

(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  
25. Januar 2018 (25.01.2018)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 2018/015014 A1**

(51) Internationale Patentklassifikation:  
**G01B 9/02** (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2017/000875

(22) Internationales Anmeldedatum:  
19. Juli 2017 (19.07.2017)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:  
10 2016 213 237.7  
20. Juli 2016 (20.07.2016) DE

(71) Anmelder: **CARL ZEISS SMT GMBH** [DE/DE]; Ru-  
dolf-Eber-Strasse 2, 73447 Oberkochen (DE).

(72) Erfinder: **HETZLER, Jochen**; Stöckenweg 12, 73434 Aa-  
len (DE).

(74) Anwalt: **SUMMERER, Christian**; ZEUNER SUMME-  
RER STÜTZ, Nußbaumstrasse 8, 80336 München (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: MEASURING DEVICE FOR INTERFEROMETRIC DETERMINATION OF A SHAPE OF AN OPTICAL SURFACE

(54) Bezeichnung: MESSVORRICHTUNG ZUR INTERFEROMETRISCHEN BESTIMMUNG EINER FORM EINER  
OPTISCHEN OBERFLÄCHE

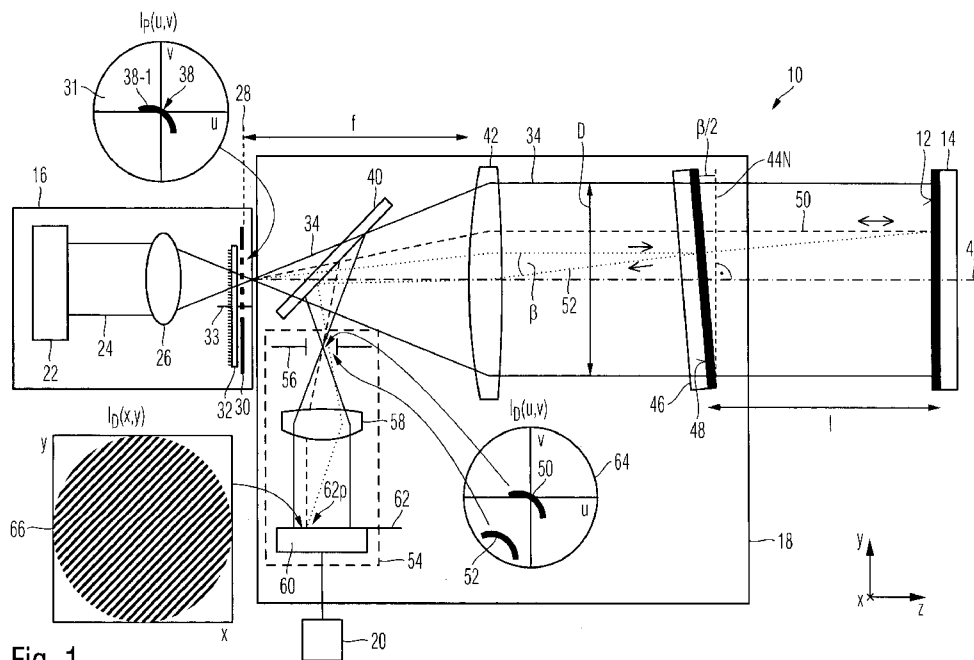


Fig. 1

(57) Abstract: A measuring device (10) for interferometric determination of a shape of an optical surface (12) of a test piece (14) comprises an illumination module (16) for producing an illumination wave (34), an interferometer (18), which is configured to split the illumination wave into a test wave (50) directed onto the optical surface and a reference wave (52), the waves being tilted in relation to one another in such a way that, when they are superimposed in a detection plane (62) of the interferometer a multiple fringe interference pattern (66) is produced. The illumination module has a pupil plane (28), which is arranged in a Fourier plane of the detection plane, and the illumination module is configured to produce the illumination wave in such a way that its intensity distribution in the pupil plane comprises one or more spatially isolated, contiguous surface areas (38) that are configured in such a way that a rectangle (74) of



**(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).

**Erklärungen gemäß Regel 4.17:**

— *Erfindererklärung (Regel 4.17 Ziffer iv)*

**Veröffentlicht:**

— *mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)*

---

a smallest possible area that is made to fit the surface area or the entirety of the surface areas has an aspect ratio of at least 1.5:1.

**(57) Zusammenfassung:** Eine Messvorrichtung (10) zur interferometrischen Bestimmung einer Form einer optischen Oberfläche (12) eines Prüflings (14) umfasst ein Beleuchtungsmodul (16) zum Erzeugen einer Beleuchtungswelle (34), ein Interferometer (18), welches dazu konfiguriert ist, die Beleuchtungswelle in eine auf die optische Oberfläche gerichtete Prüfwelle (50) und eine Referenzwelle (52) zueinander derart verkippt aufzuspalten, dass durch deren Überlagerung in einer Detektionsebene (62) des Interferometers ein Mehrstreifeninterferenzmuster (66) erzeugt wird. Das Beleuchtungsmodul weist eine in einer Fourierebene der Detektionsebene angeordnete Pupillenebene (28) auf und das Beleuchtungsmodul ist dazu konfiguriert, die Beleuchtungswelle derart zu erzeugen, dass deren Intensitätsverteilung in der Pupillenebene einen oder mehrere räumlich isolierte, zusammenhängende und derart konfigurierte Flächenbereiche (38) umfasst, dass ein an den Flächenbereich bzw. an die Gesamtheit der Flächenbereiche angepasstes Rechteck (74) mit kleinstmöglicher Fläche ein Aspektverhältnis von mindestens 1,5:1 aufweist.

Messvorrichtung zur interferometrischen Bestimmung einer Form einer optischen Oberfläche

- 5 Die vorliegende Anmeldung beansprucht die Priorität der deutschen Patentanmeldung 10 2016 213 237.7 vom 20. Juli 2016. Die gesamte Offenbarung dieser Patentanmeldung wird durch Bezugnahme in die vorliegende Anmeldung aufgenommen.

10 Hintergrund der Erfindung

Die Erfindung betrifft eine Messvorrichtung sowie ein Verfahren zur interferometrischen Bestimmung einer Form einer optischen Oberfläche eines Prüflings. Eine derartige Messvorrichtung ist beispielsweise in WO 2006/077145 A2 beschrieben.

15 Diese Messvorrichtung umfasst ein Fizeauinterferometer, mit dem eine Messwelle mit einer an die Sollform der optischen Oberfläche angepassten Wellenfront erzeugt wird. Die Wellenfront der angepassten Messwelle wird nach Reflexion an der optischen Oberfläche zur Bestimmung der Abweichung der tatsächlichen Form der optischen Oberfläche von deren Sollform interferometrisch ausgewertet.

20 Bei dem Fizeauinterferometer gemäß WO 2006/077145 A2 handelt es sich um ein sogenanntes Common-Path-Interferometer, bei dem die Wege der interferierenden Teilbündel auf dem gleichen optischen Pfad verlaufen bzw. zumindest räumlich eng benachbart sind. Derartige Common-Path-Interferometern sind jedoch anfällig gegenüber Phasenstörungen, die durch mechanische Vibrationen

25 des Prüflings oder durch Luftschlieren in der Interferometerkavität bedingt werden. Diese Phasenanfälligkeit kann bei Verwendung eines Mehrstreifeninterferometers verhindert werden. Bei einem derartigen Mehrstreifen- bzw. Vielstreifeninterferometer verlaufen die interferierenden Teilbündel derart zueinander verkippt, dass ein Mehrstreifeninterferenzmuster entsteht.

30

Das optische Element mit der optischen Oberfläche ist beispielsweise eine optische Komponente, wie etwa eine Linse oder ein Spiegel. Derartige optische

- Komponenten werden in optischen Systemen, wie etwa einem in der Astronomie verwendeten Teleskop oder in einem Abbildungssystem eingesetzt, wie es in lithographischen Verfahren zum Einsatz kommt. Der Erfolg eines solchen optischen Systems ist wesentlich bestimmt durch eine Genauigkeit, mit der dessen
- 5 optische Komponenten hergestellt und dahingehend bearbeitet werden können, daß deren Oberflächen jeweils einer Soll-Gestalt entsprechen, welche durch einen Designer des optischen Systems bei dessen Auslegung festgelegt wurde. Im Rahmen einer solchen Herstellung ist es notwendig, die Gestalt der bearbeiteten optischen Flächen mit deren Soll-Gestalt zu vergleichen und Differenzen bzw.
- 10 Abweichungen zwischen der gefertigten Oberfläche und der Soll-Oberfläche zu bestimmen. Die optische Oberfläche kann dann in solchen Bereichen bearbeitet werden, in denen Differenzen zwischen der bearbeiteten Fläche und der Soll-Fläche beispielsweise vorbestimmte Schwellenwerte überschreiten.
- 15 Bei der hochgenauen Vermessung von optischen Oberflächen mittels Mehrstreifeninterferometrie treten oft Störungen auf, die auf Defekte auf den optischen Flächen des Interferometers zurückgehen. Dabei kann bei diesen Interferometern die Beleuchtung so gewählt werden, dass die Störungen so gut wie möglich minimiert werden. Dies kann erfolgen, indem anstatt einer „punktförmigen“ Lichtquelle mit
- 20 einer Ausdehnung von höchstens dem Airydurchmesser eine ausgedehnte kreisförmige Lichtquelle in der Beleuchtungspupille eingesetzt wird. Die ausgedehnte Lichtquelle führt zu einer unscharfen Abbildung der Defekte und damit zu einer deutlichen Reduzierung des Messfehlers. Dies hat jedoch den Nachteil, dass der Kontrast des Mehrstreifeninterferogramms reduziert wird, was zu einem schlech-
- 25 teren Signal-zu-Rausch-Verhältnis führt.

#### Zugrunde liegende Aufgabe

- 30 Es ist eine Aufgabe der Erfindung, eine Vorrichtung sowie ein Verfahren bereitzustellen, womit die vorgenannten Probleme gelöst werden, und insbesondere eine Bestimmung einer Oberflächenform mittels Mehrstreifeninterferometrie er-

möglichst wird, welche durch hohen Interferogrammkontrast und gleichzeitig geringe Störanfälligkeit gegenüber Defekten auf den optischen Flächen des Interferometers gekennzeichnet ist.

5

#### Erfindungsgemäße Lösung

Die vorgenannte Aufgabe kann erfindungsgemäß beispielsweise mit der nachfolgend beschriebenen Messvorrichtung zur interferometrischen Bestimmung einer  
10 Form einer optischen Oberfläche eines Prüflings gelöst werden. Die erfindungsgemäße Messvorrichtung umfasst ein Beleuchtungsmodul zum Erzeugen einer Beleuchtungswelle, ein Interferometer, welches dazu konfiguriert ist, die Beleuchtungswelle in eine auf die optische Oberfläche gerichtete Prüfwelle und eine Referenzwelle zueinander derart verkippt aufzuspalten, dass durch deren Überlage-  
15 rung in einer Detektionsebene des Interferometers ein Mehrstreifeninterferenzmuster erzeugt wird. Dabei weist das Beleuchtungsmodul eine in einer Fourierebene der Detektionsebene angeordnete Pupillenebene auf und das Beleuchtungsmodul ist dazu konfiguriert, die Beleuchtungswelle derart zu erzeugen, dass deren Intensitätsverteilung in der Pupillenebene einen oder mehrere räumlich iso-  
20 lierte, zusammenhängende und derart konfigurierte Flächenbereiche umfasst, dass ein an den Flächenbereich bzw. an die Gesamtheit der Flächenbereiche angepasstes Rechteck mit kleinstmöglicher Fläche ein Aspektverhältnis von mindestens 1,5:1, insbesondere von mindestens 2:1 oder von mindestens 3:1, aufweist.

25 Mit anderen Worten ist gemäß einer ersten Variante das Beleuchtungsmodul dazu konfiguriert, die Beleuchtungswelle derart zu erzeugen, dass deren Intensitätsverteilung in der Pupillenebene einen räumlich isolierten, zusammenhängenden Flächenbereich umfasst, dessen Form derart konfiguriert ist, dass ein daran angepasstes Rechteck mit kleinstmöglicher Fläche ein Aspektverhältnis von mindestens 1,5:1 aufweist. Gemäß einer zweiten Variante ist das Beleuchtungsmodul  
30 dazu konfiguriert, die Beleuchtungswelle derart zu erzeugen, dass deren Intensitätsverteilung in der Pupillenebene mehrere räumlich isolierte, zusammenhän-

gende Flächenbereiche umfasst, welche derart konfiguriert bzw. angeordnet sind, dass ein an die Gesamtheit der Flächenbereiche angepasstes Rechteck mit kleinstmöglicher Fläche ein Aspektverhältnis von mindestens 1,5:1 aufweist.

- 5 Unter dem an den räumlich isolierten, zusammenhängenden Flächenbereich angepassten Rechteck mit kleinstmöglicher Fläche ist ein Rechteck zu verstehen, welches flächenmäßig bestmöglich an den räumlich isolierten Flächenbereich angepasst ist, d.h. es ist dasjenige Rechteck unter den räumlich isolierten Flächenbereich vollständig umfassenden Rechtecken, welches die kleinstmögliche Fläche  
10 aufweist.

Die Überlagerung der Prüfwelle mit der Referenzwelle erfolgt nach Wechselwirkung der Prüfwelle mit der optischen Oberfläche. Durch Auswertung des Mehrstreifeninterferenzmusters lässt sich eine Abweichung der Form der optischen  
15 Oberfläche von einer Sollform und damit die Form der optischen Oberfläche des Prüflings selbst bestimmen. Die verkippte Aufspaltung erfolgt derart, dass die Referenzwelle gegenüber der Prüfwelle nach Wechselwirkung mit der optischen Oberfläche verkippt ist. Das Aufspalten der Beleuchtungswelle in die Prüfwelle und die Referenzwelle kann mittels eines Aufspaltungselements, wie etwa eines  
20 Fizeau-Elements, erfolgen. Die Prüfwelle nach Wechselwirkung mit der optischen Oberfläche läuft gemäß einem Ausführungsbeispiel im Strahlengang der Prüfwelle vor dessen Wechselwirkung mit der optischen Oberfläche zurück. In diesem Fall ist der Kippwinkel zwischen der Referenzwelle und der Prüfwelle nach Wechselwirkung mit der optischen Oberfläche identisch mit dem Kippwinkel zwischen  
25 der Referenzwelle und der umgekehrten Ausbreitungsrichtung der Prüfwelle am Ort der Aufspaltung.

