_2 / Z_3$ ), die Koma ( $Z_7 / Z_8$ ), die Dreiwelligkeit ( $Z_{10} / Z_{11}$ ), die Koma höherer Ordnung ( $Z_{14} / Z_{15}$ ) etc.

Dadurch, dass zwischen der ersten Spiegelfläche und der zweiten Spiegelfläche eine Pupillenebene liegt, ist es unter Umständen möglich, eine Klasse von Aberrationen bzw. Störungen gezielt in einer gewünschten Richtung zu beeinflussen, ohne gleichzeitig unerwünschte Aberrationen bzw. Störungen auf eine anderen Klasse zu bewirken. Insbesondere können gerade Aberrationen, wie z.B. Defokus, und ungerade Aberrationen, wie z.B. Verzeichnung (Distortion), unabhängig voneinander angegriffen werden. Beispielsweise kann die Korrektur so erfolgen, dass auf dem vor der Pupillenebene liegenden Spiegel gerade Störungen (z.B. Defokus) und ungerade Störungen (z.B. Distortion) mit gleichen Vorzeichen korrigiert werden. Auf dem anderen Spiegel hinter der Pupillenebene können dann entweder gerade Störungen (z.B. Defokus) oder ungerade Störungen (z.B. Distortion) angegriffen werden, da sich das Vorzeichen einer der beiden Größen ändert. Damit kann je eine Störungsart korrigiert werden, während die andere davon weitgehend unbeeinflusst bleibt. Beispielsweise kann also die für das Overlay relevante Verzeichnung (Distortion) verbessert werden, ohne dabei die geraden Aberration zu verschlechtern. Umgekehrt kann man die geraden Aberration verbessern, ohne dabei die Verzeichnungsfehler zu verschlechtern. Prinzipiell kann z.B. jede beliebige Linearkombination aus Verzeichnungsaberration und geraden Aberrationen durch Ändern der Amplituden der Maxima und Minima der Freiformflächen eingestellt werden. Bei Bedarf kann bei entsprechender Auslegung der Freiformfläche(n) mit relativ geringen Deformationen der Freiformflächen ein relativ starker Hub bei der Reduzierung des adressierten Aberrationsniveaus erzielt werden.

Es ist möglich, dass eine Korrektur einer oder mehrerer adressierter Ziel-Aberrationen erreicht werden kann, wenn nur eine der Spiegelflächen (erste Spiegelfläche oder zweite Spiegelfläche) als Freiformfläche ausgestaltet ist, während die andere Spiegelfläche (zweite Spiegelfläche oder erste Spiegelfläche) eine rotationssymmetrische oder ebene Gestalt hat. Mit dem Einsatz von nur einem Spiegel als Korrekturasphäre kann jedoch das Korrekturpotential nicht voll genutzt werden.

Wird dagegen gemäß einer Weiterbildung die erste Spiegelfläche als erste Freiformfläche und die zweite Spiegelfläche als zweite Freiformfläche gestaltet, so ergeben sich weitere Freiheitsgrade bei der gezielten Korrektur von Aberrationen. Es können unerwünschte durch die Korrektur mit nur einem Spiegel induzierte Kollateral-Aberrationen durch den anderen Spiegel effektiv korrigiert werden. Durch den Einsatz von zwei Spiegeln mit (in der Regel unterschiedlich gestalteten) Freiformflächen erhöht sich damit das Korrekturpotential.

Vorzugsweise weisen die erste Freiformfläche und die zweite Freiformfläche signifikant unterschiedliche Gestalt auf.

Insbesondere kann die Gestalt der ersten Freiformfläche derart an die Gestalt der zweiten Freiformfläche angepasst sein, dass die erste Freiformfläche eine angestrebte Veränderung mindestens einer Ziel-Aberration sowie eine unerwünschte Veränderung mindestens einer Rest-Aberration erzeugt und die zweite Freiformfläche so gestaltet ist, dass die durch die erste Freiformfläche verursachte Veränderung der Rest-Aberration wenigstens teilweise kompensiert wird. Somit kann die unerwünschte Generierung parasitärer Rest-Aberrationen teilweise oder vollständig unterdrückt werden, so dass im Wesentlichen die gewünschte Wirkung auf die adressierte Ziel-Aberration verbleibt. Vorzugsweise wird gleichzeitig die Ziel-Aberration in der gewünschten Richtung beeinflusst, so dass eine Verstärkung der Wirkung auf die Ziel-Aberration eintritt.

Es ist möglich, dass zwischen der ersten Spiegelfläche und der ihr nächsten ersten Feldebene und/oder zwischen der zweiten Spiegelfläche und der ihr nächsten zweiten Feldebene ein optisches Element liegt. Eine besonders gut einstellbare Korrekturwirkung lässt sich jedoch dann erreichen, wenn zwischen der ersten Spiegelfläche und der ersten Feldebene kein optisches Element angeordnet ist und/oder wenn zwischen der zweiten Spiegelfläche und der zweiten Feldebene kein optisches Element angeordnet ist. Diese Anordnung ohne zwischengeschaltetes optisches Element wird auch als „unmittelbare Nähe“ bezeichnet.

Bei bevorzugten Ausführungsformen sind die erste Spiegelfläche und/oder die zweite Spiegelfläche derart im Projektionsstrahlengang angeordnet, dass an der ersten Spiegelfläche und/oder an der zweiten Spiegelfläche ein Subaperturverhältnis SAR dem Betrag nach kleiner als 0.3 ist, insbesondere kleiner als 0.2. Dadurch kann erreicht werden, dass unterschiedliche Feldpunkte weitgehend unabhängig voneinander durch die Gestaltung der Freiformflächen beeinflusst werden können.

Die Vorteile der beanspruchten Erfindung und ihrer Varianten können bei unterschiedlichen Typen von Projektionsobjektiven genutzt werden. Insbesondere kann das katadioptrische Projektionsobjektiv ein vollständig außerhalb der optischen Achse angeordnetes Objektfeld verwenden, also als Off-axis-System ausgelegt sein.

Bei manchen Ausführungsformen hat das Projektionsobjektiv einen ersten Objektivteil zur Abbildung des effektiven Objektfelds in ein erstes reelles Zwischenbild, einen zweiten Objektivteil zur Erzeugung eines zweiten reellen Zwischenbilds mit der von dem ersten Objektivteil kommenden Strahlung, sowie einen dritten Objektivteil zur Abbildung des zweiten reellen Zwischenbilds in die Bildebene, wobei das erste reelle Zwischenbild in optischer Nähe der ersten Spiegelfläche und das zweite reelle Zwischenbild in optischer Nähe der zweiten Spiegelfläche liegt. Derartige dreigliedrige katadioptrische Systeme mit genau zwei Zwischenbildern haben sich als besonders geeignet zur Erzielung höchster Auflösungen in einem für die Lithografie geeigneten großen effektiven Bildfeld erwiesen.

Dabei kann es so sein, dass der erste Spiegel und der zweite Spiegel als Planspiegel ausgelegt sind und in optischer Nähe der zwischen der ersten Feldebene und der zweiten Feldebene liegenden Pupillenebene ein Konkavspiegel angeordnet ist. In diesem Fall ist die bestangepasste Bezugsfläche des ersten Spiegels und des zweiten Spiegels jeweils eine Ebene. Die Planspiegel werden als Umlenkspiegel genutzt, um den vom Objektfeld zum Konkavspiegel verlaufenden Teilstrahlengang von dem vom Konkavspiegel zum Bildfeld verlaufenden Teilstrahlengang zu separieren. Beispiele derartiger gefalteter Projektionsobjektive mit genau zwei reellen Zwischenbildern finden sich zum Beispiel in der WO 2004/019128 A1 (entsprechend US 7,362,508 B2) oder der EP 1 480 065 A2 oder in der WO 2006/121008 A1.

Es gibt auch Ausführungsbeispiele, bei denen der erste Spiegel und der zweite Spiegel jeweils als Konkavspiegel ausgelegt sind. Beispielsweise offenbart die internationale Patentanmeldung mit Veröffentlichungsnummer WO 2005/069055 A2 Ausführungsbeispiele für katadioptrische In-line-Systeme mit drei hintereinander geschalteten, abbildenden Objektivteilen und zwei jeweils optisch entfernt von einer Pupillenebene angeordneten, relativ feldnahen Konkavspiegeln, die als erster bzw. zweiter Spiegel dienen können. Es ist auch möglich, dass die erste Spiegelfläche und/oder der zweite Spiegelfläche konvex gekrümmt ist.

