

(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
12. November 2015 (12.11.2015)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2015/169937 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

G01J 1/42 (2006.01) B23K 26/30 (2014.01)
H01S 3/00 (2006.01) H05G 2/00 (2006.01)
G01J 1/04 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2015/060145

(22) Internationales Anmeldedatum:
8. Mai 2015 (08.05.2015)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2014 208 792.9 9. Mai 2014 (09.05.2014) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme
von US): CARL ZEISS SMT GMBH [DE/DE]; Rudolf-
Eber-Strasse 2, 73447 Oberkochen (DE).

(72) Erfinder; und

(71) Anmelder (nur für US): MANGER, Matthias [DE/DE];
Samentalweg 5, 73432 Aalen-Unterkochen (DE).
BAUMER, Florian [DE/DE]; Sonnenbergstrasse 32,
73447 Oberkochen (DE).

(74) Anwalt: FRANK, Hartmut; Bonsmann·Bonsmann·Frank
Patentanwälte, Reichspräsidentenstraße 21-25, 45470
Mülheim a.d. Ruhr (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, DK,
DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM,
GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP,
KR, 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.

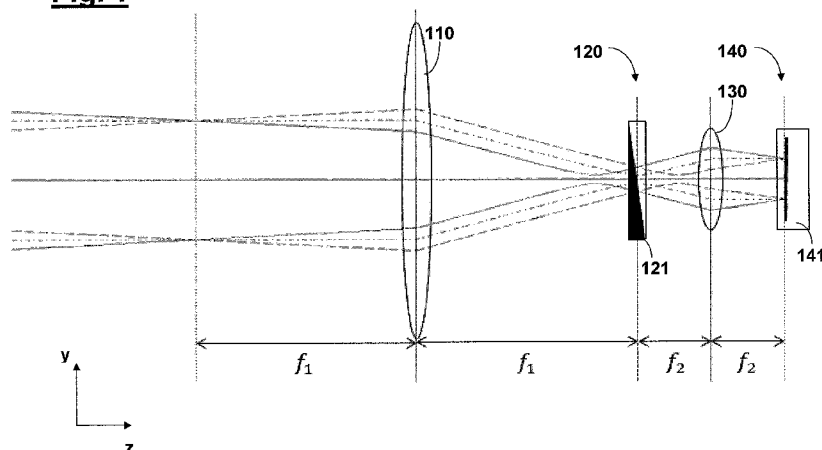
(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW,
GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST,
SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG,
KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH,
CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, 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).

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: SYSTEM AND METHOD FOR ANALYZING A LIGHT BEAM CONDUCTED BY A BEAM-CONDUCTING
OPTICAL UNIT

(54) Bezeichnung : SYSTEM UND VERFAHREN ZUR ANALYSE EINES VON EINER STRAHLFÜHRUNGSOPTIK
GEFÜHRTEN LICHTSTRAHLS

Fig. 1



(57) Abstract: The invention relates to a system and to a method for analyzing a light beam conducted by a beam-conducting optical unit. A system according to the invention comprises a graduated neutral-density filter assembly (120, 520), which is arranged in a far-field plane of the beam-conducting optical unit and has at least one graduated neutral-density filter (121, 521, 522, 523) having spatially varying transmittance, and a light intensity sensor assembly having at least one light intensity sensor (140, 540), which light intensity sensor assembly is arranged in a near-field plane of the beam-conducting optical unit and measures (141, 541, 542, 543), for each graduated neutral-density filter (121, 521, 522, 523) of the graduated neutral-density filter assembly (120, 520), the light intensity transmitted by the graduated neutral-density filter.

(57) Zusammenfassung:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2015/169937 A1

**Veröffentlicht:**

— mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

Die Erfindung betrifft ein System und ein Verfahren zur Analyse eines von einer Strahlführungsoptik geführten Lichtstrahls. Ein erfindungsgemäßes System weist eine Grauverlaufsfilter-Anordnung (120, 520), welche in einer Fernfeldebene der Strahlführungsoptik angeordnet ist und wenigstens einen Grauverlaufsfilter (121, 521, 522, 523) mit örtlich variierender Transmission aufweist, und eine Lichtintensitätssensor-Anordnung mit mindestens einem Lichtintensitätssensor (140, 540) auf, welche in einer Nahfeldebene der Strahlführungsoptik angeordnet ist und für jeden Grauverlaufsfilter (121, 521, 522, 523) der Grauverlaufsfilter-Anordnung (120, 520) jeweils die durch den Grauverlaufsfilter transmittierte Lichtintensität misst (141, 541, 542, 543).

System und Verfahren zur Analyse eines von einer
Strahlführungsoptik geführten Lichtstrahls

5

Die vorliegende Anmeldung beansprucht die Priorität der Deutschen Patentanmeldung DE 10 2014 208 792.9, angemeldet am 09. Mai 2014. Der Inhalt
10 dieser DE-Anmeldung wird durch Bezugnahme („incorporation by reference“) mit in den vorliegenden Anmeldungstext aufgenommen.

HINTERGRUND DER ERFINDUNG

15

Gebiet der Erfindung

Die Erfindung betrifft ein System und ein Verfahren zur Analyse eines von einer Strahlführungsoptik geführten Lichtstrahls. Die Erfindung ist insbesondere ein-
20 setzbar, um einen Lichtstrahl (insbesondere einen Laserstrahl) z.B. in seiner Position und/oder in seinen Fokussiereigenschaften zu analysieren und um Aufschluss sowohl über die geometrischen Strahlparameter als auch über die Strahlqualität zu erlangen.

25 Die Erfindung ist insbesondere zur Analyse elektromagnetischer Strahlung geeignet, wie sie z.B. in Laserplasmaquellen (etwa bei einer EUV-Quelle einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage) eingesetzt wird, jedoch nicht hierauf beschränkt. In weiteren Anwendungen ist die Erfindung auch allgemein dazu geeignet, elektromagnetische Strahlung, die zu beliebigen (insbesondere
30 Mess-)Zwecken eingesetzt wird, zu analysieren.

Stand der Technik

Laserplasmaquellen werden z.B. zur Anwendung in der Lithographie eingesetzt. So erfolgt etwa im Betrieb einer für den EUV-Bereich (z.B. bei Wellenlängen von z.B. etwa 13 nm oder etwa 7 nm) ausgelegten Projektionsbelichtungsanlage die Erzeugung des benötigten EUV-Lichtes mittels einer auf einer Plasma-Anregung basierenden EUV-Lichtquelle, zu der Fig. 14 einen beispielhaften herkömmlichen Aufbau zeigt.

Diese EUV-Lichtquelle weist zunächst einen (nicht gezeigten) Hochenergielaser z.B. zur Erzeugung von Infrarotstrahlung 706 (z.B. CO₂-Laser mit einer Wellenlänge von $\lambda \approx 10.6 \mu\text{m}$) auf, welche über eine Fokussieroptik fokussiert wird, durch eine in einem als Ellipsoid ausgebildeten Kollektorspiegel 710 vorhandene Öffnung 711 hindurchtritt und auf ein mittels einer Targetquelle 735 erzeugtes und einer Plasmazündungsposition 730 zugeführtes Targetmaterial 732 (z.B. Zinntröpfchen) gelenkt wird. Die Infrarotstrahlung 706 heizt das in der Plasmazündungsposition 730 befindliche Targetmaterial 732 derart auf, dass dieses in einen Plasmazustand übergeht und EUV-Strahlung abgibt. Diese EUV-Strahlung wird über den Kollektorspiegel 710 auf einen Zwischenfokus IF (= "Intermediate Focus") fokussiert und tritt durch diesen in eine nachfolgende Beleuchtungseinrichtung, deren Umrandung 740 lediglich angedeutet ist und die für den Lichteintritt eine freie Öffnung 741 aufweist, ein.

Von wesentlicher Bedeutung für die in einer EUV-Lichtquelle bzw. Laserplasmaquelle erzielbare Dosisstabilität bzw. zeitliche Stabilität der EUV-Abstrahlcharakteristik und die realisierbare EUV-Lichtausbeute ist dabei, dass die mit zunehmendem Lichtbedarf sehr schnell (z.B. mit einer Injektionsrate im Bereich von 100 kHz bzw. in einem zeitlichen Abstand von z.B. 10 μs) in die Laserplasmaquelle „einfliegenden“ Zinntröpfchen individuell hochgenau (z.B. mit einer Genauigkeit unterhalb von 1 μm) und reproduzierbar von dem das Tröpfchen zerstäubenden Laserstrahl getroffen werden. Dies erfordert im o.g. Aufbau wiederum eine hochgenaue Einstellung der Tröpfchenposition sowie eine hochgenaue Nachführung der z.B. vom CO₂-Laser erzeugten Infrarotstrahlung 706.

Sowohl die Bestimmung der Tröpfchenposition als auch die Bestimmung der Fokuslage der entsprechend nachzuführenden Laserstrahlen können mit einer sogenannten Strahlpropagationskamera erfolgen, wobei sowohl die Laserstrahlen in
5 „Vorwärtsrichtung“ (d.h. die Infrarotstrahlung 706 vor dem Auftreffen auf die jeweiligen Target-Tröpfchen) als auch die Laserstrahlen in „Rückwärtsrichtung“ (d.h. die von dem jeweiligen Target-Tröpfchen zurückreflektierte Infrarotstrahlung 706) erfasst und die für die Laserstrahl- sowie Tröpfchenführung benötigten Messdaten gewonnen werden.

10 Hierbei tritt in der Praxis u.a. das Problem auf, dass die von den Target-Tröpfchen zurückreflektierte Infrarotstrahlung 706 vergleichsweise intensitätsschwach ist, was eine exakte messtechnische Erfassung der Tröpfchenposition und damit auch die hochgenaue Nachführung der vom CO₂-Laser erzeugten Infrarotstrahlung 706
15 erschwert. Zum Stand der Technik wird beispielhaft auf US 8,237,922 B2 und US 5,329,350 verwiesen.

Fig. 13 dient zur Erläuterung eines möglichen herkömmlichen Ansatzes zur Lichtstrahlanalyse. Dabei wird der zu analysierende Lichtstrahl mit einer Fokussier-
20 Linse 10 auf einen in deren bildseitiger Brennebene angeordneten Vier-Quadrantensensor 20 fokussiert, welcher aus vier die Lichtintensität messenden Sensoren 21-24 zusammengesetzt ist, wobei die Position des Lichtstrahls aus Verrechnung der mit diesen vier Sensoren 21-24 gemessenen Lichtintensitäten bestimmt wird.