Unter einem Mehrstreifeninterferenzmuster ist in diesem Text ein Interferenzmuster zu verstehen, welches mindestens eine volle Periode von sich abwechselnden Streifen konstruktiver und destruktiver Interferenz umfasst. Unter einer  
30 vollen Periode ist zu verstehen, dass die Phasendifferenz zwischen den interferierenden Wellen entlang des Mehrstreifeninterferenzmusters alle Werte zwischen 0

und  $2\pi$  einnimmt. Mit anderen Worten ist unter einem Mehrstreifeninterferenzmuster ein Interferenzmuster mit mindestens zwei Streifen zu verstehen, wobei die Streifen helle Streifen (konstruktive Interferenz) oder dunkle Streifen (destruktive Interferenz) sein können. Insbesondere kann ein Mehrstreifeninterferenzmuster mindestens zwei, mindestens fünf, mindestens zehn, mindestens fünfzig oder mindestens hundert volle Perioden von sich abwechselnden Streifen konstruktiver und destruktiver Interferenz umfassen.

Der in Pupillenebene des Beleuchtungsmoduls vorliegende räumlich isolierte, zusammenhängende Flächenbereich kann ein heller Bereich (d.h. ein Bereich hoher Intensität) in einer vergleichsweise dunklen Umgebung (vergleichsweise niedrige Intensität) sein. Die vergleichsweise niedrige Intensität in der dunklen Umgebung kann z.B. weniger als 50% der vergleichsweise hohen Intensität des hellen Bereichs betragen.

Gemäß einer Ausführungsform umfasst die Intensitätsverteilung in der Pupillenebene mindestens den einen zusammenhängenden Flächenbereich, d.h. es liegt die erste Variante vor, in der die Intensitätsverteilung in der Pupillenebene einen räumlich isolierten, zusammenhängenden Flächenbereich umfasst, dessen Form derart konfiguriert ist, dass ein daran angepasstes Rechteck mit kleinstmöglicher Fläche ein Aspektverhältnis von mindestens 1,5:1 aufweist. Gemäß dieser Ausführungsform ist der zusammenhängende Flächenbereich als Streifen gestaltet.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform umfasst die Intensitätsverteilung in der Pupillenebene die mehreren zusammenhängenden Flächenbereiche, d.h. es liegt die zweite Variante vor, in der die Intensitätsverteilung in der Pupillenebene mehrere räumlich isolierte, zusammenhängende Flächenbereiche umfasst, welche derart konfiguriert bzw. angeordnet sind, dass ein an die Gesamtheit der Flächenbereiche angepasstes Rechteck mit kleinstmöglicher Fläche ein Aspektverhältnis von mindestens 1,5:1 aufweist. Gemäß dieser Ausführungsform ist eine an die Gesamtheit der Flächenbereiche formangepasste Überdeckungsfläche als Streifen gestaltet. Unter einer formangepassten Überdeckungsfläche ist in diesem

Zusammenhang eine Fläche zu verstehen, welche die räumlich isolierten, zusammenhängenden Flächenbereiche überdeckt und gleichzeitig an eine extrapolierte bzw. abstrahierte Form der Anordnung der Flächenbereiche angepasst ist. Eine derartige formangepasste Überdeckungsfläche kann beispielsweise auch  
5 durch eine mathematische Bestimmung einer Umhüllungskurve um die Flächenbereiche unter Minimierung einer Kombination des Umfangs sowie des Flächeninhalts der Umhüllungskurve erfolgen

Das Vorsehen eines Streifens in der Pupillen-Intensitätsverteilung ermöglicht das  
10 Erzeugen des Mehrstreifeninterferenzmusters mit hohem Kontrast bei gleichzeitig geringer Störanfälligkeit gegenüber auf den Flächen des Interferometers vorliegenden Defekten.

Gemäß einer Ausführungsform ist die Verkippung der Referenzwelle gegenüber  
15 der Prüfwelle größer als ein Mindestkippwinkel, wobei der Mindestkippwinkel durch das hundertfache, insbesondere das fünfhundertfache des Quotienten aus der Wellenlänge der Beleuchtungswelle und dem Strahldurchmesser der Beleuchtungswelle am Ort der Aufspaltung der Beleuchtungswelle in die Prüfwelle und die Referenzwelle definiert ist. Der Strahldurchmesser der Beleuchtungswelle am Ort  
20 der Aufspaltung kann dem Durchmesser einer im Strahlengang der Beleuchtungswelle angeordneten Anpassungsoptik zum Anpassen der Wellenfront der Beleuchtungswelle an eine Sollform der optischen Oberfläche des Prüflings entsprechen. Diese Anpassungsoptik kann als ein Kollimator ausgebildet sein, welcher vor der Wechselwirkung der Beleuchtungswelle mit der Oberfläche des  
25 Prüflings angeordnet ist. Die Überlagerung der Prüfwelle mit der Referenzwelle erfolgt nach Wechselwirkung der Prüfwelle mit der optischen Oberfläche. Durch Auswertung des Mehrstreifeninterferenzmusters lässt sich eine Abweichung der Form der optischen Oberfläche von einer Sollform und damit die Form der optischen Oberfläche des Prüflings selbst bestimmen.

30 Gemäß einer Ausführungsvariante ist der Streifen ein bogenförmiger Streifen, gemäß einer weiteren Ausführungsvariante ein gerader Streifen. Unter einem bo-

genförmigen Streifen ist ein Streifen zu verstehen, der eine in einer Richtung vor-  
liegende Krümmung aufweist, d.h. der Streifen ist entweder links gekrümmt oder  
rechts gekrümmt. Dabei ist neben einem exakt bogenförmigen Streifen auch ein  
Streifen, der aus mehreren entlang eines Bogens angeordneten geraden Teilbe-  
5 reichen zusammensetzt, als ein derartiger bogenförmiger Streifen zu verste-  
hen. Unter einem geraden Streifen ist ein rechteckförmiger Flächenbereich mit  
einem Aspektverhältnis von mindestens 1,5:1 zu verstehen.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform wird die der Pupillenebene zugeordnete  
10 Pupille des Beleuchtungsmoduls von einem ringförmigen Rand begrenzt und der  
Streifen verläuft quer zum Rand der Pupille. Mit anderen Worten verläuft der bo-  
genförmige Streifen insbesondere nicht entlang des Randes der Pupille. Während  
ein derartiger randseitiger Verlauf ggf. für Common-Path-Interferometern geeignet  
sein könne, hätte er nicht den erwünschten Effekt auf den Kontrast des in der er-  
15 findungsgemäßen Messvorrichtung erzeugten Mehrstreifeninterferenzmusters.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform wird die der Pupillenebene zugeordnete  
Pupille des Beleuchtungsmoduls von einem ringförmigen Rand begrenzt und der  
mindestens eine bogenförmige Streifen ist derart konfiguriert, dass zumindest ei-  
20 ne Tangente an dem bogenförmigen Streifen existiert, welche die Pupille in zwei  
Teile unterteilt, deren Flächen sich höchstens um den Faktor zwanzig unterschei-  
den. Mit anderen Worten stehen die Flächen, die durch die Teilung der Pupille  
mittels der zumindest einen Tangente entstehen, im Verhältnis von 1:20 oder ei-  
nem ausgeglichenerem Verhältnis, d.h. sie stehen in einem Verhältnis, welches  
25 zwischen 1:1 und 1:20 liegt. Gemäß weiteren Ausführungsformen unterscheiden  
sich die Flächen der zwei Teile der Pupille höchstens um den Faktor zehn oder  
höchstens um den Faktor fünf. Ein bogenförmiger Streifen, welcher entlang des  
ringförmigen Randes der Pupille verläuft, erfüllt beispielsweise die genannte Be-  
dingung nicht.

30 Gemäß einer Ausführungsvariante unterteilt jede Tangente an mindestens einem  
insgesamt mindestens 20%, insbesondere mindestens 50% oder mindestens

70%, des bogenförmigen Streifens umfassenden Abschnitt des bogenförmigen Streifens die Pupille in jeweils zwei Teile, deren Flächen sich höchstens um den Faktor zwanzig, insbesondere höchstens um den Faktor zehn oder höchstens um den Faktor fünf, unterscheiden. Ein entlang des Randes der Pupille verlaufender Streifen erfüllt beispielsweise diese Anforderung nicht.

Unter einer Weglänge ist in diesem Text immer eine optische Weglänge zu verstehen. Die optische Weglänge innerhalb eines optischen Elements ist das Produkt aus geometrischer Weglänge und Brechzahl.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform ist eine Weglängendifferenz eines Pupillenpunktes in der Pupillenebene für einen Feldpunkt in der Detektionsebene durch die Differenz zwischen einer Prüflingsweglänge und einer Referenzweglänge definiert, bei der die Prüflingsweglänge die von der Strahlung der Prüfwelle von dem Pupillenpunkt bis zu dem Feldpunkt in der Detektionsebene durchlaufene Weglänge und die Referenzweglänge die von der Strahlung der Referenzwelle von dem Pupillenpunkt bis zu dem Feldpunkt in der Detektionsebene durchlaufene Weglänge ist. Dabei verläuft der Streifen, insbesondere der zusammenhängende Flächenbereich der Intensitätsverteilung der Beleuchtungswelle in der Pupillenebene, entlang einer Höhenlinie der Weglängendifferenz des Feldpunktes. Höhenlinien der Weglängendifferenz sind Linien, die sich aus Punkten mit gleicher Weglängendifferenz zusammensetzen. Insbesondere ist die winkelaufgelöste Intensitätsverteilung der Beleuchtungswelle in der Pupillenebene derart konfiguriert, dass der bogenförmige Streifen für mehrere Feldpunkte, insbesondere für die Mehrheit der Feldpunkte in dem Bereich der Detektionsebene, in dem das Mehrstreifeninterferenzmuster erzeugt wird, entlang der Höhenlinie der Weglängendifferenz verläuft.

Gemäß einer Ausführungsvariante verlaufen mehrere Streifen der vorstehend genannten Art in der Pupillenebene entlang von Höhenlinien der Weglängendifferenz des Feldpunktes, wobei sich die Höhenlinien um ganzzahlige Vielfache der Wellenlänge der Beleuchtungswelle unterscheiden.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform umfasst die Intensitätsverteilung in der Pupillenebene mehrere Streifen der vorstehend genannten Art, insbesondere mehrere Streifen wie etwa bogenförmige Streifen in einer der vorstehend beschriebenen Ausführungsformen. Gemäß einer Ausführungsvariante umfasst die Intensitätsverteilung drei, vier, fünf oder mehr Streifen, insbesondere zusammenhängende Flächenbereiche. Jeder der Streifen kann die vorstehend bezüglich unterschiedlicher Ausführungsformen genannten Eigenschaften aufweisen.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform ist das Interferometer dazu konfiguriert, die Prüfwelle nach Wechselwirkung mit der optischen Oberfläche und die Referenzwelle in einen überlagerten Strahlengang zusammenzuführen, in dem die Referenzwelle gegenüber der Prüfwelle um einen Kippwinkel  $\beta$  verkippt ist, für den gilt:  $\beta > 100 \cdot \lambda / D$ , wobei  $\lambda$  die Wellenlänge der Beleuchtungswelle und  $D$  der Strahldurchmesser der Referenzwelle am Ort der Zusammenführung in den überlagerten Strahlengang mit der Prüfwelle ist. Gemäß einer Ausführungsform entspricht  $D$  auch dem Strahldurchmesser der Beleuchtungswelle am Ort der Aufspaltung der Beleuchtungswelle in die Prüfwelle und die Referenzwelle. Insbesondere kann der Kippwinkel größer als  $200 \cdot \lambda / D$  oder größer als  $500 \cdot \lambda / D$  sein. Der Strahldurchmesser der Beleuchtungswelle am Ort der Aufspaltung kann dem Durchmesser einer im Strahlengang der Beleuchtungswelle angeordneten Anpassungsoptik zum Anpassen der Wellenfront der Beleuchtungswelle an eine Sollform der optischen Oberfläche des Prüflings entsprechen. Diese Anpassungsoptik kann als ein Kollimator ausgebildet sein, welcher vor der Wechselwirkung der Beleuchtungswelle mit der Oberfläche des Prüflings angeordnet ist.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform umfasst das Interferometer ein Aufspaltungselement zum Aufspalten der Beleuchtungswelle in die Prüfwelle und die Referenzwelle und ist weiterhin dazu konfiguriert, die Prüfwelle nach Wechselwirkung mit der optischen Oberfläche und die Referenzwelle in einen überlagerten Strahlengang zusammen zu führen, in dem die Referenzwelle gegenüber der Prüfwelle um einen Kippwinkel  $\beta$  verkippt ist. Weiterhin ist das Beleuchtungs-

dul dazu konfiguriert, dass die Intensitätsverteilung in der Pupillenebene in mindestens einer Richtung eine Ausdehnung  $L_{Bel}$  aufweist, für die gilt:

$$L_{Bel} > \lambda \cdot \frac{f}{l \cdot \beta}, \text{ wobei } \lambda \text{ die Wellenlänge der Beleuchtungswelle, } f \text{ ein Abstand}$$

zwischen der Pupillenebene des Beleuchtungsmoduls und einer Anpassungsoptik  
5 des Interferometers zum Anpassen der Wellenfront der Beleuchtungswelle an  
eine Sollform der optischen Oberfläche des Prüflings, und  $l$  ein Abstand zwischen  
dem Aufspaltungselement und der optischen Oberfläche des Prüflings ist. Gemäß  
einer Ausführungsvariante weist die Intensitätsverteilung in der Pupillenebene in  
mindestens einer Richtung eine Ausdehnung  $L_{Bel}$  von größer als 1 mm, insbeson-  
10 dere von größer als 2 mm oder von größer als 5 mm auf. Die Anpassungsoptik  
kann als ein Kollimator ausgebildet sein, welcher vor der Wechselwirkung der Be-  
leuchtungswelle mit der Oberfläche des Prüflings angeordnet ist.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform ist die Intensitätsverteilung in der Pupil-  
15 lenebene derart konfiguriert, dass das Mehrstreifeninterferenzmuster zumindest in  
einem Bereich einen Kontrast von mindestens 50% aufweist. Insbesondere weist  
das Mehrstreifeninterferenzmuster zumindest in einem Bereich einen Kontrast  
von mindestens 60%, mindestens 70% oder mindestens 80% auf. Der Bereich  
des Mehrstreifeninterferenzmusters mit dem genannten Kontrast liegt vorzugs-  
20 weise in der Mitte des Interferenzmusters. Vorzugsweise weist der gesamte Be-  
reich des Mehrstreifeninterferenzmusters den genannten Kontrast auf, wobei die-  
ser Bereich z.B. mindestens 10%, mindestens 20% oder mindestens 50% der  
Fläche des gesamten Mehrstreifeninterferenzmusters umfassen kann. Der Kon-  
trast  $K$  eines Mehrstreifeninterferenzmusters ist in diesem Text wie folgt definiert:

$$K = \frac{I_K - I_D}{I_K + I_D}, \text{ wobei } I_K \text{ die Intensität von Streifen mit konstruktiver Interferenz}$$

und  $I_D$  die Intensität von angrenzenden Streifen mit destruktiver Interferenz ist.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform ist die Intensitätsverteilung derart konfi-  
guriert, dass die der Pupillenebene zugeordnete Pupille des Beleuchtungsmoduls

zu höchstens 70%, insbesondere zu höchstens 50% oder zu höchstens 30% und insbesondere zu mindestens 10% oder zu mindestens 20%, ausgeleuchtet ist.