Manche Projektionsobjektive mit zwei ebenen Umlenkspiegeln bestehen auch aus nur zwei hintereinandergeschalteten abbildenden Objektivteilen und haben zwischen Objektebene und Bildebene nur ein einziges reelles Zwischenbild (siehe zum Beispiel US 2006/0077366 A1).

Auch hier können die Umlenkspiegel (einer oder beide) mit Korrekturasphären in Form von Freiformflächen versehen werden. Einer der Spiegel kann dann in optischer Nähe der Objektebene angeordnet sein, während der andere Spiegel in optischer Nähe des Zwischenbildes angeordnet ist.

Bei einem Verfahren zur Herstellung eines katadioptrischen Projektionsobjektivs wird zunächst ein Ausgangs-Projektionsobjektiv mit einem optischen Aufbau gemäß dem optischen Design aufgebaut und in herkömmlicher Weise justiert. Dabei und/oder danach erfolgt eine Messung der Abbildungsqualität des Projektionsobjektivs zur Bestimmung einer örtlichen Verteilung der Größe mindestens einer Ziel-Aberration in dem effektiven Bildfeld. Anschließend wird die erste Spiegelfläche und/oder die zweite Spiegelfläche als Korrekturfläche ausgewählt und die erste Spiegelfläche und/oder die zweite Spiegelfläche wird so verändert, dass die erste Spiegelfläche und/oder die zweite Spiegelfläche als eine (nicht-rotationssymmetrische) Freiformfläche gestaltet ist in der Weise, dass ein Niveau der Ziel-Aberration im effektiven Bildfeld im Vergleich zu dem Niveau bei dem Ausgangs-Projektionsobjektiv reduziert wird.

Zur Bestimmung der Abbildungsqualität kann die Wellenfront im effektiven Bildfeld oder in einer dazu optisch konjugierten Ebene des Abbildungssystems zur ortsauflösenden Bestimmung von Wellenfrontfehlern vermessen werden. Basierend darauf kann die nötige Änderung der Topografie der mindestens einen als Freiformfläche zu gestaltenden Spiegelfläche errechnet werden. Zur Erzielung der gewünschten Veränderung der Gestalt der ersten Spiegelfläche und/oder der zweiten Spiegelfläche wird der erste Spiegel und/oder der zweite Spiegel vorzugsweise aus dem Projektionsobjektiv ausgebaut, so dass er außerhalb bearbeitet werden kann. An dem ausgebauten Spiegel findet dann eine ortsauflösende Bearbeitung der Spiegelfläche zur Erzeugung der berechneten Topografie der Freiformfläche statt. Vorzugsweise wird vor der ortsauflösenden Bearbeitung die reflektive Beschichtung des Spiegelsubstrats entfernt und die zum Tragen der reflektiven Beschichtung vorgesehene Substratoberfläche wird dann ortsauflösend mit einem materialabtragenden Verfahren, beispielsweise mittels Ionenstrahlbearbeitung, materialabtragend bearbeitet. Danach wird in einem Beschichtungsschritt wieder eine reflektive Beschichtung auf die in ihrer Gestalt veränderte Substratoberfläche aufgebracht. Schließlich erfolgt ein lagerichtiges Einbauen des mindestens einen mit einer Freiformfläche versehenen Spiegels an seiner ursprünglichen Position im Projektionsobjektiv.

Durch die effektive Korrektur unter anderem der höheren Feldverläufe von Aberrationen ergeben sich für kritische Kundenanwendungen neue Möglichkeiten der

Aberrationsminimierung, die dem Endnutzer signifikante Verbesserungen insbesondere bei der Erzeugung kritischer Layers bei der Halbleiterfertigung ermöglichen können.

Die besondere Gestaltung der Spiegelflächen des ersten Spiegels und/oder des zweiten Spiegels können bei der ursprünglichen Herstellung des Projektionsobjektivs vor der Erstauslieferung an einen Kunden durchgeführt werden. Es ist auch möglich, eine entsprechende Korrektur nach einer gewissen Nutzungsdauer des Projektionsobjektivs durchzuführen. Dies kann beispielsweise zweckmäßig sein, wenn nach längerer Nutzungsdauer das Aberrationsniveau kritischer Aberrationen zunimmt und/oder wenn bei Einführung neuer Prozesse die Spezifikationen für kritische Aberrationen verschärft werden.

#### KURZBESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

Weitere Vorteile und Aspekte der Erfindung ergeben sich aus den Ansprüchen und aus der nachfolgenden Beschreibung von bevorzugten Ausführungsbeispielen der Erfindung, die nachfolgend anhand der Figuren erläutert sind.

Fig. 1 zeigt ein Ausführungsbeispiel einer Mikrolithografie-Projektionsbelichtungsanlage;

Fig. 2 zeigt einen schematischen Linsenschnitt einer Ausführungsform eines katadioptrischen Projektionsobjektivs;

Fig. 3A bis 3F zeigen Aberrationsdiagramme, die den Korrektionszustand der Wellenfront im effektiven Bildfeld des Projektionsobjektivs vor und nach Spiegelasphärisierung anhand von Zernike-Fingerprints repräsentieren;

Fig. 4A bis 4F zeigen Aberrationsdiagramme, die den Korrektionszustand der Wellenfront im effektiven Bildfeld des Projektionsobjektivs vor und nach Spiegelasphärisierung anhand von Fading-Fingerprints repräsentieren;

Fig. 5A und 5B repräsentieren die Korrektur der Oberflächentopografie des ersten Umlenkspiegels (Fig. 5A) und des zweiten Umlenkspiegels (Fig. 5B) im ausgeleuchteten Bereich (footprint) nach Erzeugung der Freiformfläche anhand von Linien gleicher Deformation.

## DETAILLIERTE BESCHREIBUNG DER AUSFÜHRUNGSBEISPIELE

In Fig. 1 ist ein Beispiel einer Mikrolithografie-Projektionsbelichtungsanlage WSC gezeigt, die bei der Herstellung von Halbleiterbauelementen und anderen feinstrukturierten Bauteilen einsetzbar ist und zur Erzielung von Auflösungen bis zu Bruchteilen von Mikrometern mit Licht bzw. elektromagnetischer Strahlung aus dem tiefen Ultraviolettbereich (DUV) arbeitet. Als primäre Strahlungsquelle bzw. Lichtquelle LS dient ein ArF-Excimer-Laser mit einer Arbeitswellenlänge  $\lambda$  von ca. 193 nm. Andere UV-Laserlichtquellen, beispielsweise F<sub>2</sub>-Laser mit 157 nm Arbeitswellenlänge oder ArF-Excimer-Laser mit 248 nm Arbeitswellenlänge sind ebenfalls möglich.

Ein der Lichtquelle LS nachgeschaltetes Beleuchtungssystem ILL erzeugt in seiner Austrittsfläche ES ein großes, scharf begrenztes und im Wesentlichen homogen ausgeleuchtetes Beleuchtungsfeld, das an die Telezentrie-Erfordernisse des im Lichtweg dahinter angeordneten Projektionsobjektivs PO angepasst ist. Das Beleuchtungssystem ILL hat Einrichtungen zur Einstellung unterschiedlicher Beleuchtungsmodi (Beleuchtungs-Settings) und kann beispielsweise zwischen konventioneller on-axis-Beleuchtung mit unterschiedlichem Kohärenzgrad  $\sigma$  und außeraxialer Beleuchtung (off-axis illumination) umgeschaltet werden. Die außeraxialen Beleuchtungsmodi umfassen beispielsweise eine annulare Beleuchtung oder eine Dipolbeleuchtung oder eine Quadrupolbeleuchtung oder eine andere multipolare Beleuchtung. Der Aufbau geeigneter Beleuchtungssysteme ist an sich bekannt und wird daher hier nicht näher erläutert. Die Patentanmeldung US 2007/0165202 A1 (entsprechend WO 2005/026843 A2) zeigt Beispiele für Beleuchtungssysteme, die im Rahmen verschiedener Ausführungsformen genutzt werden können.

Diejenigen optischen Komponenten, die das Licht des Lasers LS empfangen und aus dem Licht Beleuchtungsstrahlung formen, die auf das Retikel M gerichtet ist, gehören zum Beleuchtungssystem ILL der Projektionsbelichtungsanlage.