25 Hierbei tritt jedoch bei der zuvor beschriebenen Anwendung der Analyse etwa der Infrarotstrahlung in einer EUV-Lichtquelle bzw. Laserplasmaquelle in der Praxis das Problem auf, dass der zu messende Lichtstrahl mit starken Variationen beaufschlagt ist, wobei sich insbesondere die Divergenz des Lichtstrahls bei einem De-
30 fokus des Licht- bzw. Laserstrahls in Bezug auf das Target-Tröpfchen sowie sich die Richtung des Lichtstrahls (entsprechend einem „Pointing“ des Strahls) ändern und wobei zudem auch ein laterales Verschieben des Strahls auftritt.

ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, ein System und ein Verfahren zur
5 Analyse eines von einer Strahlführungsoptik geführten Lichtstrahls bereitzustellen, welche eine möglichst exakte Lichtstrahlanalyse (z.B. Strahlpositionsbestimmung) bei möglichst geringer Sensitivität auf die vorstehend genannten parasitären Strahlvariationen ermöglichen.

10 Diese Aufgabe wird gemäß den Merkmalen der unabhängigen Patentansprüche gelöst.

Ein erfindungsgemäßes System weist auf:

- 15 – eine Grauverlaufsfilter-Anordnung, welche in einer Fernfeldebene der Strahlführungsoptik angeordnet ist und wenigstens einen Grauverlaufsfilter mit örtlich variierender Transmission aufweist; und
- eine Lichtintensitätssensor-Anordnung mit mindestens einem Lichtintensitätssensor, welche in einer Nahfeldebene der Strahlführungsoptik angeordnet ist und für jeden Grauverlaufsfilter der Grauverlaufsfilter-Anordnung
20 jeweils die durch den Grauverlaufsfilter transmittierte Lichtintensität misst.

Der Erfindung liegt insbesondere das Konzept zugrunde, einen Filter mit örtlich variierender Transmission - welcher hier und im Folgenden kurz als „Grauverlaufsfilter“ bezeichnet wird - in der Fernfeldebene einer Strahlführungsoptik, insbesondere in einem sogenannten „2f-2f“-Aufbau“ wie etwa einem Kepler-Teleskop-
25 Aufbau, zu platzieren und so zunächst die den auf das System auftreffenden, zu analysierenden Lichtstrahl charakterisierende Information (z.B. eine zu bestimmende Positionsinformation des Lichtstrahls) in eine reine Intensitätsinformation zu übersetzen. Das durch den Grauverlaufsfilter transmittierte Licht wird sodann
30 auf einem in der Nahfeldebene der Strahlführungsoptik angeordneten Lichtintensitätssensor gesammelt, der ausschließlich die Intensität als Integral über die Sensorfläche misst.

Durch diesen Ansatz wird insbesondere erreicht, dass die eingangs erwähnten parasitären Strahlvariationen (wie z.B. Divergenzen etc.), welche beispielsweise im Betrieb einer EUV-Lichtquelle bzw. Laserplasmaquelle auftreten, sich am Ort der Lichtintensitätssensor-Anordnung nicht nennenswert auswirken. Dies ist insofern von großer Bedeutung, als die insbesondere für den Anwendungsfall mit einer Wellenlänge des zu analysierenden Lichtstrahls im langwelligen Infrarotbereich verfügbaren Intensitätssensoren (welche z.B. auf einem Quecksilber-Cadmium-Tellurit-Materialsystem basieren können) infolge der auftretenden Sättigung eine ausgeprägte nichtlineare Charakteristik aufweisen und zudem auch räumlich inhomogen sind. Dabei erweist es sich erfindungsgemäß als besonders vorteilhaft, dass das zu analysierende Licht aufgrund der Platzierung der Lichtintensitätssensor-Anordnung im optischen Nahfeld (d.h. einer Pupillenebene mit in diesem Bereich kollimiertem Lichtstrahl) hinreichend verdünnt bzw. maximal breit verteilt ist mit der Folge, dass die vorstehend beschriebenen parasitären Strahlvariationen in dieser Nahfeldebene nicht als Variationen auf der Lichtintensitätssensor-Anordnung durchschlagen bzw. auf dem jeweiligen Lichtintensitätssensor nicht zur Geltung kommen oder zumindest hinreichend stark unterdrückt werden.

Mit anderen Worten beinhaltet die Erfindung insbesondere das Konzept, eine Lichtstrahlanalyse im langwelligen Infrarotbereich trotz der in diesem Wellenlängenbereich nur sehr begrenzt verfügbaren Sensorik dadurch zu verwirklichen, dass die Verwendung eines allein die Intensität messenden und in einer Nahfeldebene platzierten Lichtintensitätssensors (bzw. einer Anordnung aus einer Mehrzahl solcher Lichtintensitätssensoren) mit dem Einsatz eines Grauverlaufsfilters (bzw. einer Anordnung aus einer Mehrzahl von Grauverlaufsfiltern) in der Feld-ebene bzw. Fernfeldebene kombiniert und so erreicht wird, dass die Positionsbestimmung ohne die bereits diskutierten Störungen erfolgen kann, da die besagten Störungen in der Nahfeldebene bzw. am Ort des Lichtintensitätssensors nicht mehr wirksam sind.

Unter Strahlführungsoptik wird im Sinne der vorliegenden Anmeldung ein optisches System verstanden, welches dem eigentlichen zur Analyse dienenden System vorgelagert ist und den zu analysierenden Lichtstrahl dem zur Analyse dienenden System von einem übergeordneten, den Lichtstrahl erzeugenden bzw. definierenden System (z.B. einer EUV-Lichtquelle oder einem materialbearbeitenden System) zuführt. Das übergeordnete System weist in diesem Falle bereits wenigstens eine Nahfeldebene und wenigstens eine Fernfeldebene auf, wobei die Strahlführungsoptik hierzu jeweils konjugierte Ebenen (d.h. ebenfalls wenigstens eine Nahfeldebene und wenigstens eine Fernfeldebene) bereitstellt, an welche das zur Analyse dienende System ankoppelt.

Als Nahfeld wird die Amplituden-/Intensitätsverteilung in einer Schnittebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung im Regime des kollimierten (aufgeweiteten = nahezu divergenzfreien) Strahls bezeichnet. Das Fernfeld hingegen entspricht der Amplituden-/Intensitätsverteilung in einer taillen- bzw. fokushen Ebene senkrecht zur Strahlausbreitung im Regime des fokussierten bzw. konvergenten Strahls. Die Erzeugung eines fokussierten Strahls aus dem kollimierten Strahl und umgekehrt erfolgt üblicherweise über Fourier-Optiken. Die Begriffe „Nahfeldebene“ und „Fernfeldebene“ werden hierbei analog zu den Begriffen „Pupillenebene“ bzw. „Feldebene“ eines abbildenden optischen Systems verwendet.

Die Formulierungen, wonach die Grauverlaufsfilter-Anordnung in einer Fernfeldebene der Strahlführungsoptik angeordnet ist und die Lichtintensitätssensor-Anordnung in einer Nahfeldebene der Strahlführungsoptik angeordnet ist, sind jeweils so zu verstehen, dass auch geringfügige Abweichungen von der exakten Anordnung in der betreffenden Ebene umfasst sein sollen, insbesondere solange die Anordnung noch im jeweiligen Tiefenschärfebereich erfolgt.

Gemäß einer Ausführungsform weist das System in einem Kepler-Teleskop-Aufbau eine erste Fourier-Optik und eine zweite Fourier-Optik auf, wobei die Fernfeldebene der Strahlführungsoptik sich bezogen auf den optischen Strahlengang zwischen der ersten und zweiten Fourier-Optik befindet und wobei die Nahfeld-

ebene der Strahlführungsoptik sich bezogen auf den optischen Strahlengang nach der zweiten Fourier-Optik befindet.

5 Gemäß einer Ausführungsform besitzt wenigstens ein Grauverlaufsfilter einen in einer vorbestimmten Raumrichtung linearen Transmissionsverlauf.

10 Gemäß einer Ausführungsform weist die Grauverlaufsfilter-Anordnung einen ersten Grauverlaufsfilter mit linearem Transmissionsverlauf in einer ersten Raumrichtung und einen zweiten Grauverlaufsfilter mit linearem Transmissionsverlauf in einer von der ersten Raumrichtung verschiedenen zweiten Raumrichtung auf. Dabei kann insbesondere die zweite Raumrichtung zur ersten Raumrichtung senkrecht sein, um etwa (für eine Lichtausbreitungsrichtung entlang der z-Richtung im Koordinatensystem) sowohl die x-Komponente als auch die y-Komponente der Strahlposition bestimmen zu können.

15 Gemäß einer Ausführungsform besitzt wenigstens ein Grauverlaufsfilter einen zumindest in einer vorbestimmten Raumrichtung parabelförmigen Transmissionsverlauf, um – wie im Weiteren noch näher erläutert – alternativ oder zusätzlich zur Strahlposition die Spotgröße des zu analysierenden Lichtstrahls zu bestimmen.

20 Insbesondere kann, wie im Weiteren noch detaillierter beschrieben, zur Bestimmung der Strahlposition eine Grauverlaufsfilter-Anordnung aus drei Grauverlaufsfiltern in Kombination mit einer Lichtintensitätssensor-Anordnung aus drei Lichtintensitätssensoren eingesetzt werden, wobei (für eine Lichtausbreitungsrichtung entlang der z-Richtung im Koordinatensystem) ein erster Grauverlaufsfilter einen in x-Richtung linearen Transmissionsverlauf, ein zweiter Grauverlaufsfilter einen in y-Richtung linearen Transmissionsverlauf und ein dritter der Grauverlaufsfilter zwecks Intensitätsnormierung einen konstanten Transmissionsverlauf aufweist.

30 Gemäß einer Ausführungsform besitzt wenigstens ein Grauverlaufsfilter einen Transmissionsverlauf mit rotationsparaboloidförmiger oder sattelförmiger Geometrie.