Unter einer anteiligen Ausleuchtung der Pupille ist zu verstehen, dass nur der genannte Anteil der Pupille mit einer nennenswerten Intensität bestrahlt wird, wobei  
5 unter der nennenswerten Intensität eine Intensität verstanden werden kann, die kleiner als 10%, insbesondere kleiner als 5%, der maximalen Intensität in der Pupille ist.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform umfasst das Beleuchtungsmodul einen  
10 räumlichen Lichtmodulator zur Erzeugung der Intensitätsverteilung in der Pupillenebene. Derartige räumliche Lichtmodulatoren, auch SLM (engl. „spatial light modulator“) bezeichnet, sind vom Prinzip her z.B. aus Beamern bekannt und können elektronisch angesteuert werden. Gegenüber der Verwendung von z.B. einer mechanischen Blende ermöglichen derartige räumliche Lichtmodulatoren eine  
15 hohe Lichtausbeute, die beinahe 100% betragen kann. Die Verwendung eines ansteuerbaren räumlichen Lichtmodulators ermöglicht eine variable Einstellung der Intensitätsverteilung in der Pupillenebene.

Gemäß einer Ausführungsform umfasst das Beleuchtungsmodul weiterhin eine in  
20 der Pupillenebene angeordnete und im Betrieb rotierende Streuscheibe zum Herstellen von Inkohärenz.

Weiterhin wird erfindungsgemäß ein Verfahren zur interferometrischen Bestimmung einer Form einer optischen Oberfläche eines Prüflings bereitgestellt, bei  
25 dem eine Beleuchtungswelle mittels eines Beleuchtungsmoduls erzeugt wird sowie die Beleuchtungswelle mittels eines Interferometers in eine auf die optische Oberfläche gerichtete Prüfwelle und eine Referenzwelle aufgespalten wird, welche derart zueinander verkippt sind, dass durch deren Überlagerung in einer Detektionsebene des Interferometers ein Mehrstreifeninterferenzmuster erzeugt  
30 wird, wobei die Beleuchtungswelle derart erzeugt wird, dass deren Intensitätsverteilung in einer, in der Fourierebene der Detektionsebene angeordneten Pupillenebene einen oder mehrere räumlich isolierte, zusammenhängende und derart

konfiguriert Flächenbereiche umfasst, dass ein an den Flächenbereich bzw. die Gesamtheit der Flächenbereiche angepasstes Rechteck mit kleinstmöglicher Fläche ein Aspektverhältnis von mindestens 1,5:1 aufweist.

5 Die bezüglich der vorstehend aufgeführten Ausführungsformen, Ausführungsbeispiele bzw. Ausführungsvarianten, etc. der erfindungsgemäßen Messvorrichtung angegebenen Merkmale können entsprechend auf das erfindungsgemäße Verfahren übertragen werden. Diese und andere Merkmale der erfindungsgemäßen Ausführungsformen werden in der Figurenbeschreibung und den Ansprüchen  
10 erläutert. Die einzelnen Merkmale können entweder separat oder in Kombination als Ausführungsformen der Erfindung verwirklicht werden. Weiterhin können sie vorteilhafte Ausführungsformen beschreiben, die selbstständig schutzfähig sind und deren Schutz ggf. erst während oder nach Anhängigkeit der Anmeldung beansprucht wird.

15

#### Kurzbeschreibung der Zeichnungen

Die vorstehenden, sowie weitere vorteilhafte Merkmale der Erfindung werden in  
20 der nachfolgenden detaillierten Beschreibung beispielhafter erfindungsgemäßer Ausführungsformen unter Bezugnahme auf die beigefügten schematischen Zeichnungen veranschaulicht. Es zeigt:

Fig. 1 ein Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Messvorrichtung zur  
25 interferometrischen Bestimmung einer Form einer optischen Oberfläche eines Prüflings,

Fig. 2 eine Darstellung einer Verteilung einer Weglängendifferenz zwischen einer Prüflingsweglänge und einer Referenzweglänge in der Messvorrichtung gemäß  
30 Fig. 1,

Fig. 3 ein Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Intensitätsverteilung in einer Beleuchtungspupillenebene der Messvorrichtung gemäß Fig. 1,

Fig. 4. einen Intensitätsverlauf in einem mittels der Intensitätsverteilung gemäß Fig. 3 erzeugten Mehrstreifeninterferogramm,

Fig. 5 ein weiteres Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Intensitätsverteilung in der Beleuchtungspupillenebene der Messvorrichtung gemäß Fig. 1 sowie einen Intensitätsverlauf in einem mittels dieser Intensitätsverteilung erzeugten Mehrstreifeninterferogramm,

Fig. 6 ein weiteres Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Intensitätsverteilung in der Beleuchtungspupillenebene der Messvorrichtung gemäß Fig. 1 sowie einen Intensitätsverlauf in einem mittels dieser Intensitätsverteilung erzeugten Mehrstreifeninterferogramm,

Fig. 7 ein weiteres Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Intensitätsverteilung in der Beleuchtungspupillenebene der Messvorrichtung gemäß Fig. 1,

Fig. 8 ein weiteres Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Intensitätsverteilung in der Beleuchtungspupillenebene der Messvorrichtung gemäß Fig. 1,

Fig. 9 ein weiteres Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Intensitätsverteilung in der Beleuchtungspupillenebene der Messvorrichtung gemäß Fig. 1,

Fig. 10 ein weiteres Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Intensitätsverteilung in der Beleuchtungspupillenebene der Messvorrichtung gemäß Fig. 1,

Fig. 11 ein Ausführungsbeispiel eines Beleuchtungsmoduls für die Messvorrichtung gemäß Fig. 1,

Fig. 12 ein weiteres Ausführungsbeispiel eines Beleuchtungsmoduls für die Messvorrichtung gemäß Fig. 1, sowie

Fig. 13 Vergleichsbeispiele für Intensitätsverteilungen in der Beleuchtungspupillenebene sowie Intensitätsverläufe für damit erzeugte Mehrstreifeninterferogramme.

#### Detaillierte Beschreibung erfindungsgemäßer Ausführungsbeispiele

In den nachstehend beschriebenen Ausführungsbeispielen bzw. Ausführungsformen oder Ausführungsvarianten sind funktionell oder strukturell einander ähnliche Elemente soweit wie möglich mit den gleichen oder ähnlichen Bezugszeichen versehen. Daher sollte zum Verständnis der Merkmale der einzelnen Elemente eines bestimmten Ausführungsbeispiels auf die Beschreibung anderer Ausführungsbeispiele oder die allgemeine Beschreibung der Erfindung Bezug genommen werden.

Zur Erleichterung der Beschreibung ist in der Zeichnung ein kartesisches xyz-Koordinatensystem angegeben, aus dem sich die jeweilige Lagebeziehung der in den Figuren dargestellten Komponenten ergibt. In Fig. 1 verläuft die x-Richtung senkrecht zur Zeichenebene in diese hinein, die z-Richtung nach rechts und die y-Richtung nach oben.

Fig. 1 veranschaulicht eine interferometrische Messvorrichtung 10 in einer Ausführungsform nach der Erfindung. Die Messvorrichtung 10 ist geeignet zum Bestimmen einer Abweichung einer tatsächlichen Form von einer Sollform einer optischen Oberfläche 12 eines Prüflings, woraus sich die tatsächliche Form der optischen Oberfläche 12 ergibt. Der Prüfling 14 kann beispielsweise in Gestalt einer optischen Linse oder eines Spiegels, insbesondere eines Projektionsobjektivs einer Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie, vorliegen. Im Fall eines Spiegels kann es sich um ein optisches Element einer EUV-Projektions-

belichtungsanlage handeln. Der Prüfling 14 ist mittels einer nicht zeichnerisch dargestellten Halterung montiert.

Die Messvorrichtung 10 umfasst ein Beleuchtungsmodul 16, ein Interferometer 18  
5 sowie eine Auswerteeinrichtung 20. Das Beleuchtungsmodul 16 umfasst eine Strahlungsquelle 22 zum Erzeugen einer Messstrahlung 24, z.B. in Gestalt eines Lasers, wie etwa eines Helium-Neon-Lasers zum Erzeugen eines Laserstrahls. Die Messstrahlung 24 weist ausreichend kohärentes Licht zur Durchführung einer interferometrischen Messung auf. Im Falle eines Helium-Neon-Lasers beträgt die  
10 Wellenlänge der Messstrahlung 24 etwa 633 nm. Die Wellenlänge der Messstrahlung kann aber auch andere Wellenlängen im sichtbaren und nicht sichtbaren Wellenlängenbereich elektromagnetischer Strahlung aufweisen.

Die Messstrahlung 24 wird von einer fokussierenden Optik 26 auf eine in einer  
15 Pupillenebene 28 des Beleuchtungsmoduls 16 angeordnete mechanische Beleuchtungsblende 30 derart fokussiert, dass eine divergente, im Wesentlichen sphärische Beleuchtungswelle 34 von der Beleuchtungsblende 30 ausgeht. Die Beleuchtungsblende 30 weist grundsätzlich einen zum Durchtritt der Messstrahlung 24 vorgesehenen Blendenöffnungsbereich auf, welcher die Pupille 31 des  
20 Beleuchtungsmoduls 16 definiert und im gezeigten Fall kreisförmig ist. Weiterhin ist im Bereich der Pupillenebene, d.h. unmittelbarer Nähe der Ebene der Beleuchtungsblende 30 ist eine Streuscheibe 32 angeordnet, welche im Messbetrieb um eine Drehachse 33 rotiert wird. Diese dient dazu, die wechselseitige Phase zwischen verschiedenen Punkten der Pupille 31 zu randomisieren.

25 Das Interferometer 18 ist als Fizeau-Interferometer ausgelegt und umfasst einen Strahlteiler 40, eine Anpassungsoptik 42 in Gestalt einer fokussierenden Optik bzw. eines Kollimators, ein Aufspaltungselement 46 sowie ein Detektionsmodul 54 in Gestalt einer Kamera.

30 Der divergente Strahl der Beleuchtungswelle 34 durchläuft zunächst den Strahlteiler 40 und wird daraufhin von der Anpassungsoptik 42 derart kollimiert, dass die

Wellenfront eine Form erhält, welche an die Sollform der zu prüfenden optischen Oberfläche 12 angepasst ist, d.h. der Sollform im Wesentlichen entspricht oder an diese angenähert ist. So kann die Wellenfront der Beleuchtungswelle 34 nach Durchlaufen der Anpassungsoptik 42 z.B. eine ebene oder eine sphärische Form aufweisen. Die Anpassungsoptik 42 kann auch diffraktive optische Elemente enthalten, um der Wellenfront der Beleuchtungswelle z.B. eine asphärische Form zu geben. Die Beleuchtungswelle 34 breitet sich entlang einer optischen Achse 44 des Interferometers 18 aus, welche in Fig. 1 in z-Richtung verläuft.

Daraufhin trifft die Beleuchtungswelle 34 auf das Aufspaltungselement 46 in Gestalt eines Fizeauelements mit einer Fizeaufläche 48. Ein Teil der Strahlung der Beleuchtungswelle 34 wird als Referenzwelle 52 an der Fizeaufläche 48 reflektiert. Die Referenzwelle 52 wird in Fig. 1 anhand eines beispielhaften Strahls der Referenzwelle dargestellt. Die das Aufspaltungselement 46 durchlaufende Strahlung der Beleuchtungswelle 19 trifft als Prüfwelle 50 auf die optische Oberfläche 12 des Prüflings 14. Vorzugsweise erfolgt dies in Autokollimation, sodass die Prüfwelle 50 nach Wechselwirkung mit der optischen Oberfläche 12, im Wesentlichen in sich selbst zurückläuft. Die Wechselwirkung mit der optischen Oberfläche 12 kann im in Fig. 1 dargestellten Fall, bei dem der Prüfling 14 als Spiegel ausgeführt ist, durch Reflexion an der optischen Oberfläche 12 erfolgen. Im Fall einer Ausführung des Prüflings als Linse kann die Wechselwirkung im doppelten Durchtritt und Rückreflexion mit einem zusätzlichen reflektiven Element erfolgen.