Hinter dem Beleuchtungssystem ist eine Einrichtung RS zum Halten und Manipulieren der Maske M (Retikel) so angeordnet, dass das am Retikel angeordnete Muster in der Objektebene OS des Projektionsobjektivs PO liegt, welche mit der Austrittsebene ES des Beleuchtungssystems zusammenfällt und hier auch als Retikelebene OS bezeichnet wird. Die Maske ist in dieser Ebene zum Scannerbetrieb in einer Scan-Richtung (y-Richtung) senkrecht zur optischen Achse OA (z-Richtung) mit Hilfe eines Scanantriebs bewegbar.

Hinter der Retikelebene OS folgt das Projektionsobjektiv PO, das als Reduktionsobjektiv wirkt und ein Bild des an der Maske M angeordneten Musters in reduziertem Maßstab, beispielsweise im Maßstab 1:4 ( $|\beta| = 0.25$ ) oder 1:5 ( $|\beta| = 0.20$ ), auf ein mit einer Fotoresistschicht bzw. Fotolackschicht belegtes Substrat W abbildet, dessen lichtempfindliche Substratoberfläche SS im Bereich der Bildebene IS des Projektionsobjektivs PO liegt.

Das zu belichtende Substrat, bei dem es sich im Beispielsfall um einen Halbleiterwafer W handelt, wird durch eine Einrichtung WS gehalten, die einen Scannerantrieb umfasst, um den Wafer synchron mit dem Retikel M senkrecht zur optischen Achse OA in einer Scanrichtung (y-Richtung) zu bewegen. Die Einrichtung WS, die auch als „Waferstage“ bezeichnet wird, sowie die Einrichtung RS, die auch als „Retikelstage“ bezeichnet wird, sind Bestandteil einer Scannereinrichtung, die über eine Scan-Steuereinrichtung gesteuert wird, welche bei der Ausführungsform in die zentrale Steuereinrichtung CU der Projektionsbelichtungsanlage integriert ist.

Das vom Beleuchtungssystem ILL erzeugte Beleuchtungsfeld definiert das bei der Projektionsbelichtung genutzte effektive Objektfeld OF. Dieses ist im Beispielsfall rechteckförmig, hat eine parallel zur Scanrichtung (y-Richtung) gemessene Höhe  $A^*$  und eine senkrecht dazu (in x-Richtung) gemessene Breite  $B^* > A^*$ . Das Aspektverhältnis  $AR = B^*/A^*$  liegt in der Regel zwischen 2 und 10, insbesondere zwischen 3 und 8. Das effektive Objektfeld liegt mit Abstand in y-Richtung neben der optischen Achse (off-axis Feld bzw. außeraxiales Feld). Das zum effektiven Objektfeld optisch konjugierte effektive Bildfeld IF in der Bildfläche IS hat die gleiche Form und das gleiche Aspektverhältnis zwischen Höhe B und Breite A wie das effektive Objektfeld, die absolute Feldgröße ist jedoch um den Abbildungsmaßstab  $\beta$  des Projektionsobjektivs reduziert, d.h.  $A = |\beta| A^*$  und  $B = |\beta| B^*$ .

Wenn das Projektionsobjektiv als Immersionsobjektiv ausgelegt ist und betrieben wird, dann wird im Betrieb des Projektionsobjektivs eine dünne Schicht einer Immersionsflüssigkeit durchstrahlt, die sich zwischen der Austrittsfläche des Projektionsobjektivs und der Bildebene IS befindet. Im Immersionsbetrieb sind bildseitige numerische Aperturen  $NA > 1$  möglich. Auch eine Konfiguration als Trockenobjektiv ist möglich, hier ist die bildseitige numerische Apertur auf Werte  $NA < 1$  beschränkt.

Fig. 2 zeigt einen schematischen meridionalen Linsenschnitt einer Ausführungsform eines katadioptrischen Projektionsobjektivs PO mit ausgewählten Strahlbündeln zur Verdeutlichung des Abbildungsstrahlengangs der im Betrieb durch das Projektionsobjektiv verlaufenden Projektionsstrahlung. Das Projektionsobjektiv ist als verkleinernd wirkendes Abbildungssystem

dafür vorgesehen, ein in seiner Objektebene OS angeordnetes Muster einer Maske in reduziertem Maßstab, beispielsweise im Maßstab 4:1, auf seine parallel zur Objektebene ausgerichtete Bildebene IS abzubilden. Dabei werden zwischen Objektebene und Bildebene genau zwei reelle Zwischenbilder IMI1, IMI2 erzeugt. Ein erster, ausschließlich mit transparenten optischen Elementen aufgebauter und daher refraktiver (dioptrischer) Objektivteil OP1 ist so ausgelegt, dass das Muster der Objektebene im Wesentlichen ohne Größenänderung in das erste Zwischenbild IMI1 abgebildet wird. Ein zweiter, katadioptrischer Objektivteil OP2 bildet das erste Zwischenbild IMI1 auf das zweite Zwischenbild IMI2 im Wesentlichen ohne Größenänderung ab. Ein dritter, refraktiver Objektivteil OP3 ist dafür ausgelegt, das zweite Zwischenbild IMI2 mit starker Verkleinerung in die Bildebene IS abzubilden.

Zwischen der Objektebene und dem ersten Zwischenbild, zwischen dem ersten und dem zweiten Zwischenbild sowie zwischen dem zweiten Zwischenbild und der Bildebene liegen jeweils Pupillenflächen bzw. Pupillenebenen P1, P2, P3 des Abbildungssystems dort, wo der Hauptstrahl CR der optischen Abbildung die optische Achse OA schneidet. Im Bereich der Pupillenfläche P3 des dritten Objektivteils OP3 kann die Aperturblende AS des Systems angebracht sein. Die Pupillenfläche P2 innerhalb des katadioptrischen zweiten Objektivteils OP2 liegt in unmittelbarer Nähe eines Konkavspiegels CM.

Das in Fig. 2 gezeigte Ausführungsbeispiel entspricht bezüglich seines optischen Aufbaus (ohne Freiformflächen an Umlenkspiegeln) dem Ausführungsbeispiel aus Fig. 6 der WO 2006/121008 A1. Der Offenbarungsgehalt dieses Dokuments bezüglich des Grundaufbaus des Projektionsobjektivs (inklusive der optischen Spezifikation) wird durch Bezugnahme zum Inhalt dieser Beschreibung gemacht.

Der katadioptrische zweite Objektivteil OP2 enthält den einzigen Konkavspiegel CM des Projektionsobjektivs. Unmittelbar vor dem Konkavspiegel befindet sich eine Negativgruppe NG mit zwei Negativlinsen. In dieser gelegentlich als Schupmann-Achromat bezeichneten Anordnung wird die Petzvalkorrektur, d.h. die Korrektur der Bildfeldkrümmung, durch die Krümmung des Konkavspiegels und die Negativlinsen in dessen Nähe, die chromatische Korrektur durch die Brechkraft der Negativlinsen vor dem Hohlspiegel sowie die Blendenlage bezüglich des Hohlspiegels erreicht.

Eine reflektive Umlenkeinrichtung dient dazu, das von der Objektebene OS zum Konkavspiegel CM verlaufende Strahlenbündel bzw. den entsprechenden Teilstrahlengang von demjenigen Strahlbündel bzw. Teilstrahlengang zu trennen, der nach Reflexion am Konkavspiegel zwischen diesem und der Bildebene IS verläuft. Hierzu hat die Umlenkeinrichtung einen ebenen ersten

Umlenkspiegel FM1 mit einer ersten Spiegelfläche MS1 zur Reflexion der von der Objektebene kommenden Strahlung zum Konkavspiegel CM und einen im rechten Winkel zum ersten Umlenkspiegel FM1 ausgerichteten ebenen zweiten Umlenkspiegel FM2 mit einer zweiten Spiegelfläche MS2, wobei der zweite Umlenkspiegel die vom Konkavspiegel reflektierte Strahlung Richtung Bildebene IS umlenkt. Da an den Umlenkspiegeln die optische Achse gefaltet wird, werden die Umlenkspiegel in dieser Anmeldung auch als Faltungsspiegel bezeichnet. Die Umlenkspiegel sind gegenüber der optischen Achse OA des Projektionsobjektivs um senkrecht zur optischen Achse und parallel zu einer ersten Richtung (x-Richtung) verlaufende Kippachsen gekippt, z.B. um 45°. Bei einer Auslegung des Projektionsobjektivs für den Scanbetrieb ist die erste Richtung (x-Richtung) senkrecht zur Scan-Richtung (y-Richtung) und damit senkrecht zur Bewegungsrichtung von Maske (Retikel) und Substrat (Wafer). Die Umlenkeinrichtung wird hierzu durch ein Prisma realisiert, dessen außen verspiegelte, senkrecht zueinander ausgerichteten Kathetenflächen als Umlenkspiegel dienen.