- Gemäß einer Ausführungsform besitzt wenigstens ein Grauverlaufsfilter zur Ermöglichung einer Intensitätsnormierung einen konstanten Transmissionsverlauf. Eine solche Intensitätsnormierung ermöglicht es, etwaige Intensitätsschwankungen des Licht- bzw. Laserstrahls zu berücksichtigen und von den von einer Positionsänderung des zu analysierenden Lichtstrahls herrührenden Intensitätsschwankungen zu unterscheiden. Hierdurch wird dem Umstand Rechnung getragen, dass Intensitätsschwankungen im zu analysierenden Lichtstrahl zu Schwankungen der gemessenen Intensitätssignale und damit zu Verfälschungen der gewünschten Positionsinformation führen können. Zur Elimination des Einflusses der Laserschwankungen kann somit ein Referenzsignal gemessen werden, welches allein die integrale Intensität repräsentiert, und die Signale zur Gewinnung der Strahlparameter des zu analysierenden Lichtstrahls können auf dieses Referenzsignal normiert werden.
- Die Erfindung ist jedoch nicht auf die Verwendung eines solchen (zusätzlichen) Grauverlaufsfilters mit konstantem Transmissionsverlauf beschränkt, da die zur Intensitätsnormierung erforderliche Intensitätsinformation des zu analysierenden Lichtstrahls grundsätzlich auch anderweitig bereitgestellt werden kann.
- Gemäß einer Ausführungsform weist die Grauverlaufsfilter-Anordnung ein Array aus einer Mehrzahl von Grauverlaufsfiltern auf. Des Weiteren kann die Lichtintensitätssensor-Anordnung ein Array aus einer Mehrzahl von Lichtintensitätssensoren aufweisen.
- Gemäß einer Ausführungsform ist wenigstens ein Grauverlaufsfilter aus Binärstrukturen gebildet, wobei die Strukturgrößen dieser Binärstrukturen kleiner als die Wellenlänge des zu analysierenden Lichtstrahls sind. Unter der Bildung eines Grauverlaufsfilters aus Binärstrukturen wird hierbei die Bildung aus Strukturen verstanden, welche für die jeweils auftreffende, zu analysierende Strahlung entweder vollständig absorbierend oder vollständig reflektierend sind. Mittels einer solchen Ausgestaltung kann erreicht werden, dass gemittelt über einen bestimmten Bereich (etwa entsprechend der Spotgröße des zu analysierenden Lichtstrahls) im Mittel effektive Transmissionswerte bzw. Grauwerte zwischen Null und

Eins erhalten werden, womit im Ergebnis ein gewünschter Transmissionsverlauf (z.B. ein in einer vorbestimmten Raumrichtung linearer Transmissionsverlauf) mit hoher Genauigkeit realisiert werden kann.

- 5 Hierdurch wird dem Umstand Rechnung getragen, dass bei dem erfindungsgemäßen Konzept vergleichsweise hohe Anforderungen an die Güte des bzw. der eingesetzten Grauverlaufsfilter(s) zu stellen sind, da diese die bei der Positionsmessung erzielte Genauigkeit unmittelbar bestimmt und etwaige Transmissionsverlaufsschwankungen entsprechende Messfehler in der Strahlanalyse zur Folge haben.
- 10

Gemäß einer Ausführungsform weist das System eine bezogen auf die Lichtausbreitungsrichtung stromaufwärts der Grauverlaufsfilter-Anordnung angeordnete strahlaufspaltende Struktur (z.B. ein optisches Gitter) zur Aufspaltung des zu analysierenden Lichtstrahls in eine Mehrzahl von Teilstrahlen auf, wodurch der zu analysierende Lichtstrahl zunächst in Teilstrahlen mit übereinstimmenden optischen Eigenschaften repliziert werden kann, wobei diese Teilstrahlen dann durch die jeweils nachfolgenden Graufilter-Lichtintensitätssensor-Kombinationen separat zur Ermittlung unterschiedlicher Strahlinformationen analysiert werden können. In

15

weiteren Ausgestaltungen kann die strahlaufspaltende Struktur auch ein oder mehrere Prismen oder Spiegel aufweisen. Die strahlaufspaltende (z.B. diffraktive) Struktur ist vorzugsweise in einer Nahfeldebene der Strahlführungsoptik angeordnet.

20

- 25 Gemäß einer Ausführungsform ist der zu analysierende Lichtstrahl ein Laserstrahl, insbesondere ein Laserstrahl mit einer Wellenlänge im Infrarotbereich.

Die Erfindung betrifft weiter auch ein Verfahren zur Analyse eines von einer Strahlführungsoptik geführten Lichtstrahls,

- 30 – wobei ein zu analysierender Lichtstrahl über eine Grauverlaufsfilter-Anordnung, welche in einer Fernfeldebene der Strahlführungsoptik angeordnet ist und wenigstens einen Grauverlaufsfilter mit örtlich variierender Transmission aufweist, auf eine Lichtintensitätssensor-Anordnung mit min-

destens einem Lichtintensitätssensor, welche in einer Nahfeldebene der Strahlführungsoptik angeordnet ist und für jeden Grauverlaufsfilter der Grauverlaufsfilter-Anordnung jeweils die durch den Grauverlaufsfilter transmittierte Lichtintensität misst, gelenkt wird;

- 5 – wobei aus der gemessenen Lichtintensität wenigstens ein Strahlparameter zur Charakterisierung des zu analysierenden Lichtstrahls abgeleitet wird.

Gemäß einem weiteren Aspekt betrifft die Erfindung auch die Verwendung eines Grauverlaufsfilters zur Lichtstrahlanalyse, insbesondere in einem System mit den
10 vorstehend beschriebenen Merkmalen, wobei der Grauverlaufsfilter aus Binärstrukturen gebildet ist, und wobei die Strukturgrößen dieser Binärstrukturen kleiner sind als die Wellenlänge eines zu analysierenden Lichtstrahls.

Weitere Ausgestaltungen der Erfindung sind der Beschreibung sowie den Unter-
15 ansprüchen zu entnehmen.

Die Erfindung wird nachstehend anhand von in den beigefügten Abbildungen dargestellten Ausführungsbeispielen näher erläutert.

20

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

Es zeigen:

25 Figur 1 eine schematische Darstellung zur Erläuterung des der vorliegenden Erfindung zugrundeliegenden Prinzips;

Figur 2-3 schematische Darstellungen eines in einer Laserplasmaquelle sowohl zur Bestimmung der Target-Tröpfchen-Position als auch
30 zur Analyse der entsprechend nachzuführenden Laserstrahlen möglichen prinzipiellen Aufbaus;

- Figur 4 schematische Darstellungen zur Erläuterung unterschiedlicher im Rahmen der vorliegenden Erfindung einsetzbarer Grauverlaufsfilter;
- 5 Figur 5 eine schematische Darstellung zur Erläuterung eines möglichen Aufbaus eines erfindungsgemäßen Systems mit einer Grauverlaufsfilter-Anordnung in einer konkreten Ausführungsform;
- 10 Figur 6-10 schematische Darstellungen zur Erläuterung weiterer Ausführungsformen von im Rahmen der vorliegenden Erfindung einsetzbaren Grauverlaufsfiltern;
- 15 Figur 11-12 schematische Darstellungen zur Erläuterung konkreter Ausführungsformen eines im Rahmen der vorliegenden Erfindung einsetzbaren Grauverlaufsfilters mit Sublambda-Binärstrukturen;
- Figur 13 eine schematische Darstellung zur Erläuterung eines herkömmlichen Ansatzes zur Strahlanalyse; und
- 20 Figur 14 eine schematische Darstellung des prinzipiellen Aufbaus einer EUV-Lichtquelle gemäß dem Stand der Technik.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG BEVORZUGTER AUSFÜHRUNGSFORMEN

25

Fig. 1 zeigt eine schematische Darstellung zur Erläuterung des der vorliegenden Erfindung zugrundeliegenden Prinzips und des grundsätzlichen Aufbaus eines erfindungsgemäßen Systems zur Strahlanalyse.

- 30 Gemäß Fig. 1 trifft ein kollimiertes Strahlenbündel zunächst entlang der z-Richtung im eingezeichneten Koordinatensystem auf eine erste Fourier-Optik 110 und von dieser fokussiert auf eine Grauverlaufsfilter-Anordnung 120, welche im optischen Strahlengang in einer Fernfeldebene der Strahlführungsoptik (mitunter auch als

„Raumfilterebene“ bezeichnet) angeordnet ist und in dem dargestellten Ausführungsbeispiel einen einzelnen Grauverlaufsfilter 121 mit einem in y-Richtung linearen (und lediglich schematisch durch einen Keil angedeuteten) Transmissionsverlauf aufweist. Die durch die Grauverlaufsfilter-Anordnung 120 bzw. den Grauverlaufsfilter 121 transmittierte Strahlung gelangt durch eine zweite Fourier-Optik 130 auf eine in einer Nahfeldebene der Strahlführungsoptik angeordnete Lichtintensitätssensor-Anordnung 140, welche im Ausführungsbeispiel einen einzelnen Lichtintensitätssensor 141 aufweist, der einen über die gesamte Sensorfläche integrierten Intensitätswert misst.

10

Die Erfindung ist hinsichtlich der Fourier-Optiken 110, 130 nicht auf eine konkrete Ausgestaltung beschränkt, wobei insbesondere refraktive, diffraktive, diffraktiv-multifokale oder reflektive Ausführungen möglich sind. Gegebenenfalls kann die zweite Fourier-Optik 130 bei ausreichender Uniformität des Lichtintensitätssensors 141 auch entfallen.

15

Die Erfindung ist ferner hinsichtlich der Ausgestaltung der Lichtintensitätssensor-Anordnung 140 bzw. des Lichtintensitätssensors 141 nicht auf eine bestimmte Ausführung beschränkt, wobei der Lichtintensitätssensor 141 z.B. photovoltaisch, photokonduktiv, pyro-elektromagnetisch oder auch thermisch bzw. bolometrisch ausgestaltet sein kann.

20

Der bzw. die Grauverlaufsfilter 121 der Grauverlaufsfilter-Anordnung 120 kann bzw. können hinsichtlich des Abschwächungsprinzips als Flächenabsorber oder Volumenabsorber (z.B. Keil), ggf. auch rückreflektierend, ausgestaltet sein.