Das Aufspaltungselement 46 ist verkippt angeordnet. Die Verkipfung ist derart, dass die Fizeaufläche 48 gegenüber der Normalebene 44N bezüglich der optischen Achse 44 um den Kippwinkel  $\beta/2$  verkippt ist. Die durch den Kippwinkel  $\beta/2$  bezeichnete Verkipfung betrifft in der vorliegenden Ausführungsform eine Verkipfung um eine Kippachse, welche jeweils im  $45^\circ$ -Winkel zur x- und zur y-Achse angeordnet ist, d.h. der in Fig. 1 gezeigte Kippwinkel  $\beta/2$  weist neben der in der Figur sichtbaren x-Komponente zusätzlich eine gleich große y-Komponente auf. Hierbei wird unter der x- bzw. der y-Komponente eines Winkels jeweils diejenige Winkelkomponente verstanden, welche eine Winkeldrehung um die x-Achse bzw.

die y-Achse betrifft. Die nach der Wechselwirkung mit der optischen Oberfläche 12 rücklaufende Prüfwelle 50 durchläuft das Aufspaltungselement 46 ohne dabei eine Richtungsänderung zu erfahren und wird damit mit der Referenzwelle 52 in einen überlagerten Strahlengang zusammengeführt, in dem aufgrund der o.g.

5 Verkipfung der Fizeaufläche 48 die Referenzwelle 52 gegenüber der rücklaufenden Prüfwelle 50 um den Kippwinkel  $\beta$  verkippt ist. Gemäß einer Ausführungsform gilt für den Kippwinkel  $\beta$ :

$$\beta > 100 \cdot \lambda / D .$$

10

Dabei ist  $\lambda$  die Wellenlänge der Beleuchtungswelle 34 und D der Strahldurchmesser der Referenzwelle 52 am Ort der Zusammenführung in den überlagerten Strahlengang mit der Prüfwelle 50, d.h. am Ort des Aufspaltungselements 46. D entspricht in der Ausführungsform gemäß Fig. 1 dem Durchmesser der Anpassungsoptik 42. Gemäß einem Zahlenbeispiel ist  $\lambda = 633 \text{ nm}$ ,  $D = 200 \text{ mm}$  und damit  $\beta > 0,32 \text{ mrad}$ .

15

Die nach der Wechselwirkung mit der optischen Oberfläche 12 rücklaufende Prüfwelle 50 wird zusammen mit der verkippten Referenzwelle 52 vom Strahlteiler 40 in das Detektionsmodul 54 gelenkt. Das Detektionsmodul 54 umfasst eine in einer Pupillenebene des Detektionsmoduls 54 angeordnete Abbildungsblende 56, ein Kameraobjektiv 58 sowie einen zweidimensional auflösenden Detektor 60. Die rücklaufende Prüfwelle 50 interferiert mit der Referenzwelle 52 auf einer in einer Detektionsebene 62 angeordneten Erfassungsfläche des Detektors 60. Aufgrund der durch Schrägstellung der Aufspaltungselementes 46 bewirkten Verkipfung der Referenzwelle 52 gegenüber der rücklaufenden Prüfwelle 50 um den Kippwinkel  $\beta$  handelt es sich bei der auf der Erfassungsfläche des Detektors 60 erzeugten Intensitätsverteilung  $I_0(x,y)$  um ein Mehrstreifeninterferenzmuster 66.

20

25

30

Allgemein ist unter einem Mehrstreifeninterferenzmuster in diesem Text ein Interferenzmuster zu verstehen, welches mindestens eine volle Periode von sich abwechselnden Streifen konstruktiver und destruktiver Interferenz umfasst. Unter

einer vollen Periode ist zu verstehen, dass die Phasendifferenz zwischen den interferierenden Wellen entlang des Mehrstreifeninterferenzmusters alle Werte zwischen 0 und  $2\pi$  einnimmt. Mit anderen Worten ist unter einem Mehrstreifeninterferenzmuster ein Interferenzmuster mit mindestens zwei Streifen zu verstehen, wobei die Streifen helle Streifen (konstruktive Interferenz) oder dunkle Streifen (destruktive Interferenz) sein können. Im in Fig. 1 gezeigten Mehrstreifeninterferenzmuster 66 sind jeweils mehr als dreißig helle und dunkle Streifen enthalten. Anhand des Mehrstreifeninterferenzmusters 66 ermittelt die Auswerteeinrichtung 20 die Abweichung der Form der optischen Oberfläche 12 des Prüflings von der vorbekannten Wellenfront der Prüfwelle 34 und damit die tatsächliche Form der optischen Oberfläche 12.

Die Intensitätsverteilung  $I_P(u,v)$  in der Pupillenebene 28 des Beleuchtungsmoduls 16 ist durch eine entsprechende Gestaltung der Beleuchtungsblende 30 konfiguriert. Wie aus der in Fig. 1 enthaltenen beispielhaften Darstellung von  $I_P(u,v)$  ersichtlich, weist diese einen räumlich isolierten, zusammenhängenden Flächenbereich 38 in Gestalt eines bogenförmigen Streifens 38-1 mit einer vorgegebenen Schwellwert überschreitender Intensität auf. Die Beleuchtungsblende 30 lässt also lediglich im Bereich des bogenförmigen Streifens 38-1 die Messstrahlung 24 durch, in der restlichen Fläche der die maximale Blendenöffnung definierenden Pupille 31 hingegen wird die Messstrahlung von der Beleuchtungsblende 30 abgeblockt. Die Pupillenebene 28 des Beleuchtungsmoduls 16 ist wie auch die Ebene der Abbildungsblende 56 des Detektionsmoduls in einer Fourierebene der Detektionsebene 62 angeordnet. Wie aus der in Fig. 1 enthaltenen Darstellung der Intensitätsverteilung  $I_D(u,v)$  innerhalb eines Blendenöffnungsbereichs 64 der Abbildungsblende 56 hervorgeht, ist das Intensitätsprofil der Referenzwelle 52 gegenüber dem Intensitätsprofil der rücklaufende Prüfwelle 50 in der Pupillenebene des Detektionsmoduls 54 schräg nach unten verschoben. Dies liegt an der vorstehend beschriebenen Verkippung der Referenzwelle 52 gegenüber der rücklaufenden Prüfwelle 50 um den Kippwinkel  $\beta$ .

Die Konfigurierung der Intensitätsverteilung  $I_P(u,v)$  mit dem bogenförmigen Streifen ermöglicht die Erzeugung einen hohen Kontrasts im Mehrstreifeninterferenzmuster 66 bei gleichzeitiger Unterdrückung von Störungen, die auf Defekte auf den optischen Flächen des Interferometers 18 zurückgehen, wie nachstehend  
5 genauer beschrieben.

Die Figuren 3, 5, 6, 7,8, 9 und 10 zeigen weitere konkrete erfindungsgemäße Ausführungsformen der Intensitätsverteilung  $I_P(u,v)$  in der Pupillenebene 28 des Beleuchtungsmoduls 16, welche an die Stelle der in Fig. 1 veranschaulichten In-  
10 tensitätsverteilung treten können. Die Intensitätsverteilung  $I_P(u,v)$  gemäß Fig. 3 weist einen räumlich isolierten, zusammenhängenden Flächenbereich 38 in Gestalt eines bogenförmigen Streifens 38-1 auf, der entlang einer Höhenlinie einer in Fig. 2 veranschaulichten Weglängendifferenzverteilung  $\Delta OP(u,v)$  verläuft. Dabei erstreckt sich der bogenförmige Streifen 38-1 mit beiden Enden jeweils bis zum  
15 einem entsprechenden Abschnitt des ringförmigen Rands 31R der Pupille 31.

Die in Fig. 2 dargestellte Weglängendifferenzverteilung  $\Delta OP(u,v)$  zeigt die Verteilung einer Weglängendifferenz in der Pupille 31 für einen vorgegebenen Feldpunkt 62p in der Detektionsebene 62, welcher durch die Differenz zwischen einer  
20 Prüflingsweglänge und einer Referenzweglänge definiert ist. Dabei ist die Prüflingsweglänge die von der Strahlung der Prüfwelle 50 von einem gegebenen Punkt der Pupille 31 bis zu dem Feldpunkt 62p in der Detektionsebene 62 durchlaufene Weglänge und die Referenzweglänge die von der Strahlung der Referenzwelle 52 von dem genannten Punkt der Pupille 31 bis zu dem Feldpunkt 62p  
25 in der Detektionsebene durchlaufene Weglänge. Die jeweilige Weglänge erstreckt sich also von der Pupillenebene 28 bis zur Detektionsebene 62, wobei der Abschnitt im Bereich zwischen Pupillenebene 28 und dem Aufspaltungselement 46 von der Beleuchtungswelle 34 zurückgelegt wird, welche jeweils Strahlung für die Prüfwelle 50 sowie die Referenzwelle 52 liefert. In der in Fig. 1 dargestellten Weg-  
30 längendifferenzverteilung  $\Delta OP(u,v)$  sind Höhenlinien 67, d.h. Linien mit gleicher Weglängendifferenz, für Weglängendifferenzen ganzzahliger  $\lambda$ -Werte eingezeichnet.

Der in Fig. 3 dargestellte bogenförmige Streifen 38-1 der Intensitätsverteilung  $I_p(u,v)$  der Beleuchtungswelle 34 in der Pupillenebene 28 verläuft entlang der Höhenlinie 67 mit der Weglängendifferenz  $2\lambda$  der Weglängendifferenzverteilung  $\Delta OP(u,v)$  gemäß Fig. 2. Dabei ist der bogenförmige Streifen 38-1 derart konfiguriert, dass jede beliebige Tangente an dem Streifen 38-1 die Pupille 31 in zwei Teile unterteilt, deren Flächen sich höchstens um den Faktor 3 unterscheiden. Zur Veranschaulichung dieses Sachverhalts sind in Fig. 3 beispielhaft jeweils am äußeren Rand des Streifens 38-1 anliegende Tangenten t1 bis t5 eingezeichnet. Dabei sind die Tangenten t1 und t5 am jeweiligen Ende und die Tangente t3 in der Mitte des Streifens 38-1 angeordnet. Die Tangenten t2 und t4 sind am jeweiligen Ende eines 20% des Streifens 38-1 umfassenden mittigen Abschnitts 38-1m des Streifens 38 angeordnet.

Wie weiterhin in Fig. 3 veranschaulicht, teilt die Tangente t1 die Pupille 31 in einen oberen Abschnitt mit der Fläche A1 und einen unteren Abschnitt mit der Fläche A2, wobei das Verhältnis  $A1/A2$  etwa 1:2,7 beträgt. Das gleiche Verhältnis ergibt sich für t5. Für die mittlere Tangente t3 beträgt das Verhältnis etwa 1:1,2. Damit liegt das Verhältnis  $A1/A2$  für jede beliebige Tangente an dem Streifen 38 im Bereich zwischen etwa 1:1,2 und 1:2,7, d.h. die Flächen unterscheiden sich um einen Faktor, der zwischen 1,2 und 2,7 liegt. Für den mittigen Abschnitt 38-1m ist der Bereich weiter eingeschränkt. Gemäß einer weiteren Ausführungsform ist der bogenförmige Streifen 38 dadurch gekennzeichnet, dass zumindest eine Tangente existiert, für die sich die Flächen A1 und A2 höchstens um den Faktor 20 unterscheiden. Gemäß einer weiteren Ausführungsform ist der bogenförmige Streifen 38-1 dadurch gekennzeichnet, dass für jede Tangente an einem mindestens 20% des Streifens 38-1 umfassenden Abschnitt, beispielsweise dem mittigen Abschnitt 38-1m, die Flächen A1 und A2 sich um höchstens den Faktor 20 unterscheiden.

Gemäß einer Ausführungsform gilt für eine Ausdehnung  $L_{Bel}$  des bogenförmigen Streifens 38-1 in der Pupillenebene 28 in mindestens einer Richtung:

$$L_{Bel} > \lambda \cdot \frac{f}{l \cdot \beta}$$

Hierbei ist  $\lambda$  die Wellenlänge der Beleuchtungswelle 34,  $f$  der Abstand zwischen  
5 der Pupillenebene 28 und der Anpassungsoptik 42, und  $l$  der Abstand zwischen  
dem Aufspaltungselement 46 und der optischen Oberfläche 12 des Prüflings.  
Gemäß einem Zahlenbeispiel ist  $\lambda = 633 \text{ nm}$ ,  $f = 1020 \text{ mm}$ ,  $l = 1000 \text{ mm}$ ,  $\beta =$   
22 mrad und damit  $L_{Bel} > 0,2973 \text{ mm}$ .

10 Weiterhin ist in Fig. 3 ein an den bogenförmigen Streifen 38-1 angepasstes  
Rechteck 74 mit kleinstmöglicher Fläche eingezeichnet. Mit anderen Worten ist  
das Rechteck 74 das flächenmäßig kleinstmögliche, den bogenförmigen Streifen  
38-1 vollständig umfassende Rechteck, d.h. es ist das flächenmäßig bestmöglich  
an den Streifen 38-1 angepasste Rechteck. Das Rechteck 74 weist eine Länge,  
15 die der vorstehend genannten Ausdehnung  $L_{Bel}$  des bogenförmigen Streifens 38  
entspricht, sowie eine Breite  $d_{Bel}$  auf. Das Aspektverhältnis des Rechtecks 74,  
welches durch das Verhältnis  $L_{Bel}/d_{Bel}$  definiert ist, beträgt im dargestellten Fall  
etwa 3:1 und ist damit größer als 1,5:1.