Die Zwischenbilder IMI1, IMI2 liegen jeweils in der optischen Nähe der ihnen nächstliegenden Faltungsspiegel FM1 bzw. FM2, können jedoch zu diesen einen optischen Mindestabstand haben, so dass eventuelle Fehler auf den Spiegelflächen nicht scharf in die Bildebene abgebildet werden und die ebenen Umlenkspiegel (Planspiegel) FM1, FM2 im Bereich moderater Strahlungsenergiegedichte liegen.

Die Positionen der (paraxialen) Zwischenbilder definieren Feldebene des Systems, welche optisch konjugiert zur Objektebene bzw. zur Bildebene sind. Die Umlenkspiegel liegen somit in optischer Nähe zu Feldebene des Systems, was im Rahmen dieser Anmeldung auch als „feldnah“ bezeichnet wird. Dabei ist der erste Umlenkspiegel in optischer Nähe einer zum ersten Zwischenbild IMI1 gehörenden ersten Feldebene und der zweite Umlenkspiegel in optischer Nähe einer zur ersten Feldebene optisch konjugierten, zum zweiten Zwischenbild IMI2 gehörenden zweiten Feldebene angeordnet.

Die optische Nähe bzw. die optische Entfernung einer optischen Fläche zu einer Bezugsebene (z.B. einer Feldebene oder einer Pupillenebene) wird in dieser Anmeldung durch das sogenannte Subaperturverhältnis SAR beschrieben. Das Subaperturverhältnis SAR einer optischen Fläche wird für die Zwecke dieser Anmeldung wie folgt definiert:

$$\text{SAR} = \text{sign } h (|r| / (|h| + |r|))$$

wobei r die Randstrahlhöhe, h die Hauptstrahlhöhe und die Signumsfunktion sign x das Vorzeichen von x bezeichnet, wobei nach Konvention sign 0 = 1 gilt. Unter Hauptstrahlhöhe

wird die Strahlhöhe des Hauptstrahles eines Feldpunktes des Objektfeldes mit betragsmäßig maximaler Feldhöhe verstanden. Die Strahlhöhe vorzeichenbehaftet zu verstehen. Unter Randstrahlhöhe wird die Strahlhöhe eines Strahles mit maximaler Apertur ausgehend vom Schnittpunkt der optischen Achse mit der Objektebene verstanden. Dieser Feldpunkt muss nicht zur Übertragung des in der Objektebene angeordneten Musters beitragen - insbesondere bei außeraxialen Bildfeldern.

Das Subaperturverhältnis ist eine vorzeichenbehaftete Größe, die ein Maß für die Feld- bzw. Pupillennähe einer Ebene im Strahlengang ist. Per Definition ist das Subaperturverhältnis auf Werte zwischen -1 und +1 normiert, wobei in jeder Feldebene das Subaperturverhältnis null ist und wobei in einer Pupillenebene das Subaperturverhältnis von -1 nach +1 springt oder umgekehrt. Ein betragsmäßiges Subaperturverhältnis von 1 bestimmt somit eine Pupillenebene.

Eine optische Fläche oder eine Ebene wird nun als „(optisch) nah“ zu einer optischen Bezugsfläche bezeichnet, wenn die Subaperturverhältnisse dieser beiden Flächen vom Zahlenwert her vergleichbar sind.

Insbesondere wird eine optische Fläche oder eine Ebene als „(optisch) feldnah“ bezeichnet, wenn diese ein Subaperturverhältnis aufweist, welches nahe bei 0 liegt. Eine optische Fläche oder eine Ebene wird als „(optisch) pupillennah“ bezeichnet, wenn diese ein Subaperturverhältnis aufweist, welches betragsmäßig nahe bei 1 liegt.

Für beide Umlenkspiegel gilt, dass zwischen dem Umlenkspiegel und dem nächstliegenden Zwischenbild kein optisches Element angeordnet ist (unmittelbare Nähe) und dass das Subaperturverhältnis SAR dem Betrage nach kleiner als 0.3, insbesondere kleiner als 0.2 ist.

Die Umlenkspiegel werden daher als (optisch) feldnah bezeichnet

Unter diesen Bedingungen werden beide Umlenkspiegel jeweils in einem annähernd rechteckförmigen oder trapezförmigen Bereich mit abgerundeten Ecken genutzt (vgl. Fig. 5). Der Bereich, der durch die vom effektiven Objektfeld OF kommenden Strahlen des Projektionsstrahlengangs ausgeleuchtet wird, wird hier auch als „Footprint“ bezeichnet. Fig. 5A zeigt den ersten Footprint FTP1 auf dem ersten Umlenkspiegel FM1, Fig. 5B zeigt den zweiten Footprint FTP2 auf dem zweiten Umlenkspiegel FM2.

Der Footprint bzw. Fußabdruck der Projektionsstrahlung auf einer optischen Fläche repräsentiert dabei in Größe und Form die Schnittfläche zwischen dem Projektionsstrahlbündel

und der vom Projektionsstrahlbündel ausgeleuchteten Fläche. Die optische Nähe zu einer nächstliegenden Feldebene ist daran erkennbar, dass der Fußabdruck im Wesentlichen die Rechteckform des effektiven Objektfeldes OF hat, wobei die Eckbereiche etwas abgerundet sind. Der Footprint liegt, genau wie das Objektfeld, außerhalb der optischen Achse OA. Während der von der Projektionsstrahlung genutzte optische Bereich in optischer Nähe des Feldes im Wesentlichen die Form des ausgeleuchteten Feldbereichs hat, wird im Bereich einer zu einer Feldebene Fourier-transformierten Pupillenebene ein im Wesentlichen kreisrunder Bereich ausgeleuchtet, so dass ein Footprint im Bereich einer Pupille wenigstens annähernd Kreisform hat.

Das große Potential des in dieser Anmeldung vorgeschlagenen Verfahrens zur wirksamen Korrektur von Abbildungsfehlern (Aberrationen) in derartigen Projektionsobjektiven wird nun anhand der Fig. 3 bis 5 anhand einiger Beispiele erläutert.

Im Bereich der geometrischen Optik werden üblicherweise Zernike-Polynome benutzt, um Wellenfronten zu repräsentieren, die wiederum die Abbildungsfehler von optischen Systemen beschreiben. Die einzelnen Abbildungsfehler können dabei durch die Koeffizienten der Zernike-Polynome, also die Zernike-Koeffizienten bzw. deren Werte (in [nm]), beschrieben werden. In der hier gewählten Repräsentation repräsentieren die Zernike-Koeffizienten Z2 und Z3 die Verkipfung einer Wellenfront in x-Richtung bzw. y-Richtung, wodurch ein verzeichnungsartiger Fehler entsteht. Der Zernike-Koeffizient Z4 beschreibt eine Krümmung der Wellenfront, wodurch ein Defokusfehler beschreibbar ist. Der Zernike-Koeffizient Z5 beschreibt eine sattelförmige Deformation der Wellenfront und somit den Astigmatismusanteil einer Wellenfrontdeformation. Die Zernike-Koeffizienten Z7 und Z8 stehen für Koma, der Zernike-Koeffizient Z9 für sphärische Aberration und die Zernike-Koeffizienten Z10 und Z11 für Dreiwelligkeit etc.

Die besonders kritische Größe des Overlay bestimmt sich als vom Beleuchtungssetting abhängige Linearkombination der ungeradzahligen Pupillenzernikes.

Die Fig. 3A bis 3F und 4A bis 4F zeigen jeweils Aberrationsdiagramme, die den Korrektionszustand der Wellenfront im effektiven Bildfeld des Projektionsobjektivs anhand der Feldverläufe verschiedener ausgewählter Zernike-Koeffizienten Z2, Z3 etc. quantitativ angeben. Auf den x-Achsen sind jeweils ausgewählte Feldpunkte (field points) entlang der Mitte des effektiven Bildfeldes in der (senkrecht zur Scan-Richtung verlaufenden) x-Richtung angegeben. In Fig. 3A bis 3F sind scannerintegrierte (d.h. in y-Richtung gemittelte) „Zernike Fingerprints“ gezeigt. Durch das Scannen in y-Richtung erfolgt eine Mittelung der Bildfehler in Scanrichtung.

Die Fig. 4A bis 4F stellen die sog. „Fading Fingerprints“ dar, also die Varianz entlang der y-Achse. Mit der Größe „Fading“ kann man den Kontrastverlust bedingt durch die Bildfehler während des Scanvorganges beschreiben.