25

Die Anordnung des Grauverlaufsfilters 141 (gemäß Fig. 1 in der „Eingriffsebene“ eines Kepler-Teleskops) hat in vorteilhafter Weise zur Folge, dass für die Platzierung des Lichtintensitätssensors 141 eine Nahfeldebene zugänglich wird, welche sich u.a. dadurch auszeichnet, dass Form und Größe des dort vorliegenden „Intensitätsgebildes“ bei korrekter afokaler Verkopplung im optischen Strahlengang unabhängig von Strahlrichtung und Strahldivergenz sind und zudem die Energie der elektromagnetischen Strahlung unter Vermeidung lokaler Sättigungseffekte

30

hinreichend verdünnt vorliegt. Infolgedessen werden sämtliche Hauptstörquellen entweder - wie im Falle der Strahlrichtung und der Divergenz - eliminiert oder - wie im Falle der Strahldezentrierung und der Variation der Strahlgröße - zumindest hinreichend unterdrückt, so dass störende Artefakte des Lichtintensitätssensors (insbesondere dessen räumliche Inhomogenität und Sättigung) nicht oder nur in wesentlich reduziertem Maße zur Geltung kommen.

Durch die integrierende Wirkung der Lichtintensitätssensor-Anordnung 140 bzw. des Lichtintensitätssensors 141 ergibt sich das von der Lichtintensitätssensor-Anordnung 140 gelieferte Sensorsignal S zu

$$S = \int_{-\infty}^{+\infty} dx dy I_{FF}(x, y) T(x, y) \quad (1)$$

durch mit der Transmissionsfunktion $T(x, y)$ gewichtete Integration über die im Fernfeld (Fourier-Ebene der Eingangslinse) vorliegende Intensitätsverteilung $I_{FF}(x, y)$. Bei der Wahl der Integrationsgrenzen wird vorausgesetzt, dass die Intensität der Strahlung bzw. des „Lichtgebildes“ hinreichend schnell räumlich abfällt. Durch geeignete Wahl des Transmissionsverlaufs $T(x, y)$ können beispielsweise die Momente

$$m_{k,l} = \int_{-\infty}^{+\infty} dx dy I_{FF}(x, y) x^k y^l \quad (2)$$

der Lichtverteilung direkt messtechnisch zugänglich gemacht werden.

Vorstehend wurde das erfindungsgemäße Prinzip zunächst der Einfachheit halber für einen Aufbau mit lediglich einem Paar aus einem Grauverlaufsfilter und einem Lichtintensitätssensor beschrieben. Zur Bestimmung der (kompletten, d.h. in allen drei Raumrichtungen definierten) Strahlposition des zu analysierenden Lichtstrahls kann, wie im Weiteren unter Bezugnahme auf Fig. 5 beschrieben, eine Grauverlaufsfilter-Anordnung 520 aus drei Grauverlaufsfiltern 521-523 in Kombination mit

einer Lichtintensitätssensor-Anordnung 540 aus drei Lichtintensitätssensoren 541-543 eingesetzt werden, wobei ein erster der Grauverlaufsfilter 521 einen bezogen auf das eingezeichnete Koordinatensystem in y-Richtung linearen Transmissionsverlauf, ein zweiter der Grauverlaufsfilter 523 einen in y-Richtung linearen Transmissionsverlauf und ein dritter der Grauverlaufsfilter 522 zwecks Intensitätsnormierung einen konstanten Transmissionsverlauf aufweist.

Des Weiteren besteht die Möglichkeit, auch z.B. die Spotgröße oder höhere Momente der zu analysierenden Strahlung zu erfassen, wobei z.B. zur Spotgrößenbestimmung wie noch detaillierter erläutert ein Grauverlaufsfilter mit parabelförmigem Transmissionsverlauf eingesetzt werden kann.

Unter erneuter Bezugnahme auf Fig. 5 trifft ein kollimiertes Strahlenbündel zunächst entlang der z-Richtung im eingezeichneten Koordinatensystem auf eine diffraktive Struktur bzw. ein optisches Gitter 505, durch welches das Strahlenbündel in Teilstrahlen repliziert wird, welche lediglich räumlich voneinander getrennt sind und im Übrigen zueinander identische optische Strahleigenschaften aufweisen und. Gemäß Fig. 5 erfolgt diese Replikation in den drei Beugungsordnungen „+1“, „0“ und „-1“. Die Auslegung wird dabei vorzugsweise gewählt, dass die Teilstrahlen mit maximalem Durchmesser d_{\max} beaufschlagt und mit der maximalen Lagevariation r_{\max} (jeweils bezogen auf die Fernfeldebene) derart getrennt werden, dass eine störende Wechselwirkung infolge von Interferenzeffekten vermieden wird.

Entsprechend der durch das optische Gitter 505 erzielten Separation der Teilstrahlen weist die Grauverlaufsfilter-Anordnung 520 eine (z.B. monolithische) Anordnung von Grauverlaufsfiltern 521-523 (Graufilter-Array) auf, die wie in Fig. 5b in Draufsicht angedeutet ausgelegt sein können. Des Weiteren sind gemäß Fig. 5a die ausgangsseitige Fourier-Optik 130 sowie der Lichtintensitätssensor 140 von Fig. 1 durch eine (z.B. ebenfalls monolithische) Anordnung von mehreren Fourier-Optiken (in Form eines Linsenarrays) 531-533 bzw. eine Anordnung von mehreren Lichtintensitätssensoren 541-543 ersetzt.

Im Folgenden werden die Signalerzeugung und die Bestimmung der gesuchten Positionsinformation für die in Fig. 5 dargestellte Konfiguration zur Positionsmessung mit drei Grauverlaufsfiltern 521-523 („Graufilterkanälen“) beschrieben.

- 5 Der Transmissionsverlauf eines Grauverlaufsfilters mit linearem Transmissionsverlauf wird dabei durch

$$T(s) = \frac{1}{2} + \frac{s - s_0}{W} \quad (3)$$

- 10 parametrisiert. Darin bezeichnet s die Lagekoordinate in Verlaufsrichtung, s_0 die Lage des Transmissionswertes $\frac{1}{2}$ und W die Breite der Zone des kompletten Anstiegs der Transmission vom Wert Null bis auf den Wert Eins.

- 15 Damit ergeben sich die Signale S_1 bis S_3 der drei Messkanäle (entsprechend den drei Grauverlaufsfiltern 521-523 bzw. Lichtintensitätssensoren 541-543 der Konfiguration von Fig. 5) zu

$$\begin{aligned} S_1 &= \eta_1 \int_{-\infty}^{+\infty} dx dy I_{FF}(x, y) \left[\frac{1}{2} + \frac{x - x_0}{W_x} \right] , \\ S_2 &= \eta_2 \int_{-\infty}^{+\infty} dx dy I_{FF}(x, y) \left[\frac{1}{2} + \frac{y - y_0}{W_y} \right] , \\ S_3 &= \eta_3 \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} dx dy I_{FF}(x, y) . \end{aligned} \quad (4)$$

- 20 Die Parameter W_x und W_y sowie x_0 und y_0 charakterisieren die beiden Grauverlaufsfilter 521, 523 mit linearem Transmissionsverlauf. Die Parameter η_1 bis η_3 stehen für die Nachweisempfindlichkeiten der Kanäle, die aus unterschiedlichen Gründen (z.B. Bauteilschwankungen etc.) variieren kann.

- 25 Durch Normierung auf ein Referenzsignal, welches hier durch einen uniformen Grauverlaufsfilter 522 mit konstantem Transmissionsverlauf (z.B. mit der Trans-

mission $\frac{1}{2}$) erhalten wird, werden Energieschwankungen (Laserpulsschwankungen) eliminiert. Die beiden normierten Signale enthalten dann die Schwerpunktinformation für den zu analysierenden Lichtstrahl und lauten:

$$\begin{aligned} \frac{S_1}{S_3} &= \underbrace{\frac{\eta_1}{\eta_3} \left(1 - 2 \frac{x_0}{W_x} \right)}_{C_x} + \underbrace{\frac{\eta_1}{\eta_3} \frac{1}{W_x}}_{G_x} \bar{x} = C_x + G_x \bar{x} \quad , \\ \frac{S_2}{S_3} &= \underbrace{\frac{\eta_2}{\eta_3} \left(1 - 2 \frac{y_0}{W_y} \right)}_{C_y} + \underbrace{\frac{\eta_2}{\eta_3} \frac{1}{W_y}}_{G_y} \bar{y} = C_y + G_y \bar{y} \quad . \end{aligned} \quad (5)$$

Die Auslegungsparameter können darin zu vier Effektiv-Parametern, zwei Offset-Werten C_x und C_y sowie zwei Gain-Werten G_x und G_y , zusammengefasst werden, welche beispielsweise durch Kalibration bestimmbar sind und deshalb im Weiteren als Kalibrierparameter bezeichnet werden.

Durch Umstellung der Gleichung in Kenntnis der vier Kalibrierparameter ergeben sich schließlich die Schwerpunktpositionen aus den Messsignalen zu

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{1}{G_x} \left(\frac{S_1}{S_3} - C_x \right) \quad , \\ \bar{y} &= \frac{1}{G_y} \left(\frac{S_2}{S_3} - C_y \right) \quad . \end{aligned} \quad (6)$$

Die vorstehend unter Bezugnahme auf Fig. 1 bzw. Fig. 5 beschriebenen Systeme zur Lichtstrahlanalyse können insbesondere in einer Laserplasmaquelle (wie z.B. derjenigen in Fig. 14) sowohl zur Bestimmung der Target-Tröpfchen-Position als auch zur Analyse der entsprechend nachzuführenden Laserstrahlen möglichen prinzipiellen Aufbaus eingesetzt werden, wozu Fig. 2 eine schematische Darstellung eines möglichen, prinzipiellen Gesamtaufbaus zeigt. Hierbei werden sowohl Laserstrahlen in „Vorwärtsrichtung“ (vor dem Auftreffen auf das jeweilige Target-Tröpfchen) als auch Laserstrahlen in „Rückwärtsrichtung“ (d.h. die von dem jeweiligen Target-Tröpfchen zurückreflektierte Infrarotstrahlung) ausgewertet.

Gemäß Fig. 2 wird ein Teil des einfallenden Laserstrahls mit Gauß'schem Profil an einem ersten teildurchlässigen Spiegel 203 ausgekoppelt und mit einer ersten Analyseeinheit 201, welche insbesondere ein System analog zu Fig. 1 oder Fig. 5 aufweisen kann, analysiert. Der den teildurchlässigen Spiegel 203 sowie einen weiteren teildurchlässigen Spiegel 204 durchlaufende Teil des einfallenden Laserstrahls gelangt über eine Fokussieroptik 205 zu einem metallischen Target-(z.B. Zinn-) Tröpfchen 206, wo ein Teil des Laserstrahls zurückreflektiert wird und über die Fokussieroptik 205 kollimiert zum teildurchlässigen Spiegel 204 zurückgelangt. An dem teildurchlässigen Spiegel 204 wird wiederum ein Teil des Laserstrahls zu einer zweiten Analyseeinheit 202 hin ausgekoppelt, welche ebenfalls insbesondere ein System analog zu Fig. 1 oder Fig. 5 aufweisen kann. Des Weiteren können (in Fig. 2 nicht eingezeichnete) Strahlfallen zum Auffangen des jeweils nicht genutzten Anteils der auf den teildurchlässigen Spiegel 203 bzw. 204 auftreffenden Strahlung vorgesehen sein.