20 Fig. 4 zeigt den Intensitätsverlauf entlang der x-Achse in einem zentralen Bereich  
des Mehrstreifeninterferogramms 66 für die in Fig. 3 veranschaulichte Intensitäts-  
verteilung  $I_P(u,v)$  in der Pupillenebene 28. Der Kontrast dieses Intensitätsverlaufs  
beträgt etwa 67%. Damit weist dieses Mehrstreifeninterferogramm 66 ein Signal-  
zu-Rausch-Verhältnis auf, welches eine hochgenaue Auswertung und damit eine  
25 hochgenaue Bestimmung der Form der optischen Oberfläche 12 des Prüflings 14  
ermöglicht. Weiterhin ist die Ausleuchtung der Pupille 31 des Beleuchtungs-  
moduls 16 mit etwa 12% wesentlich höher als dies beispielsweise bei einer unter (c)  
von Fig. 13 gezeigten Intensitätsverteilung  $I_P(u,v)$  einer punktförmigen Beleuch-  
tung in der Pupillenebene 28 der Fall ist. Bei dieser als Vergleichsbeispiel darge-  
30 stellten Intensitätsverteilung wird zwar ein beinahe ähnlich hoher Kontrast von  
etwa 60% erzielt, jedoch beträgt die Ausleuchtung lediglich etwa 1%.

Wie vorstehend bereits erwähnt, ist die Ausleuchtung ein Maß dafür, wie gut Störungen, die auf Defekte auf den optischen Flächen des Interferometers 18 zurückgehen, unterdrückt werden können. Damit ermöglicht die Ausführung gemäß Fig. 3 eine wesentlich verbesserte Defektunterdrückung gegenüber dem unter (c) in Fig. 13 gezeigten Vergleichsbeispiel. Bei Vergrößerung der zentralen Beleuchtungsscheibe lässt sich zwar die Defektunterdrückung verbessern. Mit der unter (b) von Fig. 13 als weiteres Vergleichsbeispiel dargestellten Ausführung der Intensitätsverteilung  $I_P(u,v)$ , bei der zentrale Beleuchtung scheibenförmig ausgestaltet ist, ergibt sich mit etwa 8% eine annähernd gute Ausleuchtung wie gemäß der erfindungsgemäßen Ausführung nach Fig. 3, jedoch sinkt in diesem Fall der Kontrast auf einen Wert von etwa 11% und damit weit unter den mittels der erfindungsgemäßen Ausführung gemäß Fig. 3 erzielbaren Wert. Wird die zentrale Beleuchtungsscheibe aus der unter (b) in Fig. 13 dargestellten Intensitätsverteilung weiter vergrößert, so sinkt der Kontrast weiter, beispielsweise auf einen Wert von 4%, wie in dem unter (a) von Fig. 13 für die Ausleuchtung der gesamten Pupille dargestellten weiteren Vergleichsbeispiel.

Fig. 5 zeigt eine weitere erfindungsgemäße Ausführungsform der Intensitätsverteilung  $I_P(u,v)$  in der Pupillenebene 28 des Beleuchtungsmoduls 16. Diese Intensitätsverteilung weist mehrere bogenförmige Streifen 38-1 auf, welche entlang von Höhenlinien der in Fig. 2 veranschaulichten Weglängendifferenzverteilung  $\Delta OP(u,v)$  verlaufen. Dabei ist in dieser Ausführungsform jeder Höhenlinie mit einer ganzzahligen Wellenlängendifferenz ein bogenförmiger Streifen 38-1 zugeordnet. Gemäß weiterer Ausführungsvarianten können die bogenförmigen Streifen 38-1 gemäß Fig. 5 jeweils vorstehend bezüglich des anhand von Fig. 3 beschriebenen bogenförmigen Streifens 38-1 aufgeführte Merkmale aufweisen. Die Ausleuchtung der Pupille 31 beträgt bei der Intensitätsverteilung gemäß Fig. 5 etwa 60%, wodurch die Defektunterdrückung gegenüber der Ausführung gemäß Fig. 3 nochmals erheblich verbessert ist. Dabei ist der Kontrast des Intensitätsverlaufs im zentralen Bereich des Mehrstreifeninterferogramms 66 mit etwa 62% nur geringfügig verringert.

Fig. 6 zeigt eine weitere erfindungsgemäße Ausführungsform der Intensitätsverteilung  $I_P(u,v)$  in der Pupillenebene 28 des Beleuchtungsmoduls 16. Diese unterscheidet sich von der Intensitätsverteilung gemäß Fig. 5 darin, dass die bogenförmigen Streifen schmaler ausgebildet sind, sodass sich eine Ausleuchtung von etwa 20% ergibt. Damit lässt sich der Kontrast des Intensitätsverlaufs im zentralen Bereich des Mehrstreifeninterferogramms 66 erheblich steigern, und zwar auf etwa 90%.

Fig. 7 zeigt eine weitere erfindungsgemäße Ausführungsform der Intensitätsverteilung  $I_P(u,v)$  in der Pupillenebene des Beleuchtungsmoduls 16. Die Intensitätsverteilung  $I_P(u,v)$  gemäß Fig. 7 weist einen räumlich isolierten, zusammenhängenden Flächenbereich 38 in Gestalt eines zickzackförmigen Streifens 38-2 auf. Der zickzackförmige Streifen 38-2 weist zwei aufsteigende und zwei absteigende Abschnitte auf. Weiterhin ist in Fig. 7 ein an den zickzackförmigen Streifen 38-2 angepasstes Rechteck 74 mit kleinstmöglicher Fläche eingezeichnet. Das Rechteck 74 weist analog zum Rechteck 74 gemäß Fig. 3 eine Länge  $L_{Bel}$  sowie eine Breite  $d_{Bel}$  auf. Das Aspektverhältnis des Rechtecks 74 gemäß Fig. 7, welches durch das Verhältnis  $L_{Bel}/d_{Bel}$  definiert ist, beträgt im dargestellten Fall etwa 3:1 und ist damit größer als 1,5:1. Der zickzackförmige Streifen 38-2 ist derart angeordnet, dass die längere Symmetrieachse des ihm zugeordneten Rechtecks 74 im Wesentlichen parallel zu einer mittleren Richtung einer Höhenlinie einer in Fig. 2 veranschaulichten Weglängendifferenzverteilung  $\Delta OP(u,v)$  verläuft.

Fig. 8 zeigt eine weitere erfindungsgemäße Ausführungsform der Intensitätsverteilung  $I_P(u,v)$  in der Pupillenebene des Beleuchtungsmoduls 16. Die Intensitätsverteilung  $I_P(u,v)$  gemäß Fig. 8 weist einen räumlich isolierten, zusammenhängenden Flächenbereich 38 in Gestalt eines geraden Streifens 38-3, d.h. einer die Form einer geraden Linie aufweisenden Streifens, auf. Ein an den geraden Streifen 38-3 angepasstes Rechteck mit kleinstmöglicher Fläche entspricht dem Streifen 38-3 selbst. Der Streifen 38-3 bzw. das Rechteck weist eine Länge  $L_{Bel}$  sowie eine Breite  $d_{Bel}$  auf. Das Aspektverhältnis des geraden Streifens 38-3 gemäß Fig.

8, welches durch das Verhältnis  $L_{\text{Bel}}/d_{\text{Bel}}$  definiert ist, beträgt im dargestellten Fall etwa 3,5:1 und ist damit größer als 1,5:1. Der gerade Streifen 38-3 ist derart angeordnet, dass dessen Längserstreckung im Wesentlichen parallel zu einer mittleren Richtung einer Höhenlinie einer in Fig. 2 veranschaulichten Weglängendifferenzverteilung  $\Delta OP(u,v)$  verläuft. In der gezeigten Ausführungsform ist die Längserstreckung des geraden Streifens 38-3 quer zum Pupillenrand 31R orientiert. Dabei erstreckt sich der gerade Streifen 38-3 in der gezeigten Ausführungsform zentral innerhalb der Pupille 31 über einen Längenbereich von etwa 30-40% des Durchmessers der Pupille 31. In anderen Ausführungsformen kann sich der gerade Streifen auch über kleinere oder größere Bereiche der Pupille 31, insbesondere über die gesamte Pupille 31, d.h. von einem Bereich des Pupillenrandes 31R zu einem gegenüberliegenden Bereich des Pupillenrandes 31R, erstrecken.

Fig. 9 zeigt eine weitere erfindungsgemäße Ausführungsform der Intensitätsverteilung  $I_P(u,v)$  in der Pupillenebene des Beleuchtungsmoduls 16. Die Intensitätsverteilung  $I_P(u,v)$  gemäß Fig. 9 weist mehrere räumlich isolierte, zusammenhängende Flächenbereiche 38 auf. In der veranschaulichten Ausführungsform liegen sechs derartige Flächenbereiche, jeweils in Gestalt eines kreisförmigen Flächenbereichs 38-4, vor.

Weiterhin ist in Fig. 9 ein an die Gesamtheit der Flächenbereiche 38-4 angepasstes Rechteck 74 mit kleinstmöglicher Fläche eingezeichnet. Mit anderen Worten ist das Rechteck 74 das flächenmäßig kleinstmögliche, die Gesamtheit der Flächenbereiche 38-4 vollständig umfassende Rechteck. Das Rechteck 74 weist eine Länge, die der vorstehend genannten Ausdehnung  $L_{\text{Bel}}$  des bogenförmigen Streifens 38 entspricht, sowie eine Breite  $d_{\text{Bel}}$  auf. Das Aspektverhältnis des Rechtecks 74, welches durch das Verhältnis  $L_{\text{Bel}}/d_{\text{Bel}}$  definiert ist, beträgt im dargestellten Fall etwa 3:1 und ist damit größer als 1,5:1.

Weiterhin ist in Fig. 9 eine an die Gesamtheit der Flächenbereiche 38-4 formangepasste Überdeckungsfläche in Gestalt eines bogenförmigen Streifens 76 eingezeichnet. Mit anderen Worten entspricht der bogenförmige Streifen 76 einer

Fläche, welche die Flächenbereiche überdeckt und welche an die Form der Anordnung der Flächenbereiche 38-4 angepasst ist. Die Form der Anordnung der Flächenbereiche 38-4 kann insbesondere eine extrapolierte oder abstrahierte Anordnungsform sein. Im vorliegenden Fall entspricht der von der formangepassten Überdeckungsfläche definierte bogenförmige Streifen 76 dem vorstehend erläuterten bogenförmigen Streifen 38-1 gemäß Fig. 3. Das vorstehend erwähnte Rechteck 74 ist auch das an den bogenförmigen Streifen 76 angepasste Rechteck mit kleinstmöglicher Fläche und entspricht damit dem Rechteck 74 gemäß Fig. 3.

Fig. 10 zeigt eine weitere erfindungsgemäße Ausführungsform der Intensitätsverteilung  $I_P(u,v)$  in der Pupillenebene des Beleuchtungsmoduls 16. Die Intensitätsverteilung  $I_P(u,v)$  gemäß Fig. 10 weist mehrere räumlich isolierte, zusammenhängende Flächenbereiche 38 auf. In der veranschaulichten Ausführungsform liegen zwei derartige Flächenbereiche, jeweils die Gestalt eines kreisförmigen Flächenbereichs 38-4, vor. Die veranschaulichte Intensitätsverteilung  $I_P(u,v)$  ist damit dipolförmig.

Weiterhin ist in Fig. 10 eine an die Gesamtheit der Flächenbereiche 38-4 formangepasste Überdeckungsfläche in Gestalt eines geraden Streifens 78 eingezeichnet. Mit anderen Worten entspricht der gerade Streifen 78 einer Fläche, welche die Flächenbereiche überdeckt und an die Form der Anordnung der Flächenbereiche 38-4 angepasst ist. Im vorliegenden Fall entspricht der von der formangepassten Überdeckungsfläche definierte gerade Streifen 78 dem vorstehend erläuterten geraden Streifen 38-3 gemäß Fig. 8. Die Umgrenzung des Streifens 78 bildet weiterhin ein an die Gesamtheit der Flächenbereiche 38-4 angepasstes Rechteck mit kleinstmöglicher Fläche. Dieses weist wie der gerade Streifen 38-3 gemäß Fig. 8 ein Aspektverhältnis auf, welches durch das Verhältnis  $L_{Bel}/d_{Bel}$  definiert ist und im dargestellten Fall etwa 3,5:1 beträgt.

Die Figuren 11 und 12 zeigen weitere Ausführungsformen eines Beleuchtungsmoduls 16 welche an die Stelle des in Fig. 1 gezeigten Beleuchtungsmoduls 16

treten können. In der Ausführungsform gemäß Fig. 11 ist die mechanische Beleuchtungsblende 30 in einer zur Pupillenebene 28 konjugierten Ebene 36 angeordnet. Die Ebene 36 wird mittels einer 4f-Abbildungsoptik 70 auf die weiterhin in der Pupillenebene 28 angeordnete rotierbare Streuscheibe 32 abgebildet. In der  
5 Ausführungsform gemäß Fig. 12 wird anstatt einer mechanischen Blende ein räumlicher Lichtmodulator 68 zur Erzeugung der Intensitätsverteilung in der Pupille 31 verwendet. Der räumliche Lichtmodulator 68 wird in der gezeigten Ausführungsform in Reflexion betrieben und dazu von der Strahlungsquelle 22 schräg mit der Messstrahlung 24 angestrahlt. Die variabel reflektierte Strahlung durch-  
10 läuft daraufhin eine 2f-Abbildungsoptik, mit der die Oberfläche des Lichtmodulators 68 auf die in der Pupillenebene 28 angeordnete rotierbare Streuscheibe 32 abgebildet wird.

Die vorstehende Beschreibung beispielhafter Ausführungsformen ist exemplarisch  
15 zu verstehen. Die damit erfolgte Offenbarung ermöglicht es dem Fachmann einerseits, die vorliegende Erfindung und die damit verbundenen Vorteile zu verstehen, und umfasst andererseits im Verständnis des Fachmanns auch offensichtliche Abänderungen und Modifikationen der beschriebenen Strukturen und Verfahren. Daher sollen alle derartigen Abänderungen und Modifikationen, insoweit sie  
20 in den Rahmen der Erfindung gemäß der Definition in den beigefügten Ansprüchen fallen, sowie Äquivalente vom Schutz der Ansprüche abgedeckt sein.