Die Linien NOM mit Karo-Symbol repräsentieren die nominellen Werte, die sich aus einer Berechnung der Wellenfront anhand der veröffentlichten Design-Spezifikation (Tabelle zu Fig. 6 in WO 2006/121008 A1) ergeben. Diese repräsentieren den zu optimierenden Ausgangszustand des Ausgangs-Projektionsobjektivs vor Erzeugung der korrigierenden Freiformflächen auf den Umlenkspiegeln.

Die Linien CORR mit Kreuz-Symbol repräsentieren die entsprechenden Werte im mittels Freiformflächen auf den Umlenkspiegeln korrigierten Zustand.

Die Linien in den Fig. 5A und 5B repräsentieren die Oberflächentopografie des ersten Umlenkspiegels FM1 (Fig. 5A) und des zweiten Umlenkspiegels FM2 (Fig. 5B) nach Erzeugung der Freiformfläche anhand von Iso-Deformationslinien im Bereich der footprints, also der ausgeleuchteten Bereiche. Die Iso-Deformationslinien sind Linien gleicher Abweichung der nicht-rotationssymmetrischen Freiformflächen von einer ebenen Bezugsfläche. Die Zahlenangaben geben die lokale Abweichung in Nanometern an.

Bei fast allen der dargestellten Zernike-Koeffizienten ist eine durch die Korrektur erzielte Reduzierung der Variation des Aberrationsniveaus über das Bildfeld (d.h. eine Verringerung des PV-Wertes) unmittelbar erkennbar. Besonders ausgeprägt ist der korrigierende Effekt unter anderem bei der Verkippung der Wellenfront in x-Richtung (Z2) und y-Richtung (Z3). Dort liegt das Peak-to-Valley-Verhältnis im nominellen Design (vor der Korrektur) in der Größenordnung von ca. 1 nm, während der entsprechende PV-Wert nach Korrektur in einer Größenordnung von weniger als 0,2 nm liegt. Beim Defokusfehler (Z4) wird eine Reduzierung des PV-Werts auf circa die Hälfte des Werts des unkorrigierten Objektivs erreicht, beim Astigmatismusanteil (Z5) beträgt die Reduzierung annähernd die Hälfte. Weniger stark, aber immer noch ausgeprägt, sind die Effekte bei Z6 und Z7. Im Allgemeinen hängt das Korrekturpotential hauptsächlich von der Ortsfrequenz der Freiformfläche und der Größe der Subapertur auf den Spiegeln ab.

Bei den Fading-Fingerprints ergeben sich ebenfalls deutliche Reduzierungen der PV-Werte aufgrund der nicht-rotationssymmetrischen Korrekturflächen.

Im gezeigten Beispiel weisen die Freiformflächen näherungsweise eine Spiegelsymmetrie zur Meridionalebene (y-Achse) auf. Dies ist ein Spezialfall beim theoretischen Optikdesignfehler,

also dem Fehler, der sich bei einem gemäß Design-Spezifikation aufgebauten Projektionsobjektiv ergeben würde. Bei realen Projektionsobjektiven sind die Freiformasphären bzw. Freiformflächen im Allgemeinen nicht symmetrisch. Die Streuung einzelner realer Projektionsobjektive bzgl. des Aberrationsverlaufes kann relativ groß sein. Deswegen streut auch die individuelle Asphärenkorrektur und weist i.d.R. keine Symmetrien auf.

Die örtliche Verteilung von Bergen und Tälern sowie deren typische lateralen Dimensionen hängt von vielen individuellen Faktoren u.a. aus der Herstellung der einzelnen Komponenten, aus deren Zusammenbau sowie von Besonderheiten der Nutzung ab.

Die Ortsfrequenz der Berg- und Tal-Struktur einer Freiformfläche kann z.B. durch die Anzahl lokaler Maxima und Minima der welligen Spiegelfläche in einer betrachteten Richtung (z.B. x-Richtung) quantifiziert werden. Diese Anzahl kann z. B. im Bereich von 2 bis 10 liegen, ggf. auch darüber. Laterale Dimensionen können z.B. durch einen Tal-Tal-Abstand unmittelbar benachbarter Täler in einer Richtung (z.B. x-Richtung) quantifiziert werden. Dieser Abstand kann z. B. im Bereich von 100  $\mu\text{m}$  bis 300 mm, insbesondere im Bereich von 1 mm bis 100 mm liegen, ggf. auch darüber, selten darunter. Berge und Täler sind häufig in Anordnung und Größe unregelmäßig über die Spiegelfläche verteilt. Die räumliche Verteilung ist spezifisch für das individuelle Projektionsobjektiv

Einige Aspekte der Erfindung wurden anhand von Ausführungsbeispielen erläutert, bei denen beide Spiegelflächen vor der Korrektur Planflächen sind und nach der Korrektur noch eine annähernd ebene Gestalt (mit Formabweichungen zur Bildung einer Freiformfläche) haben. Die Erfindung kann auch bei anderen Typen von Projektionsobjektiven genutzt werden. Die internationale Patentanmeldung mit Veröffentlichungsnummer WO 2005/069055 A2 zeigt z.B. katadioptrische In-Line-Systeme mit gerader optischer Achse, drei hintereinander geschalteten, abbildenden Objektivteilen und zwei jeweils optisch entfernt von einer Pupillenfläche, jeweils in optischer Nähe einer Feldfläche angeordneten Konkavspiegeln. Deren Spiegelflächen (eine oder beide) können ebenfalls als Korrekturflächen in Gestalt einer Freiformfläche ausgelegt sein bzw. gemäß dem hier vorgeschlagenen Verfahren als Korrekturasphäre gestaltet werden. Der Offenbarungsgehalt dieses Dokuments bezüglich des Grundaufbaus von Projektionsobjektiven wird durch Bezugnahme zum Inhalt dieser Beschreibung gemacht.

-----

## Patentansprüche

1. Katadioptrisches Projektionsobjektiv (PO) zur Abbildung eines in einem effektiven Objektfeld (OF) einer Objektebene (OS) des Projektionsobjektivs angeordneten Musters einer Maske in ein in der Bildebene (IS) des Projektionsobjektivs angeordnetes effektives Bildfeld mittels elektromagnetischer Strahlung einer Arbeitswellenlänge  $\lambda < 260$  nm mit:  
einer Vielzahl von Linsen und einer Vielzahl von Spiegeln umfassend mindestens einen Konkavspiegel (CM), wobei die Linsen und Spiegel einen Projektionsstrahlengang definieren, welcher von der Objektebene (OS) zur Bildebene (IS) verläuft und mindestens eine Pupillenebene (P1, P2, P3) enthält, wobei die Spiegel umfassen:  
einen ersten Spiegel (FM1) mit einer ersten Spiegelfläche (MS1), die im Projektionsstrahlengang zwischen der Objektebene und der Pupillenebene in optischer Nähe einer zur Objektebene optisch konjugierten ersten Feldebene angeordnet ist;  
einen zweiten Spiegel (FM2) mit einer zweiten Spiegelfläche (MS2), die im Projektionsstrahlengang zwischen der Pupillenebene und der Bildebene in optischer Nähe einer zu der ersten Feldebene optisch konjugierten zweiten Feldebene angeordnet ist,  
wobei die erste Spiegelfläche (MS1) und/oder die zweite Spiegelfläche (MS2) als eine Freiformfläche gestaltet ist.
2. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, worin eine Abbildungsqualität des Projektionsobjektivs durch eine höhere Ordnung der Feldvariation der Größe mindestens einer Aberration in einer Feldrichtung des Bildfeldes (IF) charakterisierbar ist, wobei die Freiformfläche von einer bestangepassten ebenen oder rotationssymmetrischen Bezugsfläche an einer oder mehreren Positionen abweicht und eine örtliche Verteilung der Abweichungen derart eingestellt ist, dass diese Feldvariation reduziert ist im Vergleich zu einer Bezugskonfiguration, in der die Spiegelfläche die Gestalt der bestangepassten Bezugsfläche aufweist.
3. Projektionsobjektiv nach Anspruch 2, worin die Aberration mindestens eine Aberration aus der folgenden Gruppe ist: Verkippung der Wellenfront; Koma erster Ordnung; Dreiwelligkeit; Koma höherer Ordnung.
4. Projektionsobjektiv nach einem der vorhergehenden Ansprüche, worin die erste Spiegelfläche (MS1) als eine erste Freiformfläche und die zweite Spiegelfläche (MS2) als eine zweite Freiformfläche gestaltet ist.
5. Projektionsobjektiv nach Anspruch 4, worin

die erste Freiformfläche und die zweite Freiformfläche unterschiedliche Gestalt aufweisen.