Ein schematischer Strahlengang zur Analyse des Laserstrahls in „Rückwärtsrichtung“ ist in Fig. 3 dargestellt, wobei jeweils Feldebene mit „F“ und Pupillenebene mit „P“ bezeichnet sind. „206“ bezeichnet in Fig. 3 das metallische Target-Tröpfchen, „350“ ist eine afokale Teleskopgruppe, und „120“ repräsentiert die anhand von Fig. 1 beschriebene Grauverlaufsfilter-Anordnung (mit nachfolgender, jedoch in Fig. 3 nicht dargestellter zweiter Fourier-Optik und Lichtintensitätssensor-Anordnung). Eine Verschiebung der Position des Target-Tröpfchens 206 hat eine Änderung des mit der Lichtintensitätssensor-Anordnung erhaltenen Messergebnisses zur Folge.

Die Analyse der Laserstrahlen sowohl in „Vorwärtsrichtung“ (Laserstrahl vor dem Auftreffen auf das jeweilige Target-Tröpfchen 206, „Vorwärtsstrahl“) als auch in „Rückwärtsrichtung“ (Laserstrahl nach Reflexion dem jeweiligen Target-Tröpfchen 206, „Rückwärtsstrahl“) erlaubt so eine Aussage über die relative Einstellung von Laserstrahl und Target-Tröpfchen 206 zueinander, wobei – unter erneuter Bezugnahme auf Fig. 1 – aus dem mit der ersten Analyseeinheit 201 erhaltenen Ergebnis auf die Einstellung bzw. Fokusslage des Laserstrahls und aus dem mit der zweiten

Analyseeinheit 202 erhaltenen Ergebnis auf die Tröpfchenposition geschlossen werden kann.

Im Weiteren werden zum Hintergrund einige Grundlagen der afokalen Abbildung erläutert. Nach dem in der paraxialen Optik gebräuchlichen Transfermatrixformalismus (ABCD-Matrix) ergibt sich die Abbildungsmatrix des verketteten Strahlengangs gemäß Fig. 3 durch Multiplikation der Teilabschnittsmatrizen entsprechend

$$\underline{\underline{M}} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & f+z \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix}}_{\text{bildseitige Linse (von Fourierebene zu Sensorebene)}} \underbrace{\begin{pmatrix} mag & 0 \\ 0 & \frac{1}{mag} \end{pmatrix}}_{\text{Teleskop}} \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & f' \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f'} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & f'-z' \\ 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\text{objektseitige Linse (von Objektebene zu Fourierebene)}} \quad (7)$$

Die objekt- und bildseitigen Brennweiten f' und f sowie der Teleskopabbildungsmaßstab mag werden anhand von Fig. 3 deutlich (Objektraum gestrichen, Bildraum ungestrichen), und die Positionen z' und z beziehen sich auf die Brennebene der jeweiligen Fourier-Optik. Die Transfermatrix vermittelt die Transformation der durch die Strahlposition x und den Strahlwinkel $u \approx \tan(u)$ definierten Strahlvektoren zwischen Objektraum $\underline{ray}' = (x', u')$ und Bildraum $\underline{ray} = (x, u)$ gemäß

$$\begin{pmatrix} x \\ u \end{pmatrix} = \underline{\underline{M}} \begin{pmatrix} x' \\ u' \end{pmatrix} \quad \text{mit} \quad \underline{\underline{M}} = \begin{pmatrix} -Mag & Mag \, z' - \frac{1}{Mag} z \\ 0 & -\frac{1}{Mag} \end{pmatrix} \quad (8)$$

wobei $Mag = \frac{f}{f' \, mag}$ für den Abbildungsmaßstab der Fernfeldabbildung steht.

Eine scharfe Abbildung liegt vor, wenn alle von einem Objektpunkt ausgehenden Strahlen unabhängig vom Strahlwinkel in einem Bildpunkt zusammengeführt werden. Entsprechend lautet die Fokusbedingung

$$M_{12} = \frac{\partial x}{\partial u'} = -\frac{1}{Mag} z + Mag z' \stackrel{!}{=} 0 \quad (9)$$

Daraus folgt unmittelbar die Abbildungsbedingung $z = Mag^2 z'$.

- 5 Es wird davon ausgegangen, dass ein von einem Objektpunkt am Ort (x', y', z') ausgehendes kegelförmiges Strahlenbündel von seinen Randstrahlen $\underline{eray}' = (x', \bar{u}' + \theta' \sin(\varphi), y', \bar{v}' + \theta' \cos(\varphi))$ objektseitig begrenzt wird, wobei \bar{u}' und \bar{v}' die Schwerstrahlwinkel und θ' den Öffnungs- bzw. Divergenzwinkel bezeichnen. Die Propagation des Strahlenbündels durch die Abbildungsoptik mit dem
10 Bildsensor an der Position $z = 0$ (in der Brennebene der bildseitigen Fourier-Optik) lautet gemäß dem (um die Richtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung erweiterten) Transfermatrixformalismus

$$\underline{eray} = \begin{pmatrix} \underline{M} & 0 \\ 0 & \underline{M} \end{pmatrix} \underline{eray}' \quad \text{mit} \quad \underline{M} = \begin{pmatrix} -Mag & Mag z' \\ 0 & -\frac{1}{Mag} \end{pmatrix} \quad (10)$$

15

Daraus ergeben sich die geometrisch-optischen Abbildungsgleichungen schließlich zu

$$\bar{x} = -Mag(x' - z' \bar{u}') \quad , \quad \bar{y} = -Mag(y' - z' \bar{v}') \quad (11a)$$

20

$$\bar{u} = -\frac{1}{Mag} \bar{u}' \quad , \quad \bar{v} = -\frac{1}{Mag} \bar{v}' \quad (11b)$$

$$\theta = -\frac{1}{Mag} \theta' \quad (11c)$$

25

$$z = Mag^2 z' \quad (11d)$$

Der Querbalken über dem Symbol zeigt dabei den Schwerstrahl an.

Grundsätzlich sind für das Strahlgrößenmaß wie auch für das Divergenzmaß fallabhängig verschiedene Konventionen möglich und üblich. Auf dem Gebiet der Lasertechnik dienen beispielsweise häufig die Momente

5

$$w_x^2(z) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} dx \int_{-\infty}^{+\infty} dy I(x, y; z) (x - \bar{x}(z))^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} dx \int_{-\infty}^{+\infty} dy I(x, y; z)}, \quad w_y^2(z) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} dx \int_{-\infty}^{+\infty} dy I(x, y; z) (y - \bar{y}(z))^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} dx \int_{-\infty}^{+\infty} dy I(x, y; z)} \quad (12)$$

mit

$$\bar{x}(z) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} dx \int_{-\infty}^{+\infty} dy I(x, y; z) x}{\int_{-\infty}^{+\infty} dx \int_{-\infty}^{+\infty} dy I(x, y; z)}, \quad \bar{y}(z) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} dx \int_{-\infty}^{+\infty} dy I(x, y; z) y}{\int_{-\infty}^{+\infty} dx \int_{-\infty}^{+\infty} dy I(x, y; z)} \quad (13)$$

10

als Grundlage einer Strahlgrößendefinition entsprechend

$$w(z) = \sqrt{w_x^2(z) + w_y^2(z)} \quad (14)$$

15

oder

$$w(z) = \sqrt[4]{w_x^2(z) w_y^2(z)} \quad (15)$$

20

Hierin bezeichnet $I(x, y; z)$ die Lichtintensität für die gewählte Schnittebene.

Mit der Momentendefinition entsprechend Gleichung (2) ergeben sich der Schwerpunkt (\bar{x}, \bar{y}) und die Strahlgrößenparameter $w_x^2, w_y^2, w^2 = w_x^2 + w_y^2$ wie folgt:

25

$$\begin{aligned}
\bar{x} &= \frac{m_{1,0}}{m_{0,0}}, \\
\bar{y} &= \frac{m_{0,1}}{m_{0,0}}, \\
w_x^2 &= \frac{m_{2,0}}{m_{0,0}} - \bar{x}^2 = \frac{m_{2,0}}{m_{0,0}} - \left(\frac{m_{1,0}}{m_{0,0}} \right)^2, \\
w_y^2 &= \frac{m_{0,2}}{m_{0,0}} - \bar{y}^2 = \frac{m_{0,2}}{m_{0,0}} - \left(\frac{m_{0,1}}{m_{0,0}} \right)^2, \\
w^2 &= w_x^2 + w_y^2 = \frac{m_{2,0}}{m_{0,0}} + \frac{m_{0,2}}{m_{0,0}} - \left(\frac{m_{1,0}}{m_{0,0}} \right)^2 - \left(\frac{m_{0,1}}{m_{0,0}} \right)^2.
\end{aligned} \tag{16}$$

Bei der Analyse des Vorwärtsstrahls sowie des Rückwärtsstrahls in dem prinzipiellen Aufbau von Fig. 2 ist zu beachten, dass nur der Vorwärtsstrahl idealisiert als „Gaußstrahl“ anzusehen ist, für welchen im Bereich des bildseitigen Fokus für die Strahlgröße w als Funktion der Ausbreitungscoordinate z in guter Näherung

$$w(z) = \sqrt{w_0^2 + \theta^2 (z - z_0)^2} \tag{17}$$

gilt, wobei w_0 die Taillengröße, θ die Divergenz und z_0 die Tailenlage (Fokuslage) bezeichnen.