**Bezugszeichenliste**

|    |       |                                 |
|----|-------|---------------------------------|
|    | 10    | Messvorrichtung                 |
|    | 12    | optische Oberfläche             |
| 5  | 14    | Prüfling                        |
|    | 16    | Beleuchtungsmodul               |
|    | 18    | Interferometer                  |
|    | 20    | Auswerteeinrichtung             |
|    | 22    | Strahlungsquelle                |
| 10 | 24    | Messstrahlung                   |
|    | 26    | fokussierende Optik             |
|    | 28    | Pupillenebene                   |
|    | 30    | Beleuchtungsblende              |
|    | 31    | Pupille des Beleuchtungsmoduls  |
| 15 | 31R   | Rand der Pupille                |
|    | 32    | Streuscheibe                    |
|    | 33    | Drehachse                       |
|    | 34    | Beleuchtungswelle               |
|    | 36    | konjugierte Ebene               |
| 20 | 38    | Flächenbereich                  |
|    | 38-1  | bogenförmiger Streifen          |
|    | 38-1m | mittiger Abschnitt              |
|    | 38-2  | zickzackförmiger Streifen       |
|    | 38-3  | gerader Streifen                |
| 25 | 38-4  | kreisförmiger Flächenbereich    |
|    | 40    | Strahlteiler                    |
|    | 42    | Anpassungsoptik                 |
|    | 44    | optische Achse                  |
|    | 44N   | Normalebene zur optischen Achse |
| 30 | 46    | Aufspaltungselement             |
|    | 48    | Fizeaufläche                    |
|    | 50    | Prüfwelle                       |

|    |     |                                      |
|----|-----|--------------------------------------|
|    | 52  | Referenzwelle                        |
|    | 54  | Detektionsmodul                      |
|    | 56  | Abbildungsblende                     |
|    | 58  | Kameraobjektiv                       |
| 5  | 60  | Detektor                             |
|    | 62  | Detektionsebene                      |
|    | 62p | Feldpunkt                            |
|    | 64  | Blendenöffnungsbereich               |
|    | 66  | Mehrstreifeninterferenzmuster        |
| 10 | 67  | Höhenlinie                           |
|    | 68  | räumlicher Lichtmodulator            |
|    | 70  | 4f-Abbildungsoptik                   |
|    | 72  | 2f-Abbildungsoptik                   |
|    | 74  | Rechteck mit kleinstmöglicher Fläche |
| 15 | 76  | bogenförmiger Streifen               |
|    | 78  | gerader Streifen                     |

## Ansprüche

1. Messvorrichtung zur interferometrischen Bestimmung einer Form einer optischen Oberfläche eines Prüflings mit:

- einem Beleuchtungsmodul zum Erzeugen einer Beleuchtungswelle,
- einem Interferometer, welches dazu konfiguriert ist, die Beleuchtungswelle in eine auf die optische Oberfläche gerichtete Prüfwelle und eine Referenzwelle zueinander derart verkippt aufzuspalten, dass durch deren Überlagerung in einer Detektionsebene des Interferometers ein Mehrstreifeninterferenzmuster erzeugt wird,

wobei das Beleuchtungsmodul eine in einer Fourierebene der Detektionsebene angeordnete Pupillenebene aufweist und das Beleuchtungsmodul dazu konfiguriert ist, die Beleuchtungswelle derart zu erzeugen, dass deren Intensitätsverteilung in der Pupillenebene einen oder mehrere, räumlich isolierte, zusammenhängende und derart konfigurierte Flächenbereiche umfasst, dass ein an den Flächenbereich bzw. an die Gesamtheit der Flächenbereiche angepasstes Rechteck mit kleinstmöglicher Fläche ein Aspektverhältnis von mindestens 1,5:1 aufweist.

2. Messvorrichtung nach Anspruch 1,

wobei die Intensitätsverteilung in der Pupillenebene mindestens den einen zusammenhängenden Flächenbereich umfasst, und der zusammenhängende Flächenbereich als Streifen gestaltet ist.

3. Messvorrichtung nach Anspruch 1,

wobei die Intensitätsverteilung in der Pupillenebene die mehreren zusammenhängenden Flächenbereiche umfasst und eine an die Gesamtheit der Flächenbereiche formangepasste Überdeckungsfläche als Streifen gestaltet ist.

4. Messvorrichtung nach Anspruch 2 oder 3,

wobei der Streifen ein bogenförmiger Streifen ist.

5. Messvorrichtung nach Anspruch 4,

wobei die der Pupillenebene zugeordnete Pupille des Beleuchtungsmoduls von einem ringförmigen Rand begrenzt wird und der bogenförmige Streifen derart konfiguriert ist, dass zumindest eine Tangente an dem Streifen existiert, welche die Pupille in zwei Teile unterteilt, deren Flächen sich höchstens um den Faktor zwanzig unterscheiden.

6. Messvorrichtung nach Anspruch 5,

wobei jede Tangente an mindestens einem, insgesamt mindestens 20% des Streifens umfassenden, Abschnitt des Streifens die Pupille in jeweils zwei Teile unterteilt, deren Flächen sich höchstens um den Faktor zwanzig unterscheiden.

7. Messvorrichtung nach Anspruch 2 oder 3,

wobei der Streifen ein gerader Streifen ist.

8. Messvorrichtung nach einem der Ansprüche 2 bis 7,

wobei die der Pupillenebene zugeordnete Pupille des Beleuchtungsmoduls von einem ringförmigen Rand begrenzt wird und der Streifen quer zum Rand der Pupille verläuft.

9. Messvorrichtung nach einem der Ansprüche 2 bis 8,

bei der die Intensitätsverteilung in der Pupillenebene mehrere Streifen der genannten Art umfasst.

10. Messvorrichtung nach einem der Ansprüche 2 bis 9,

wobei eine Weglängendifferenz eines Pupillenpunktes in der Pupillenebene für einen Feldpunkt in der Detektionsebene durch die Differenz zwischen einer Prüflingsweglänge und einer Referenzweglänge definiert ist, bei der die Prüflingsweglänge die von der Strahlung der Prüfwelle von dem Pupillenpunkt bis zu dem Feldpunkt in der Detektionsebene durchlaufene Weglänge und die Referenzweglänge die von der Strahlung der Referenzwelle von dem Pupillenpunkt bis zu dem

Feldpunkt in der Detektionsebene durchlaufene Weglänge ist, und wobei der Streifen entlang einer Höhenlinie der Weglängendifferenz des Feldpunktes verläuft.

- 5 11. Messvorrichtung nach Anspruch 10,  
bei der mehrere Streifen der genannten Art in der Pupillenebene entlang von Höhenlinien der Weglängendifferenz des Feldpunktes verlaufen, wobei sich die Höhenlinien um ganzzahlige Vielfache der Wellenlänge der Beleuchtungswelle unterscheiden.

- 10 12. Messvorrichtung nach einem der vorausgehenden Ansprüche,  
bei der das Interferometer dazu konfiguriert ist, die Prüfwelle nach Wechselwirkung mit der optischen Oberfläche und die Referenzwelle in einen überlagerten Strahlengang zusammenzuführen, in dem die Referenzwelle gegenüber der  
15 Prüfwelle um einen Kippwinkel  $\beta$  verkippt ist, für den gilt:  $\beta > 100 \cdot \lambda / D$ , wobei  $\lambda$  die Wellenlänge der Beleuchtungswelle und D der Strahldurchmesser der Referenzwelle am Ort der Zusammenführung in den überlagerten Strahlengang mit der Prüfwelle ist.

- 20 13. Messvorrichtung nach einem der vorausgehenden Ansprüche,  
bei der das Interferometer ein Aufspaltungselement zum Aufspalten der Beleuchtungswelle in die Prüfwelle und die Referenzwelle umfasst und weiterhin dazu konfiguriert ist, die Prüfwelle nach Wechselwirkung mit der optischen Oberfläche und die Referenzwelle in einen überlagerten Strahlengang zusammen zu führen,  
25 in dem die Referenzwelle gegenüber der Prüfwelle um einen Kippwinkel  $\beta$  verkippt ist, und das Beleuchtungsmodul dazu konfiguriert ist, dass die Intensitätsverteilung in der Pupillenebene in mindestens einer Richtung eine Ausdehnung  $L_{Bel}$  aufweist, für die gilt:  $L_{Bel} > \lambda \cdot \frac{f}{l \cdot \beta}$ , wobei  $\lambda$  die Wellenlänge der Beleuchtungswelle, f ein Abstand zwischen der Pupillenebene des Beleuchtungsmoduls und  
30 einer Anpassungsoptik des Interferometers zum Anpassen der Wellenfront der Beleuchtungswelle an eine Sollform der optischen Oberfläche des Prüflings, und l

ein Abstand zwischen dem Aufspaltungselement und der optischen Oberfläche des Prüflings ist.

14. Messvorrichtung nach einem der vorausgehenden Ansprüche,

5 bei der die Intensitätsverteilung in der Pupillenebene derart konfiguriert ist, dass das Mehrstreifeninterferenzmuster zumindest in einem Bereich einen Kontrast von mindestens 50% aufweist.

15. Messvorrichtung nach einem der vorausgehenden Ansprüche,

10 wobei die Intensitätsverteilung derart konfiguriert ist, dass die der Pupillenebene zugeordnete Pupille des Beleuchtungsmoduls zu höchstens 70% ausgeleuchtet ist.

16. Messvorrichtung nach einem der vorausgehenden Ansprüche,

15 bei der das Beleuchtungsmodul einen räumlichen Lichtmodulator zur Erzeugung der Intensitätsverteilung in der Pupillenebene umfasst.

17. Verfahren zur interferometrischen Bestimmung einer Form einer optischen Oberfläche eines Prüflings, bei dem:

20 - eine Beleuchtungswelle mittels eines Beleuchtungsmoduls erzeugt wird, sowie  
- die Beleuchtungswelle mittels eines Interferometers in eine auf die optische Oberfläche gerichtete Prüfwelle und eine Referenzwelle aufgespalten wird, welche derart zueinander verkippt sind, dass durch deren Überlagerung in einer Detektionsebene des Interferometers ein Mehrstreifeninterferenzmuster erzeugt  
25 wird,

wobei die Beleuchtungswelle derart erzeugt wird, dass deren Intensitätsverteilung in einer, in einer Fourierebene der Detektionsebene angeordneten Pupillenebene einen oder mehrere räumlich isolierte, zusammenhängende und derart konfigurierte Flächenbereiche umfasst, dass ein an den Flächenbereich bzw. an die Gesamtheit der Flächenbereiche angepasstes Rechteck mit kleinstmöglicher Fläche  
30 ein Aspektverhältnis von mindestens 1,5: 1 aufweist.