6. Projektionsobjektiv nach Anspruch 4 oder 5, worin eine Gestalt der ersten Freiformfläche derart an eine Gestalt der zweiten Freiformfläche angepasst ist, dass die erste Freiformfläche eine angestrebte Veränderung mindestens einer Ziel-Aberration sowie ein unerwünschte Veränderung mindestens einer Rest-Aberration erzeugt und die zweite Freiformfläche die Veränderung der Rest-Aberration wenigstens teilweise kompensiert.

7. Projektionsobjektiv nach einem der vorhergehenden Ansprüche, worin zwischen der ersten Spiegelfläche (MS1) und der ersten Feldebene kein optisches Element angeordnet ist und/oder worin zwischen der zweiten Spiegelfläche (MS2) und der zweiten Feldebene kein optisches Element angeordnet ist.

8. Projektionsobjektiv nach einem der vorhergehenden Ansprüche, worin an der ersten Spiegelfläche (MS1) und/oder an der zweiten Spiegelfläche (MS2) ein Subaperturverhältnis SAR dem Betrage nach kleiner als 0.3, insbesondere kleiner als 0.2 ist.

9. Projektionsobjektiv nach einem der vorhergehenden Ansprüche, worin das Projektionsobjektiv einen ersten Objektivteil (OP1) zur Abbildung des effektiven Objektfeldes (OF) in ein erstes reelles Zwischenbild (IMI1), einen zweiten Objektivteil (OP2) zur Erzeugung eines zweiten reellen Zwischenbildes (IMI2) mit der von dem ersten Objektivteil kommenden Strahlung, sowie einen dritten Objektivteil (OP3) zur Abbildung des zweiten reellen Zwischenbildes in die Bildebene (IS) aufweist, wobei das erste reelle Zwischenbild in optischer Nähe der ersten Feldebene und das zweite reelle Zwischenbild in optischer Nähe der zweiten Feldebene liegt.

10. Projektionsobjektiv nach einem der vorhergehenden Ansprüche, worin der erste Spiegel (FM1) und der zweite Spiegel (FM2) als Planspiegel ausgelegt sind und in optischer Nähe der zwischen der ersten Feldebene und der zweiten Feldebene liegenden Pupillenebene (P2) ein Konkavspiegel (CM) angeordnet ist.

11. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 9, worin der erste Spiegel und der zweite Spiegel als Konkavspiegel ausgelegt sind.

12. Verfahren zur Herstellung eines katadioptrischen Projektionsobjektivs (PO) zur Abbildung eines in einem effektiven Objektfeld (OF) einer Objektebene (OS) des

Projektionsobjektivs angeordneten Musters einer Maske in ein in der Bildebene (IS) des Projektionsobjektivs angeordnetes effektives Bildfeld (IF) mittels elektromagnetischer Strahlung einer Arbeitswellenlänge  $\lambda < 260$  nm mit folgenden Schritten:

Aufbauen eines Ausgangs-Projektionsobjektivs mit einer Vielzahl von Linsen und einer Vielzahl von Spiegeln umfassend mindestens einen Konkavspiegel (CM) derart, dass die Linsen und Spiegel einen Projektionsstrahlengang definieren, welcher von der Objektebene zur Bildebene verläuft und mindestens eine Pupillenebene enthält, wobei die Spiegel umfassen:

einen ersten Spiegel (FM1) mit einer ersten Spiegelfläche (MS1), die im Projektionsstrahlengang zwischen der Objektebene und der Pupillenebene in optischer Nähe einer zur Objektebene optisch konjugierten ersten Feldebene angeordnet ist; und

einen zweiten Spiegel (FM2) mit einer zweiten Spiegelfläche (MS2), die im Projektionsstrahlengang zwischen der Pupillenebene und der Bildebene in optischer Nähe einer zu der ersten Feldebene optisch konjugierten zweiten Feldebene angeordnet ist,

Messen einer Abbildungsqualität des Projektionsobjektivs zur Bestimmung einer örtlichen Verteilung der Größe mindestens einer Ziel-Aberration in dem effektiven Bildfeld (IF);

Auswählen der ersten Spiegelfläche (MS1) und/oder der zweiten Spiegelfläche (MS2) als Korrekturfläche

Verändern der ersten Spiegelfläche und/oder der zweiten Spiegelfläche so, dass die erste Spiegelfläche und/oder die zweite Spiegelfläche als eine Freiformfläche gestaltet ist in der Weise,

dass ein Niveau der Ziel-Aberration im effektiven Bildfeld im Vergleich zu dem Niveau bei dem Ausgangs-Projektionsobjektiv reduziert wird.