Im Weiteren wird noch kurz auf Probleme eingegangen, welche sich etwa im Falle der Analyse des Rückwärtsstrahls in der zweiten Analyseeinheit 120 daraus ergeben, dass der zu untersuchende Strahl kein idealer Gaußstrahl ist, sondern ein vergleichsweise scharf begrenzter Strahl (im Weiteren auch als „Tophat-Strahl“ bezeichnet). Im Falle eines solchen scharf begrenzten Strahls ergibt sich im Fokus (Fernfeld) sowie im aberrationsfreien Idealfall die Airy'sche Lichtverteilung

$$I(r = \sqrt{x^2 + y^2}, z = z_0) = \pi P \left(\frac{1}{L_c} \right)^2 \left[\frac{2J_1 \left(2\pi \frac{r}{L_c} \right)}{2\pi \frac{r}{L_c}} \right]^2 \tag{18}$$

wobei $L_c = \frac{\lambda}{NA}$ die charakteristische Länge, P die gesamte durch das System transmittierte Leistung und $J_1(x)$ die Bessel-Funktion erster Ordnung bezeichnen.

Aufgrund des asymptotischen Abfalls $I(r, z = z_0) \propto \frac{1}{r^2}$ in dieser Lichtverteilung sind jedoch die Momente entsprechend Gleichung (12) nicht definiert. Das hieraus resultierende Problem einer Auswertung auch des „hart begrenzten“ Rückwärtsstrahls kann durch eine geeignete „künstliche“ Apodisierung überwunden werden: In einer Ausführungsform kann eine (im vorstehenden Sinne „weiche“) Apodisation

$$u(x, y; z_{NF}) \theta(x^2 + y^2 \leq R_{NA}^2) \rightarrow u(x, y; z_{NF}) A_{R_{NA}}(x, y) \quad (19)$$

durch Einbringen eines strukturierten Graufilters mit entsprechendem Profil in das Nahfeld bzw. in eine Pupillenebene realisiert werden. Hierbei bezeichnen $u(x, y; z)$ die Strahlamplitude (welche über $I(x, y; z) = |u(x, y; z)|^2$ die Intensität bestimmt) und R_{NA} den (die Öffnung bzw. numerische Apertur NA definierenden) Aperturradius. Hierzu geeignet ist beispielsweise die erst ab den zweiten Ableitungen unstetige Funktion

$$A_R(x, y) = \frac{1}{2} \left(1 + \cos \left(\pi \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{R} \right) \right) \quad (20)$$

mit dem Beschneidungsradius R im Bereich um R_{NA} .

Im Weiteren werden unterschiedliche mögliche Ausführungsformen bzw. Transmissionsverläufe von gemäß der Erfindung einsetzbaren Grauverlaufsfiltern unter Bezugnahme auf Fig. 6ff detaillierter beschrieben.

Fig. 6a zeigt eine lineare Anordnung von drei Grauverlaufsfiltern 621-623, wie sie im Aufbau von Fig. 5 verwendet wird. Fig. 6b zeigt eine (z.B. im Hinblick auf bestehende Bauraumbeschränkungen) gefaltete 2-D-Anordnung aus vier Grauver-

laufsfiltern (bzw. „Kanälen“), welche über die Grauverlaufsfilter 621-623 von Fig. 6a hinaus einen zusätzlichen, in seinem Transmissionsverlauf radial-parabolischen Grauverlaufsfilter 625 (zum Zwecke einer Spotgrößenmessung oder einer Justage) aufweist. Fig. 6c zeigt eine redundante gefaltete 2-D-
 5 Anordnung, welche zusätzlich zu zwei Grauverlaufsfiltern 621, 623 mit in x- bzw.-y-Richtung linearem Transmissionsverlauf zwei Grauverlaufsfilter 626, 627 mit in hierzu diagonalen (45°-)Richtung linearem Transmissionsverlauf aufweist. In Fig. 6c wird auf den Grauverlaufsfilter 622 mit konstantem Transmissionsverlauf verzichtet, wobei vorausgesetzt wird, dass das Signal zur Intensitätsnormierung anderweitig verfügbar ist. Fig. 7 illustriert die beliebige Anordnung von Grauverlaufs-
 10 filtern ausgehend von einer linearen Anordnung zu einer 2D-Matrixanordnung.

Durch Verwendung von paarweise entgegengesetzten Grauverlaufsfiltern (bzw. „Keilverlaufsfiltern“) kann ebenfalls eine Energienormierung abgeleitet werden.
 15 Dies wird im Folgenden kurz für die in Fig. 8a exemplarisch gezeigte Grauverlaufsfilter-Anordnung 821 dargelegt, welche je zwei in positiver bzw. negativer x- bzw. y-Richtung lineare Transmissionsverläufe zur Messung der Fokusslagekoordinaten eines zu charakterisierenden Laserstrahls aufweist.

20 Für das Ausführungsbeispiel von Fig. 8a ergeben sich die Sensorsignale zu:

$$\begin{aligned}
 S_1 &= G \left[\frac{I}{2} + I \frac{\bar{x} - x_1}{W} \right] , \\
 S_2 &= G \left[\frac{I}{2} - I \frac{\bar{x} - x_1}{W} \right] , \\
 S_3 &= G \left[\frac{I}{2} + I \frac{\bar{y} - y_3}{W} \right] , \\
 S_4 &= G \left[\frac{I}{2} - I \frac{\bar{y} - y_3}{W} \right] .
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

Zur einfacheren Erläuterung des Prinzips wird für alle Grauverlaufsfilter ein einheitlicher Gain-Wert G sowie eine einheitliche („Keil-“)Breite W des linearen
 25 Transmissionsverlaufs vorausgesetzt. Die „Keilverschiebungen“ x_1 und y_3 sind

ebenfalls paarweise gleich gewählt. I steht für die über das Lichtgebilde integrierte Gesamtintensität

$$I = m_{0,0} = \int_{-\infty}^{+\infty} dx dy I_{FF}(x, y) \quad . \quad (22)$$

5

Durch Addition und Differenzbildung ergibt sich

$$\begin{aligned} S_1 + S_2 &= G I \quad , \\ S_1 - S_2 &= 2 G I \frac{\bar{x} - x_1}{W} \quad , \\ S_3 + S_4 &= G I \quad , \\ S_3 - S_4 &= 2 G I \frac{\bar{y} - y_3}{W} \quad . \end{aligned} \quad (23)$$

10

Die beiden Summensignale „ S_1+S_2 “ und „ S_3+S_4 “ ergeben gemäß dem Gleichungssystem (23) jeweils die Gesamtintensität. Diese kann zur Normierung der beiden Differenzsignale herangezogen werden, um schließlich die gewünschten Schwerpunktlagen zu extrahieren.

15

Grauverlaufsfilter zweiter Ordnung, welche einen parabolischen Transmissionsverlauf besitzen, bieten die Möglichkeit, die zweiten Momente der Lichtverteilung und damit die Größe des zu analysierenden Lichtstrahls (bzw. des „Lichtgebildes“) zu messen. Der Verlauf eines Grauverlaufsfilters mit parabolischem Transmissionsverlauf wird durch die Transmissionsfunktion

20

$$T(s) = \left(\frac{s - s_0}{W} \right)^2 \quad (24)$$

parametrisiert. Darin bezeichnet s die Lagekoordinate in Verlaufsrichtung, s_0 die Lage des Scheitels und W die Breite des Bereichs, über den der komplette Anstieg des Transmissionskoeffizienten vom Wert Null auf den Wert Eins erfolgt.

25

Fig. 8b zeigt exemplarisch und schematisch eine Ausgestaltung einer Grauverlaufsfilter-Anordnung 822 mit fünf Grauverlaufsfiltern (bzw. „Messkanälen“), welche einen Grauverlaufsfilter mit linearem Transmissionsverlauf in x-Richtung, einen Grauverlaufsfilter mit linearem Transmissionsverlauf in y-Richtung, einen uniformen Grauverlaufsfilter mit konstantem Transmissionsverlauf als Referenz, einen Grauverlaufsfilter mit in x-Richtung parabelförmigem Transmissionsverlauf sowie einen Grauverlaufsfilter mit in y-Richtung parabelförmigem Transmissionsverlauf aufweist. Für diese Auslegung ergeben sich die Signale S_1 bis S_5 zu:

$$\begin{aligned}
 S_1 &= \eta_1 \int_{-\infty}^{+\infty} dx dy I_{FF}(x, y) \left[\frac{1}{2} + \frac{x - x_1}{W_1} \right], \\
 S_2 &= \eta_2 \int_{-\infty}^{+\infty} dx dy I_{FF}(x, y) \left[\frac{1}{2} + \frac{y - y_2}{W_2} \right], \\
 S_3 &= \eta_3 \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} dx dy I_{FF}(x, y), \\
 S_4 &= \eta_4 \int_{-\infty}^{+\infty} dx dy I_{FF}(x, y) \left(\frac{x - x_4}{W_4} \right)^2, \\
 S_5 &= \eta_5 \int_{-\infty}^{+\infty} dx dy I_{FF}(x, y) \left(\frac{y - y_5}{W_5} \right)^2.
 \end{aligned} \tag{25}$$

Die Parameter W_1 , W_2 , W_4 und W_5 sowie x_1 , y_2 , x_4 und y_5 charakterisieren die vier Grauverlaufsfilter. Die Parameter η_1 bis η_5 stehen für die Detektionsempfindlichkeiten der Kanäle, deren Variation verschiedene Ursachen (z.B. Bauteilschwankungen, usw.) haben kann. Durch Normierung auf das Referenzsignal, das hier durch den uniformen Grauverlaufsfilter mit der Transmission $\frac{1}{2}$ erhalten wird, werden Energieschwankungen (Laserpulsschwankungen) eliminiert. Die vier normierten Signale enthalten dann die Information über die Lichtverteilung und lauten:

$$\begin{aligned}
\frac{S_1}{S_3} &= \underbrace{\frac{\eta_1}{\eta_3} \left(1 - 2 \frac{x_1}{W_1} \right)}_{C_1} + \underbrace{\frac{\eta_1}{\eta_3} \frac{1}{W_1}}_{G_1} \bar{x} = C_1 + G_1 \bar{x} , \\
\frac{S_2}{S_3} &= \underbrace{\frac{\eta_2}{\eta_3} \left(1 - 2 \frac{y_2}{W_2} \right)}_{C_2} + \underbrace{\frac{\eta_2}{\eta_3} \frac{1}{W_2}}_{G_2} \bar{y} = C_2 + G_2 \bar{y} , \\
\frac{S_4}{S_3} &= \underbrace{\frac{\eta_4}{\eta_3} \frac{2}{W_4^2}}_{G_4} \left(\langle x^2 \rangle - 2x_4 \bar{x} + x_4^2 \right) = G_4 \left(\langle x^2 \rangle - 2x_4 \bar{x} + x_4^2 \right) , \\
\frac{S_5}{S_3} &= \underbrace{\frac{\eta_5}{\eta_3} \frac{2}{W_5^2}}_{G_5} \left(\langle y^2 \rangle - 2y_5 \bar{y} + y_5^2 \right) = G_5 \left(\langle y^2 \rangle - 2y_5 \bar{y} + y_5^2 \right) .
\end{aligned} \tag{26}$$