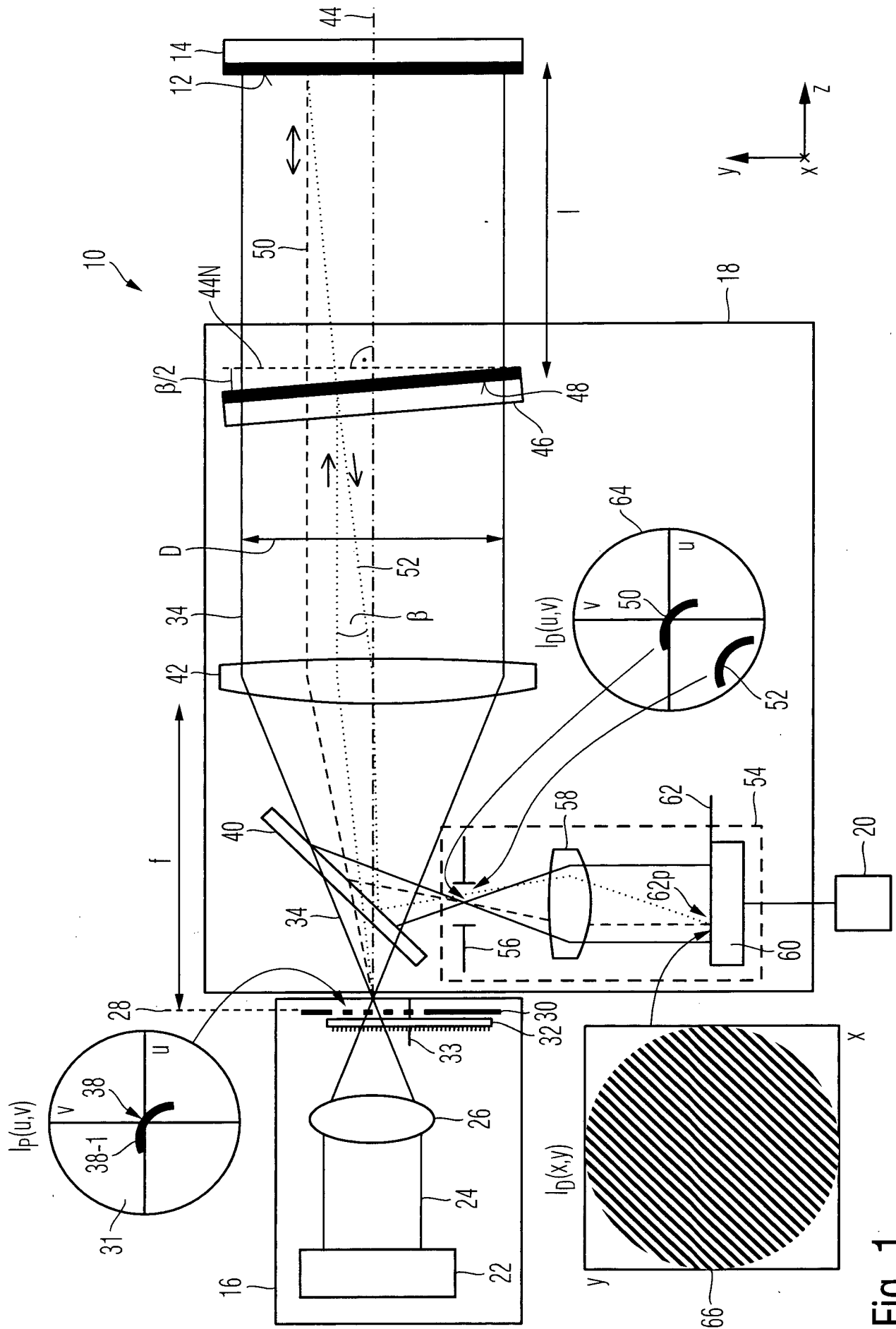


Fig. 1

2/7

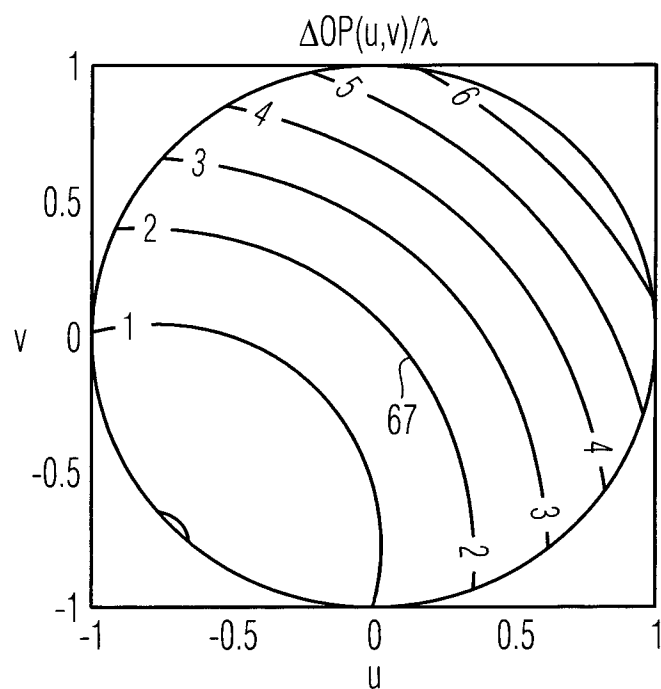


Fig. 2

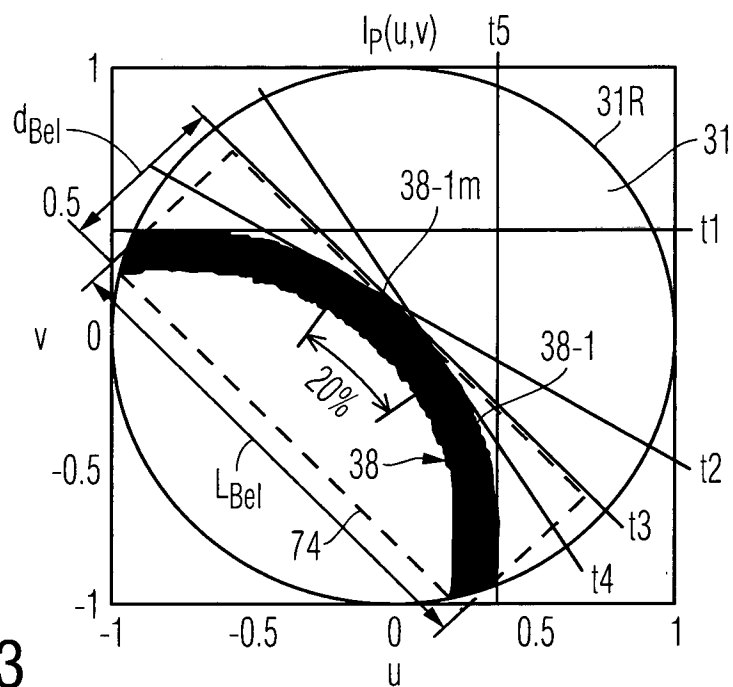


Fig. 3

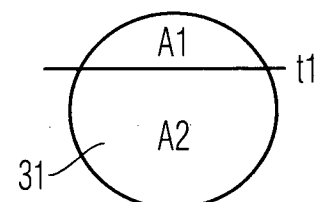
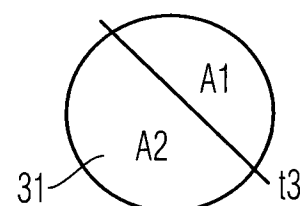
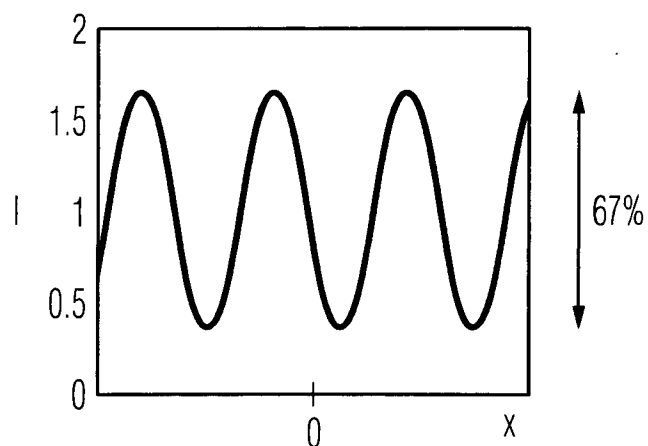
t1:  $A1/A2 \approx 1:2,7$ t3:  $A1/A2 \approx 1:1,2$ 