-----

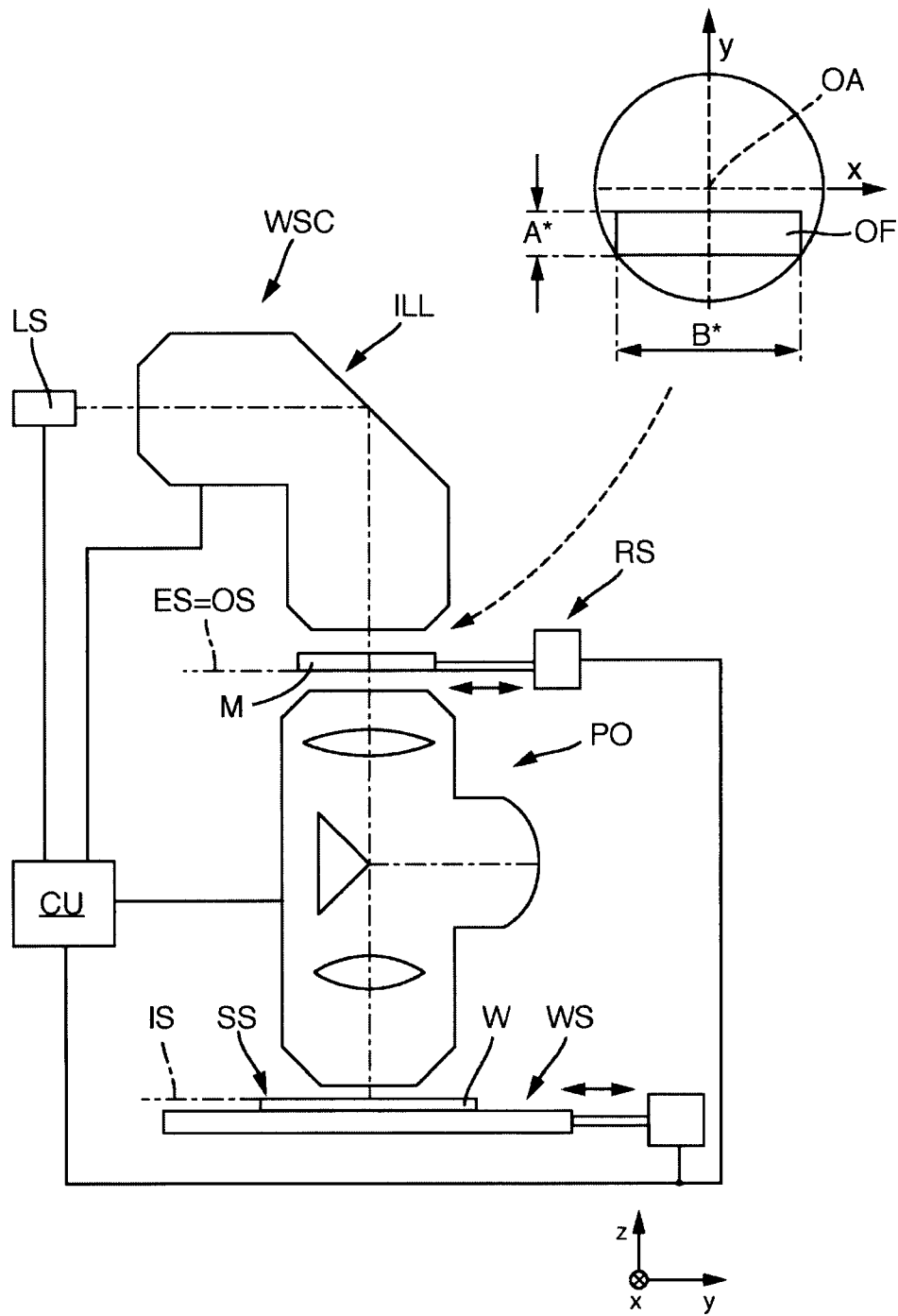


Fig. 1

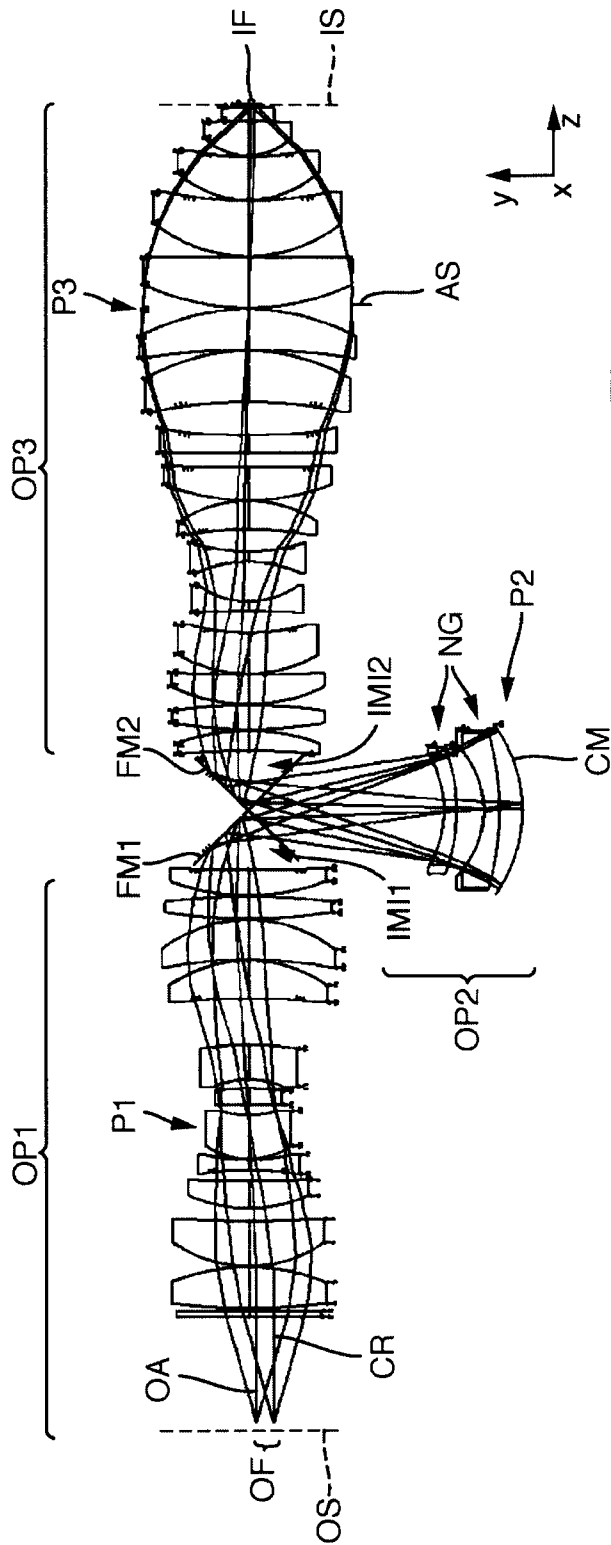


Fig. 2

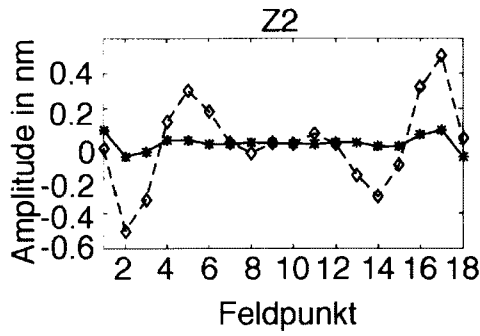


Fig. 3A

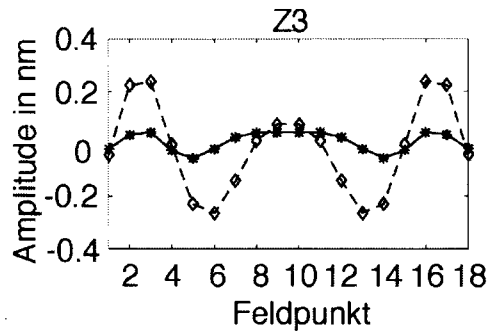


Fig. 3B

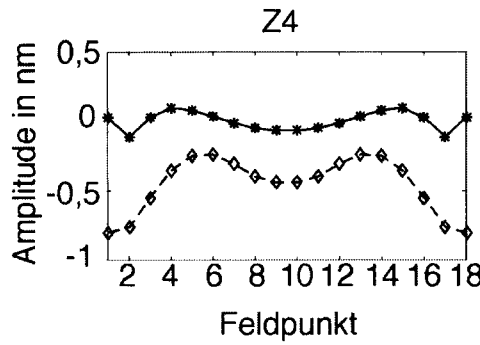


Fig. 3C

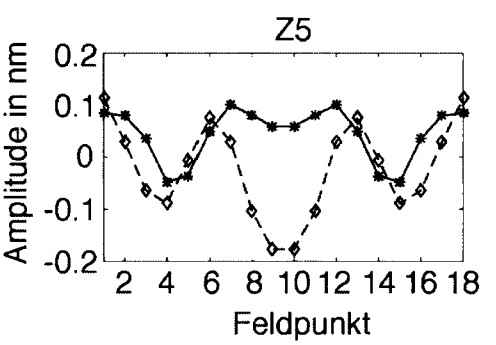


Fig. 3D

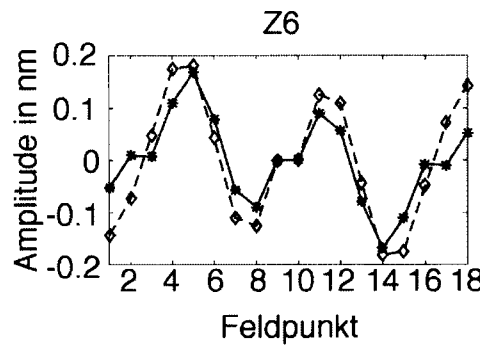


Fig. 3E

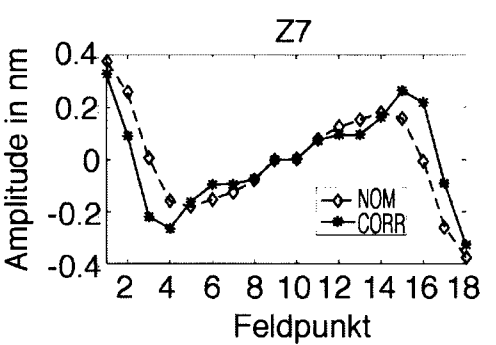


Fig. 3F

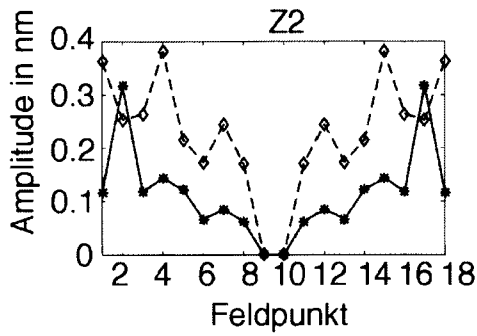


Fig. 4A

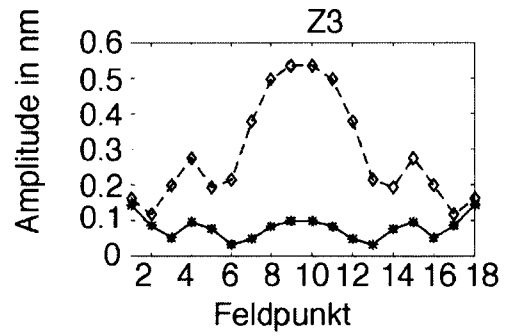


Fig. 4B

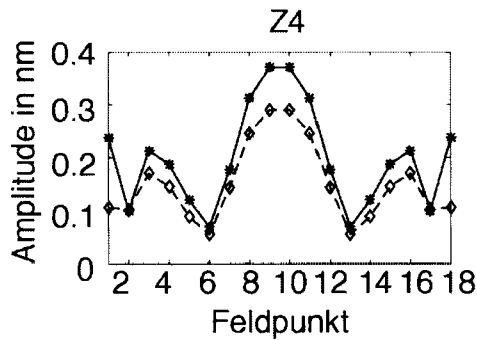


Fig. 4C

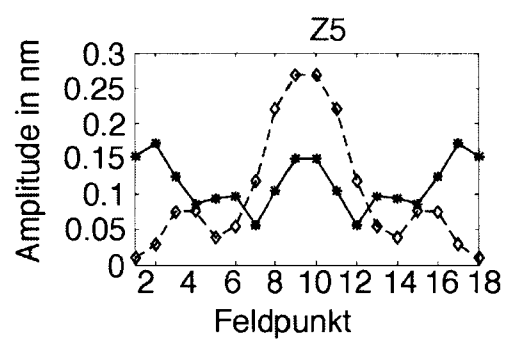


Fig. 4D

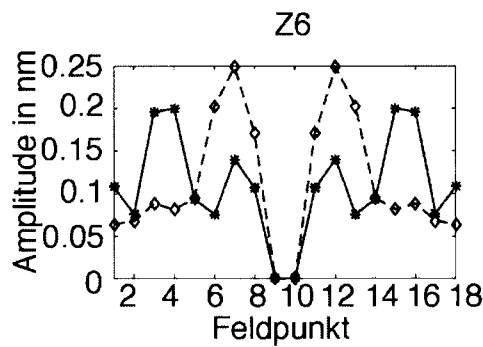


Fig. 4E

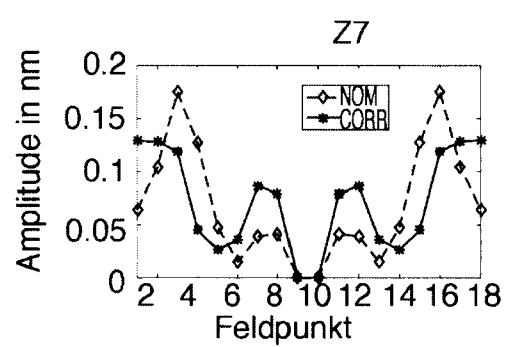


Fig. 4F



**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

International application No  
PCT/EP2017/081230

**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**  
 INV. G03F7/20 G02B17/08  
 ADD.  
 According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

**B. FIELDS SEARCHED**  
 Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)  
 G03F G02B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)  
 EPO-Internal, WPI Data, INSPEC

**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	US 2009/092925 A1 (OMURA YASUHIRO [JP]) 9 April 2009 (2009-04-09) cited in the application paragraphs [0074] - [0076]; figure 6 -----	1-12
Y	US 2002/039175 A1 (SHAFER DAVID R [US] ET AL) 4 April 2002 (2002-04-04) paragraph [0088]; figure 8 -----	1-12
Y	US 2005/190435 A1 (SHAFER DAVID [US] ET AL) 1 September 2005 (2005-09-01) cited in the application paragraphs [0129] - [0131]; figure 1 -----	11

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

\* Special categories of cited documents :

- "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
- "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
- "&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search <b>22 March 2018</b>	Date of mailing of the international search report <b>04/04/2018</b>
---	---

Name and mailing address of the ISA/ European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Authorized officer  <b>Eisner, Klaus</b>
--	--

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2017/081230

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date	
US 2009092925	A1	09-04-2009	CN 101171667 A	30-04-2008
			EP 1881520 A1	23-01-2008
			HK 1111813 A1	31-12-2009
			JP 5055566 B2	24-10-2012
			JP 5561563 B2	30-07-2014
			JP 2012164991 A	30-08-2012
			JP WO2006121008 A1	18-12-2008
			KR 20080005428 A	11-01-2008
			US 2009092925 A1	09-04-2009
			WO 2006121008 A1	16-11-2006
US 2002039175	A1	04-04-2002	EP 1115019 A2	11-07-2001
			JP 2001221950 A	17-08-2001
			KR 20010062830 A	07-07-2001
			TW 528880 B	21-04-2003
			US 2002039175 A1	04-04-2002
US 2005190435	A1	01-09-2005	CN 1910494 A	07-02-2007
			CN 102169226 A	31-08-2011
			CN 102207608 A	05-10-2011
			CN 102207609 A	05-10-2011
			CN 102830487 A	19-12-2012
			EP 1709472 A2	11-10-2006
			EP 2006739 A2	24-12-2008
			JP 5420821 B2	19-02-2014
			JP 5420845 B2	19-02-2014
			JP 5548743 B2	16-07-2014
			JP 5705182 B2	22-04-2015
			JP 2007518125 A	05-07-2007
			JP 2008116991 A	22-05-2008
			JP 2008122995 A	29-05-2008
			JP 2008152272 A	03-07-2008
			JP 2012234214 A	29-11-2012
			JP 2013037371 A	21-02-2013
			KR 20060129379 A	15-12-2006
			KR 20100012101 A	05-02-2010
			KR 20110121643 A	07-11-2011
			KR 20120040186 A	26-04-2012
			KR 20120099474 A	10-09-2012
			KR 20130030825 A	27-03-2013
			KR 20140004251 A	10-01-2014
			TW I376524 B	11-11-2012
			TW 201037349 A	16-10-2010
			TW 201142351 A	01-12-2011