Die Auslegungsparameter werden darin teilweise zu Effektiv-Parametern zusammengefasst. Durch Kalibration oder anderweitig zu bestimmen bleiben dann die beiden Offset-Werte C_1 und C_2 , die vier Gain-Werte G_1 , G_2 , G_4 und G_5 sowie die beiden Scheitellagen x_4 und y_5 . Durch Umstellung der Gleichungen des Gleichungssystems (21) und in Kenntnis der acht Kalibrierparameter ergibt sich schließlich die Strahlagen- und Strahlgrößeninformation aus den Messsignalen entsprechend

$$\begin{aligned}
\bar{x} &= \frac{1}{G_1} \left(\frac{S_1}{S_3} - C_1 \right) , \\
\bar{y} &= \frac{1}{G_2} \left(\frac{S_2}{S_3} - C_2 \right) , \\
w_x^2 &= \langle x^2 \rangle - \bar{x}^2 = \frac{1}{G_4} \frac{S_4}{S_3} + 2x_4 \bar{x} - x_4^2 - \bar{x}^2 , \\
w_y^2 &= \langle y^2 \rangle - \bar{y}^2 = \frac{1}{G_5} \frac{S_5}{S_3} + 2y_5 \bar{y} - y_5^2 - \bar{y}^2 , \\
w^2 &= w_x^2 + w_y^2 .
\end{aligned} \tag{27}$$

Zusammenfassend bieten Grauverlaufsfilter zweiter Ordnung auch den messtechnischen Zugang auf die Strahlgrößenparameter w_x^2 und w_y^2 .

Wenn lediglich die Strahlgröße $w^2 = w_x^2 + w_y^2$ von Interesse ist, dann können ausgehend von der Ausführungsform von Fig. 8b die beiden Grauverlaufsfilter mit parabelförmigem Transmissionsverlauf durch einen einzigen Grauverlaufsfilter mit rotationsparaboloidförmigem Transmissionsverlauf zum Erhalt einer Grauverlaufsfilter-Anordnung 823 gemäß Fig. 8c ersetzt werden. Die Signalgewinnung ist gemäß dem vorstehend beschriebenen Schema entsprechend anzupassen.

Bei Verwendung räumlich verschobener parabelförmiger Transmissionsverläufe ist es ferner möglich, einen Fokuspositions- und Fokusgrößensensor zu realisieren, der ohne Verwendung von linearen Transmissionsverläufen auskommt. Eine beispielhafte Ausgestaltung einer solchen Grauverlaufsfilter-Anordnung 824 ist in Fig. 8d gezeigt. Das Prinzip basiert auf paarweise parabelförmigen Grauverlaufsfiltern, deren Scheitel paarweise entgegengesetzt entlang der Verlaufsachse verschoben sind.

Für diese Auslegung ergeben sich die auf die Referenz normierten Signale zu:

$$\begin{aligned}
 \frac{S_1}{S_3} &\propto G \left(\langle x^2 \rangle - 2x_0 \bar{x} + x_0^2 \right) , \\
 \frac{S_2}{S_3} &= G \left(\langle x^2 \rangle + 2x_0 \bar{x} + x_0^2 \right) , \\
 \frac{S_4}{S_3} &= G \left(\langle y^2 \rangle - 2y_0 \bar{y} + y_0^2 \right) , \\
 \frac{S_5}{S_3} &= G \left(\langle y^2 \rangle + 2y_0 \bar{y} + y_0^2 \right) .
 \end{aligned} \tag{28}$$

Zur einfacheren Erläuterung des Prinzips wird für alle Grauverlaufsfilter (bzw. „Kanäle“) ein einheitlicher Gain-Wert G angenommen. Die Scheitel-Verschiebungen sind $x_1 = x_0$, $x_2 = -x_0$, $y_4 = y_0$ und $y_5 = -y_0$. Durch Summen- und Differenzbildung erhält man folgende Gleichungen, aus denen sich in Kenntnis der Scheitelverschiebungen wiederum die Schwerpunktkoordinaten und die Spotgrößen extrahieren lassen.

$$\begin{aligned}
\frac{1}{G} \left(\frac{S_2}{S_3} - \frac{S_1}{S_3} \right) &= 4x_0 \bar{x} \quad , \\
\frac{1}{G} \left(\frac{S_2}{S_3} + \frac{S_1}{S_3} \right) &= 2 \left(\langle x^2 \rangle + x_0^2 \right) \quad , \\
\frac{1}{G} \left(\frac{S_5}{S_3} - \frac{S_4}{S_3} \right) &= 4y_0 \bar{y} \quad , \\
\frac{1}{G} \left(\frac{S_5}{S_3} + \frac{S_4}{S_3} \right) &= 2 \left(\langle y^2 \rangle + y_0^2 \right) \quad .
\end{aligned} \tag{29}$$

Das vorstehend beschriebene Schema kann zur Messung von Momenten höherer Ordnung beliebig fortgesetzt werden. Die auf den Schwerpunkt bezogenen Mo-
 5 mente

$$\bar{m}_{k,l} = \int_{-\infty}^{+\infty} dx dy I_{FF}(x,y) (x - \bar{x})^k (y - \bar{y})^l \quad , \quad k, l > 1 \tag{30}$$

repräsentieren dabei die Formaspekte der Intensitätsverteilung (3. Momente:
 10 „Schiefe“, 4. Momente: Wölbung bzw. „Kurtosis“, ...).

Im Weiteren wird unter Bezugnahme auf Fig. 9a-c eine Ausführungsform einer
 Grauverlaufsfilter-Anordnung 920 unter Verwendung von vier Grauverlaufsfiltern
 921-924 näher betrachtet. Dabei weist die Grauverlaufsfilter-Anordnung 920 ge-
 15 mäß Fig. 9a einen ersten Grauverlaufsfilter 921 mit linearem Transmissionsverlauf
 in x-Richtung, einen zweiten Grauverlaufsfilter 922 mit linearem Transmissionsver-
 lauf in y-Richtung, einen dritten Grauverlaufsfilter 923 mit konstantem Transmissi-
 onsverlauf als Referenz sowie einen vierten Grauverlaufsfilter 924 mit rotations-
 paraboloidförmigem Transmissionsverlauf auf, womit die Strahlparameter \bar{x} , \bar{y}
 20 und $w^2 = w_x^2 + w_y^2$ nach Fokussierung messtechnisch zugänglich werden.

Die vollen Kreise in Fig. 9a symbolisieren die Linsen der auf die Grauverlaufsfilter-
 Anordnung 920 folgenden Linsen-Anordnung, und die gestrichelt gerundeten
 Quadrate symbolisieren die Lichtintensitätssensoren der Lichtintensitätssensoren-

Anordnung. Eine parasitäre nullte Beugungsordnung sowie die höheren parasitären Beugungsordnungen werden nicht transmittiert.

Zur eingangs bereits beschriebenen Aufspaltung des zu analysierenden Lichtstrahls wird ein 2D-Gitter benötigt, welches die Energie in die vier ersten diagonalen Beugungsordnungen konzentriert. Hierzu kann ein in Fig. 9c angedeutetes hybrides (d.h. als kombiniertes Amplituden-Phasen-DOE ausgestaltetes) binäres Gitter (Schachbrett-Gitterdesign) verwendet werden, wie es in Fig. 9b-c dargestellt ist. Fig. 9b zeigt eine Elementarzelle des auf eine Energiekonzentration in den ersten vier diagonalen Beugungsordnungen optimierten hybriden Schachbrettgitters. Weiße Bereiche besitzen die Transmission 1 und haben eine konstante Phase entsprechend dem im Feld angegebenen Wert. Fig. 9c zeigt die Stärke der Beugungsordnung. Durch das spezielle Gitterdesign werden 89% der transmittierten Energie in die vier ersten diagonalen Beugungsordnungen konzentriert. Insbesondere treten für ein ideal gefertigtes Gitter weder die nullte noch sämtliche höheren Beugungsordnungen auf.

Eine exemplarische Auslegung eines Grauverlaufsfilters 950 ist in Fig. 10 veranschaulicht. Die die Auslegung bestimmenden Parameter sind:

- Radius s_{\max} des Intensitätsgebildes. Dieser wird maßgeblich durch die Grundeigenschaften des Strahls (Öffnung, Divergenz) und seiner Variationen (Aberrationen, Fokusvariation, usw.) bestimmt und ist derart zu definieren, dass benachbarte replizierte Intensitätsgebilde, deren Begrenzungskreise sich gerade gegenseitig berühren, niemals während des Betriebes störend überlagern oder gar interferieren.
- Radius θ_{\max} des Bereiches im Winkelraum, der die auftretenden (und zu messenden) Strahlrichtungsvariationen beschränkt.
- Radius des Nutzbereichs im Fernfeld (=Verlaufsfilterebene) r_{\max} . Entsprechend der in Abbildung 21 dargestellten Geometrie gilt $r_{\max} = \theta_{\max} f_{FF} + s_{\max}$. Darin steht f_{FF} für die Brennweite der Fokussierlinse.

- Breite des Keilverlaufs W , in dem die Transmission von 1 auf 0 abfällt, ist damit durch $W = 2\kappa_1 r_{\max}$ gegeben. Die Wahl des Überlaufparameters κ_1 (>1.5) hängt von den für die Justage oder die Systemeinrichtung benötigten Reserven ab.
- 5 - Betrag des Beugungswinkels Δ_θ der ersten Ordnungen des replizierenden 2D-Schachbrettgitters wird durch den Abstand der Verlaufsfilterzentren von der optischen Achse bestimmt, entsprechend $f_{FF} \Delta_\theta = \kappa_2 \sqrt{2} W$, $\kappa_2 > 0.5$. Der Faktor $\sqrt{2}$ trägt der diagonalen Kanalanordnung Rechnung. Vorteilhafterweise wird die Auswirkung einer parasitären nullten Ordnung durch einen Dunkelbe-
- 10 reich von der Größe eines Graufilters geblockt, was $\kappa_2 \approx 1$ entspricht.