Fig. 4

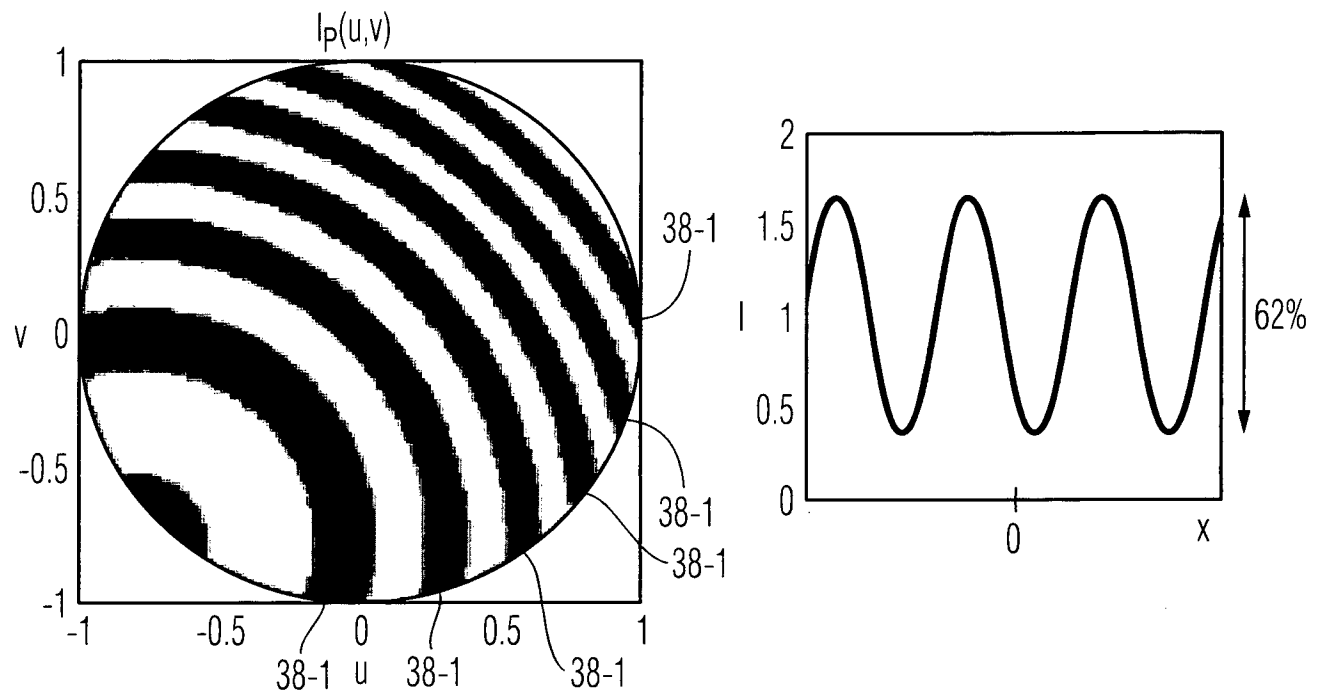


Fig. 5

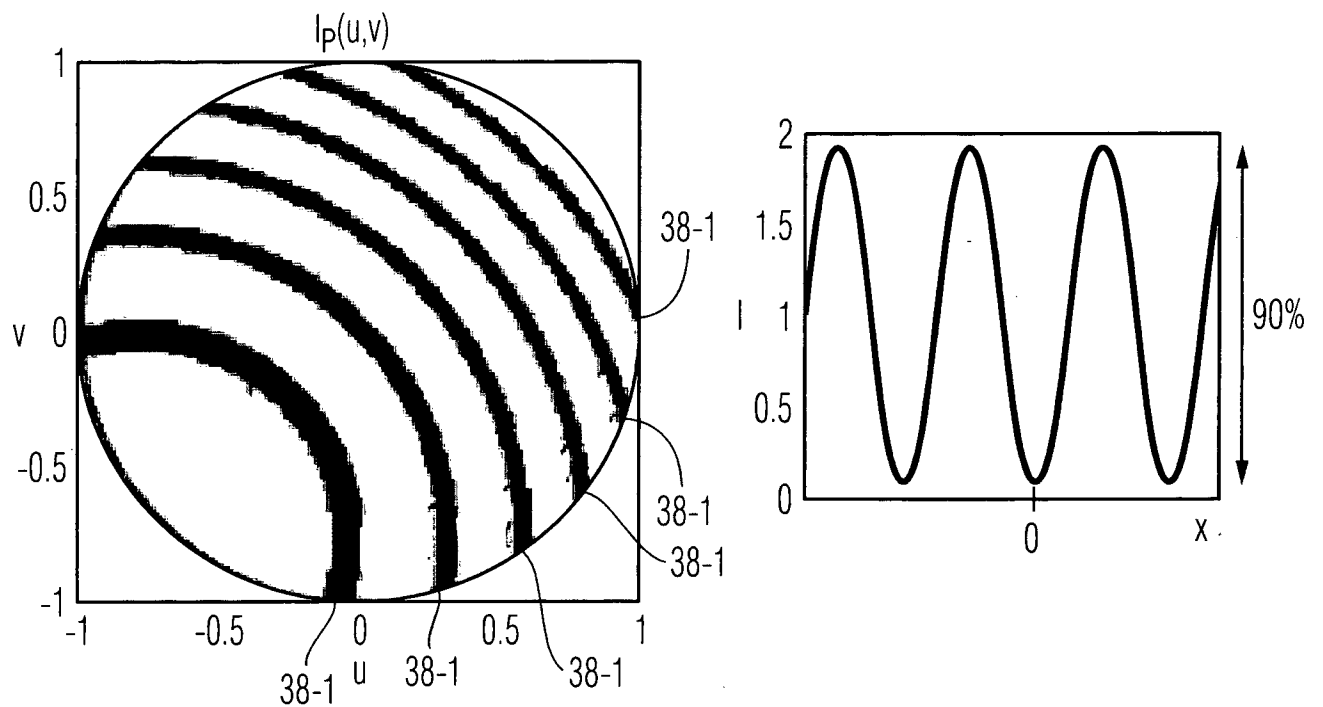


Fig. 6

4/7

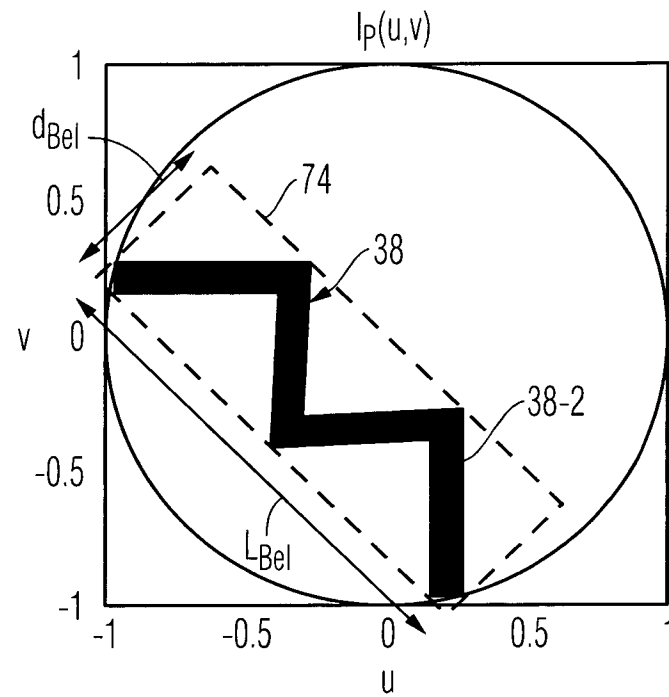


Fig. 7

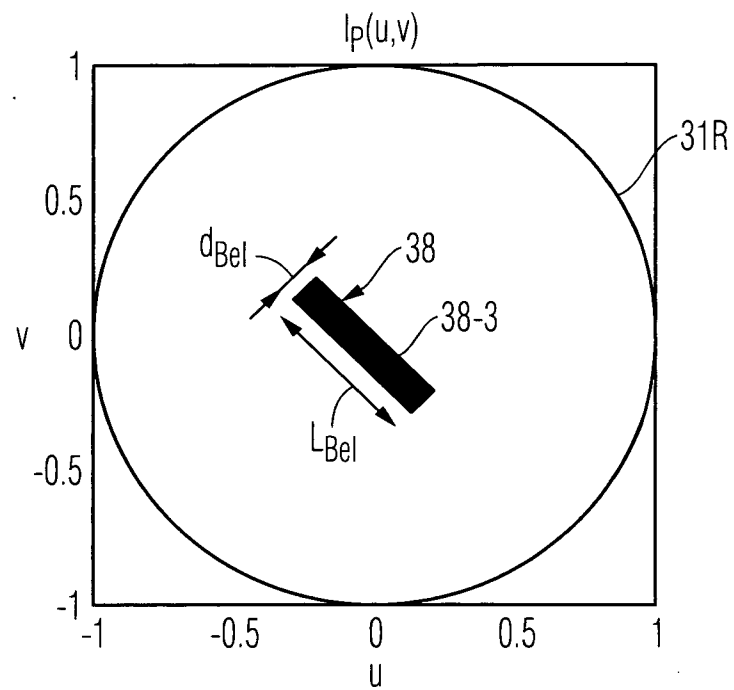


Fig. 8

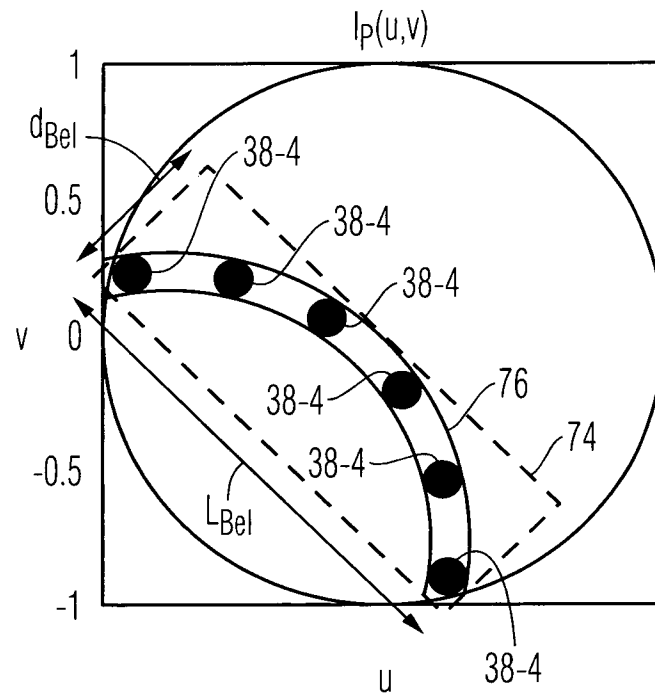


Fig. 9

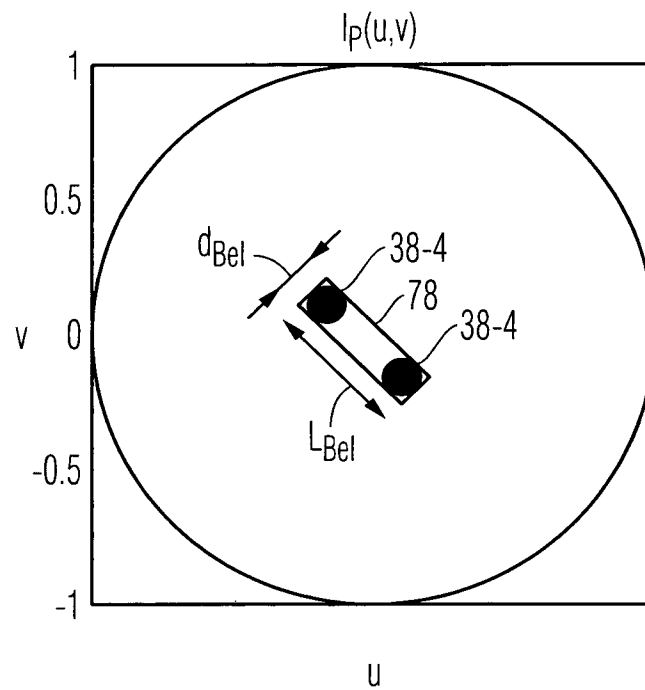


Fig. 10

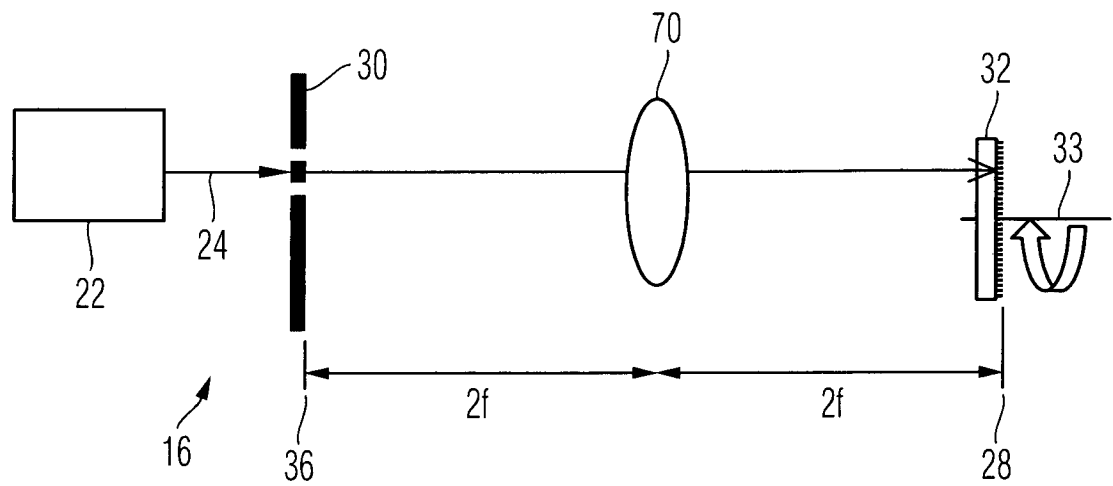


Fig. 11

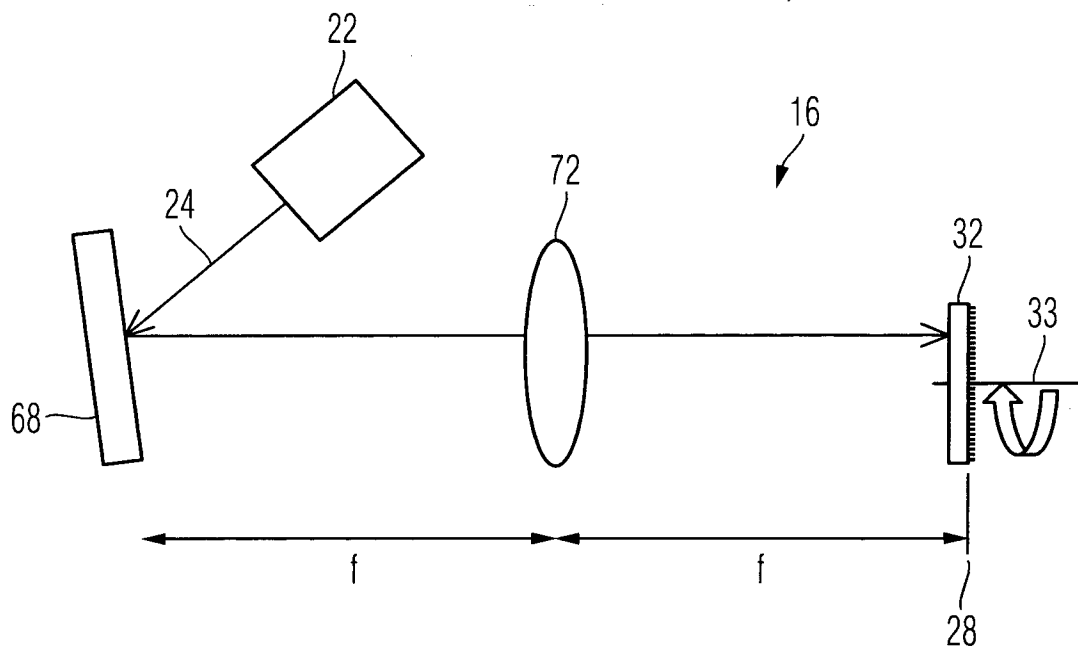
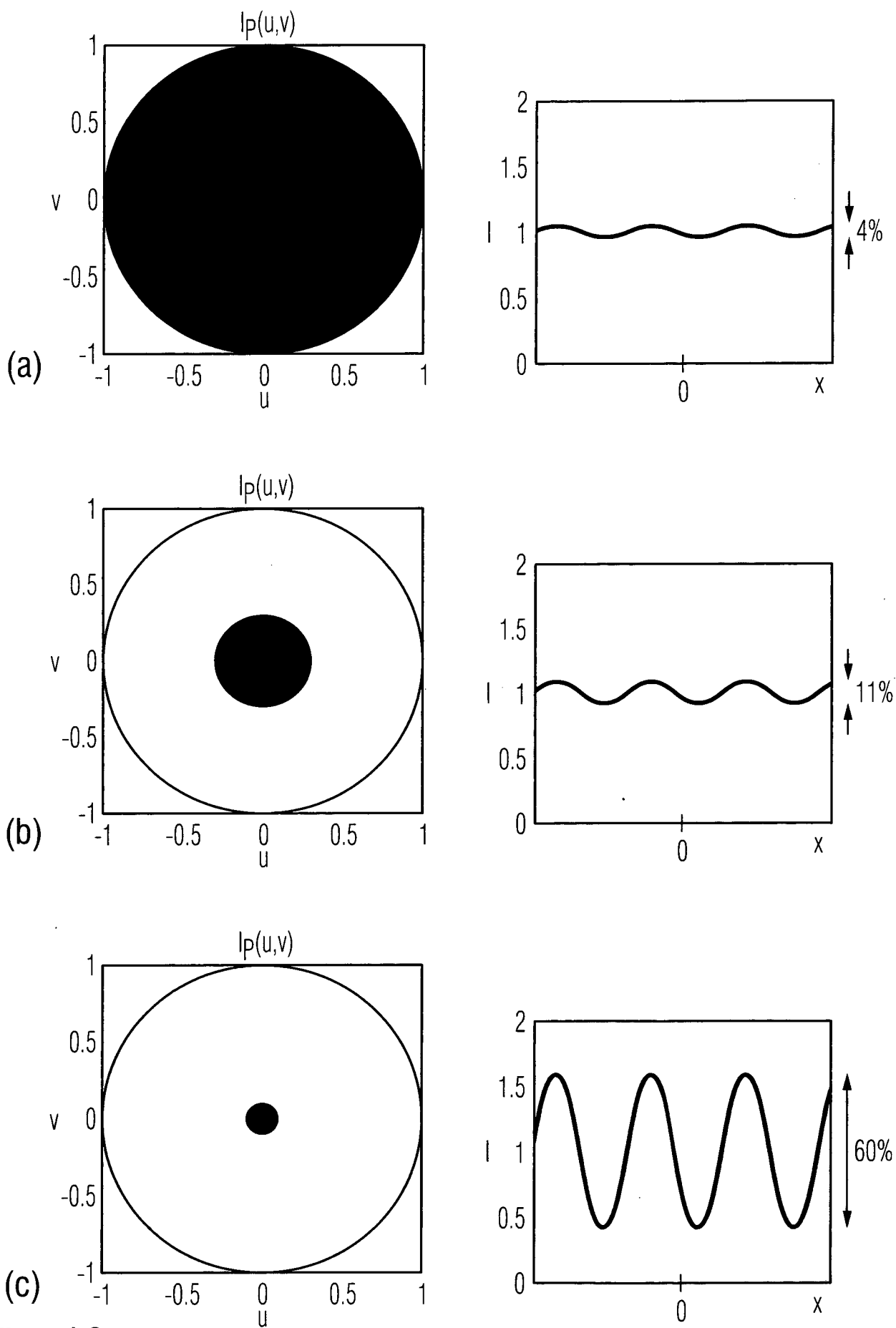


Fig. 12



## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No  
PCT/EP2017/000875

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER  
INV. G01B9/02  
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)  
G01B G01M

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

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category*   | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages                                                                                                                                                                                                  | Relevant to claim No.                                 |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Y<br>A<br>Y | DE 10 2007 021953 A1 (ZEISS CARL SMT AG [DE]) 13 November 2008 (2008-11-13)<br>paragraphs [0064], [0065]; figures 1,4-6<br>-----<br>US 2001/028462 A1 (ICHIHARA HIROSHI [JP] ET AL) 11 October 2001 (2001-10-11)<br>paragraphs [0133] - [0145], [0149];<br>figures 16a,17a<br>----- | 1,12,13,<br>15-17<br>2-11,14<br><br>1,12,13,<br>15-17 |



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

10 October 2017

Date of mailing of the international search report

20/10/2017

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

Biedermann, Benjamin

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2017/000875

| Patent document<br>cited in search report | Publication<br>date | Patent family<br>member(s) | Publication<br>date |
|-------------------------------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|
| DE 102007021953 A1                        | 13-11-2008          | NONE                       |                     |
| -----                                     |                     |                            |                     |
| US 2001028462 A1                          | 11-10-2001          | US 6312373 B1              | 06-11-2001          |
|                                           |                     | US 2001028462 A1           | 11-10-2001          |
|                                           |                     | US 2002191195 A1           | 19-12-2002          |
|                                           |                     | US 2003215053 A1           | 20-11-2003          |
| -----                                     |                     |                            |                     |

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES  
INV. G01B9/02  
ADD.

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)  
G01B G01M

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

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

| Kategorie* | Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile | Betr. Anspruch Nr. |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Y          | DE 10 2007 021953 A1 (ZEISS CARL SMT AG [DE]) 13. November 2008 (2008-11-13)                       | 1,12,13, 15-17     |
| A          | Absätze [0064], [0065]; Abbildungen 1,4-6<br>-----                                                 | 2-11,14            |
| Y          | US 2001/028462 A1 (ICHIHARA HIROSHI [JP] ET AL) 11. Oktober 2001 (2001-10-11)                      | 1,12,13, 15-17     |
|            | Absätze [0133] - [0145], [0149];<br>Abbildungen 16a,17a<br>-----                                   |                    |



Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen



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

10. Oktober 2017

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

20/10/2017

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

Biedermann, Benjamin

**INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT**

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2017/000875

| Im Recherchenbericht<br>angeführtes Patentdokument | Datum der<br>Veröffentlichung | Mitglied(er) der<br>Patentfamilie | Datum der<br>Veröffentlichung |
|----------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| DE 102007021953 A1                                 | 13-11-2008                    | KEINE                             |                               |
| -----                                              |                               |                                   |                               |
| US 2001028462 A1                                   | 11-10-2001                    | US 6312373 B1                     | 06-11-2001                    |
|                                                    |                               | US 2001028462 A1                  | 11-10-2001                    |
|                                                    |                               | US 2002191195 A1                  | 19-12-2002                    |
|                                                    |                               | US 2003215053 A1                  | 20-11-2003                    |
| -----                                              |                               |                                   |                               |