			TW 201312156 A	16-03-2013
			TW 201604583 A	01-02-2016
			US 2005190435 A1	01-09-2005
			WO 2005069055 A2	28-07-2005

# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2017/081230

<b>A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES</b> INV. G03F7/20 G02B17/08 ADD.		
Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC		
<b>B. RECHERCHIERTE GEBIETE</b> Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole ) G03F G02B		
Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen		
Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe) EPO-Internal, WPI Data, INSPEC		
<b>C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN</b>		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
Y	US 2009/092925 A1 (OMURA YASUHIRO [JP]) 9. April 2009 (2009-04-09) in der Anmeldung erwähnt Absätze [0074] - [0076]; Abbildung 6 -----	1-12
Y	US 2002/039175 A1 (SHAFER DAVID R [US] ET AL) 4. April 2002 (2002-04-04) Absatz [0088]; Abbildung 8 -----	1-12
Y	US 2005/190435 A1 (SHAFER DAVID [US] ET AL) 1. September 2005 (2005-09-01) in der Anmeldung erwähnt Absätze [0129] - [0131]; Abbildung 1 -----	11
<input type="checkbox"/> Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen <input checked="" type="checkbox"/> Siehe Anhang Patentfamilie		
* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen : "A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist "E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist "L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt) "O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht "P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist		"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist "X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden "Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist "&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist
Datum des Abschlusses der internationalen Recherche 22. März 2018		Absenddatum des internationalen Recherchenberichts 04/04/2018
Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Bevollmächtigter Bediensteter Eisner, Klaus

## INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2017/081230

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 2009092925 A1	09-04-2009	CN 101171667 A	30-04-2008
		EP 1881520 A1	23-01-2008
		HK 1111813 A1	31-12-2009
		JP 5055566 B2	24-10-2012
		JP 5561563 B2	30-07-2014
		JP 2012164991 A	30-08-2012
		JP WO2006121008 A1	18-12-2008
		KR 20080005428 A	11-01-2008
		US 2009092925 A1	09-04-2009
		WO 2006121008 A1	16-11-2006
US 2002039175 A1	04-04-2002	EP 1115019 A2	11-07-2001
		JP 2001221950 A	17-08-2001
		KR 20010062830 A	07-07-2001
		TW 528880 B	21-04-2003
		US 2002039175 A1	04-04-2002
US 2005190435 A1	01-09-2005	CN 1910494 A	07-02-2007
		CN 102169226 A	31-08-2011
		CN 102207608 A	05-10-2011
		CN 102207609 A	05-10-2011
		CN 102830487 A	19-12-2012
		EP 1709472 A2	11-10-2006
		EP 2006739 A2	24-12-2008
		JP 5420821 B2	19-02-2014
		JP 5420845 B2	19-02-2014
		JP 5548743 B2	16-07-2014
		JP 5705182 B2	22-04-2015
		JP 2007518125 A	05-07-2007
		JP 2008116991 A	22-05-2008
		JP 2008122995 A	29-05-2008
		JP 2008152272 A	03-07-2008
		JP 2012234214 A	29-11-2012
		JP 2013037371 A	21-02-2013
		KR 20060129379 A	15-12-2006
		KR 20100012101 A	05-02-2010
		KR 20110121643 A	07-11-2011
		KR 20120040186 A	26-04-2012
		KR 20120099474 A	10-09-2012
		KR 20130030825 A	27-03-2013
		KR 20140004251 A	10-01-2014
		TW I376524 B	11-11-2012
		TW 201037349 A	16-10-2010
		TW 201142351 A	01-12-2011
		TW 201312156 A	16-03-2013
		TW 201604583 A	01-02-2016
		US 2005190435 A1	01-09-2005
		WO 2005069055 A2	28-07-2005