Fig. 11a-c und Fig. 12a-d zeigen schematische Darstellungen zur Erläuterung konkreter Ausführungsformen eines im Rahmen der vorliegenden Erfindung ein-

15 setzbaren Grauverlaufsfilters mit binären Sub-Wellenlängenstrukturen. Durch diese Ausführungsformen wird dem Umstand Rechnung getragen, dass bei dem erfindungsgemäßen Konzept vergleichsweise hohe Anforderungen an die Güte des bzw. der eingesetzten Grauverlaufsfilter(s) zu stellen sind, da diese die bei der Positionsmessung erzielte Genauigkeit unmittelbar bestimmt und etwaige Transmissionsverlaufsschwankungen entsprechende Messfehler in der Strahlanalyse

20 zur Folge haben.

Bei typischen Abmessungen der gesamten Messeinrichtung und zur Erzielung hinreichend hoher Empfindlichkeiten bei der Strahlrichtungsbestimmung sind i.d.R. steile Transmissionsvariationen der eingesetzten Grauverlaufsfilter(s) über kurze

25 Strecken erforderlich (z.B. typische Transmissionsgradienten im Bereich von 0.2mm^{-1} bis 5mm^{-1}). Bei typischen angestrebten „Genauigkeit vs. Messbereich“-Verhältnissen von 1:1000 (z.B.: Messbereich bei der Strahlwinkelbestimmung: $\pm 1\text{mrad}$ bei Genauigkeit $\pm 1\mu\text{rad}$) kann ferner z.B. gefordert sein, dass die Abweichung der lokalen Transmission nicht größer ist als $1/1000$ des gesamten Transmissionsbereichs.

30

Bei Realisierung der o.g. binären Sub-Wellenlängenstrukturen weist z.B. jeder Grauverlaufsfilter ein planes, transmittierendes Substrat auf, auf welchem nicht transmittierende bzw. lichtundurchlässige (d.h. entweder vollständig absorbierende oder vollständig reflektierende) binäre Sub-Wellenlängenstrukturen aufgebracht sind. Lediglich beispielhaft kann ein Grauverlaufsfilter etwa eine Größe von 1mm*1mm aufweisen und mit einer Struktur aus 1000*1000 Pixeln bedruckt sein, so dass sich etwa 1µm große Strukturelemente ergeben, deren Größe somit deutlich unterhalb der beispielhaften Wellenlänge von etwa 10.6µm eines zu analysierenden Lichtstrahls im langwelligen Infrarotbereich liegt.

Anders als bei Beugungsgittern (mit Strukturen etwa von der Größe der Wellenlänge oder größer) besitzen solche Sub-Wellenlängenstrukturen eine Periode kleiner als die Wellenlänge, was dazu führt, dass keine definierte Beugung auftritt (also quasi nur die nullte Ordnung transmittiert wird). Die erfindungsgemäßen Binär-Strukturen werden nun so angeordnet, dass gemittelt über einen bestimmten Bereich (etwa entsprechend der Spotgröße des zu analysierenden Lichtstrahls) im Mittel effektive Transmissionswerte bzw. Grauwerte zwischen Null und Eins erhalten werden.

Zur Vermeidung unerwünschter Periodizitäten (welche wiederum unerwünschte Beugungseffekte zur Folge hätten) können grundsätzlich z.B. aus der Drucktechnik bekannte Verfahren (z.B. Floyd-Steinberg-Algorithmus) angewendet werden. Ein solches Verfahren wurde bei der in Fig. 11a-b gezeigten Ausführungsform angewendet. Dabei zeigt Fig. 11a den realisierten Transmissionsverlauf (Grauverlauf) 961, und Fig. 11b zeigt die hierzu verwendete Binär-Struktur 962. Wie aus der entsprechenden Fourier-Transformation 963 gemäß Fig. 11c ersichtlich, treten keine unerwünschten periodischen Strukturen auf.

Die lokale Mittelung, die nötig ist, um für die den Binär-Strukturen eine effektive lokale Transmission T_{eff} zu erhalten, wird somit durch Integration über die endliche Strahlgröße realisiert:

$$T_{eff} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} dx dy I_0(x, y) T(x, y)}{\int_{-\infty}^{+\infty} dx dy I_0(x, y)} \quad (31)$$

Hierbei ist $I_0(x, y)$ die eingehende Intensitätsverteilung und $T(x, y)$ die (binäre) Transmission des Grauverlaufsfilters. Um die geforderte Linearität des Grauverlaufsfilters zu erreichen, muss eine hinreichend große Zahl von binären Strukturelementen im Integrationsbereich des Strahls liegen. Um ein „Genauigkeit vs. Messbereich“-Verhältnis von 1:1000 zu erreichen, kann der Stahl z.B. etwa 100*100 Strukturelemente überdecken.

- 10 Gemäß Fig. 12b wandert etwa in einer Simulation für die in Fig. 12a gezeigte binäre Sub-Wellenlängenstruktur eines Grauverlaufsfilters ein gaußförmiger Lichtspot von links nach rechts, wobei sich in der Auftragung von Fig. 12c für die durch den Grauverlaufsfilter transmittierte Lichtintensität eine sehr gute Linearität (insbesondere ohne unerwünschte Granularitäten infolge der Strukturelemente) ergibt. Ein
- 15 in Fig. 12d gezeigter, aus den sehr geringen Abweichungen von der Linearität resultierender Positionsfehler liegt deutlich unterhalb von $1\mu\text{m}$ über eine Strecke von etwa $600\mu\text{m}$, so dass ein sehr gutes Verhältnis von Messfehler zu Messbereich erhalten wird.
- 20 Wenn die Erfindung auch anhand spezieller Ausführungsformen beschrieben wurde, erschließen sich für den Fachmann zahlreiche Variationen und alternative Ausführungsformen, z.B. durch Kombination und/oder Austausch von Merkmalen einzelner Ausführungsformen. Dementsprechend versteht es sich für den Fachmann, dass derartige Variationen und alternative Ausführungsformen von der vor-
- 25 liegenden Erfindung mit umfasst sind, und die Reichweite der Erfindung nur im Sinne der beigefügten Patentansprüche und deren Äquivalente beschränkt ist.

Patentansprüche

1. System zur Analyse eines von einer Strahlführungsoptik geführten Lichtstrahls, mit
 - einer Grauverlaufsfilter-Anordnung (120, 520), welche in einer Fernfeldebene der Strahlführungsoptik angeordnet ist und wenigstens einen Grauverlaufsfilter (121, 521, 522, 523) mit örtlich variierender Transmission aufweist; und
 - einer Lichtintensitätssensor-Anordnung mit mindestens einem Lichtintensitätssensor (140, 540), welche in einer Nahfeldebene der Strahlführungsoptik angeordnet ist und für jeden Grauverlaufsfilter (121, 521, 522, 523) der Grauverlaufsfilter-Anordnung (120, 520) jeweils die durch den Grauverlaufsfilter transmittierte Lichtintensität misst (141, 541, 542, 543).
2. System nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das System in einem Kepler-Teleskop-Aufbau eine erste Fourier-Optik (110, 510) und eine zweite Fourier-Optik (130, 531, 532, 533) aufweist, wobei die Fernfeldebene der Strahlführungsoptik sich bezogen auf den optischen Strahlengang zwischen der ersten und zweiten Fourier-Optik befindet und wobei die Nahfeldebene der Strahlführungsoptik sich bezogen auf den optischen Strahlengang nach der zweiten Fourier-Optik befindet.
3. System nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass wenigstens ein Grauverlaufsfilter (121, 521, 523) einen in einer vorbestimmten Raumrichtung linearen Transmissionsverlauf besitzt.
4. System nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Grauverlaufsfilter-Anordnung (520) einen ersten Grauverlaufsfilter (521) mit linearem Transmissionsverlauf in einer ersten Raumrichtung und einen zweiten Grauverlaufsfilter (523) mit linearem Transmissionsverlauf in einer von der ersten Raumrichtung verschiedenen zweiten Raumrichtung aufweist.

5. System nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die zweite Raumrichtung zur ersten Raumrichtung senkrecht ist.
- 5 6. System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass wenigstens ein Grauverlaufsfilter einen zumindest in einer vorbestimmten Raumrichtung parabelförmigen Transmissionsverlauf besitzt.
7. System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass wenigstens ein Grauverlaufsfilter einen Transmissionsverlauf mit
10 rotationsparabolidförmiger oder sattelförmiger Geometrie besitzt.
8. System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass wenigstens ein Grauverlaufsfilter (522) zur Ermöglichung einer Intensitätsnormierung einen konstanten Transmissionsverlauf besitzt.
15
9. System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Grauverlaufsfilter-Anordnung (520) ein Array aus einer Mehrzahl von Grauverlaufsfiltern (521, 522, 523) aufweist.
20
10. System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Lichtintensitätssensor-Anordnung (540) ein Array aus einer Mehrzahl von Lichtintensitätssensoren (541, 542, 543) aufweist.
- 25 11. System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass dieses eine bezogen auf die Lichtausbreitungsrichtung stromaufwärts der Grauverlaufsfilter-Anordnung (520) angeordnete strahlaufspaltende Struktur (505) zur Aufspaltung des zu analysierenden Lichtstrahls in eine Mehrzahl von Teilstrahlen aufweist.

12. System nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass diese strahlaufspaltende Struktur (505) in einer Nahfeldebene der Strahlführungsoptik angeordnet ist.
- 5 13. System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass wenigstens ein Grauverlaufsfilter aus Binärstrukturen gebildet ist, wobei die Strukturgrößen dieser Binärstrukturen kleiner sind als die Wellenlänge des zu analysierenden Lichtstrahls.
- 10 14. System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der zu analysierende Lichtstrahl ein Laserstrahl, insbesondere ein Laserstrahl mit einer Wellenlänge im Infrarotbereich, ist.
- 15 15. Verfahren zur Analyse eines von einer Strahlführungsoptik geführten Lichtstrahls,
- wobei ein zu analysierender Lichtstrahl über eine Grauverlaufsfilter-Anordnung (120, 520), welche in einer Fernfeldebene der Strahlführungsoptik angeordnet ist und wenigstens einen Grauverlaufsfilter (121, 521, 522, 523) mit örtlich variierender Transmission aufweist, auf
20 eine Lichtintensitätssensor-Anordnung mit mindestens einem Lichtintensitätssensor (140, 540), welche in einer Nahfeldebene der Strahlführungsoptik angeordnet ist und für jeden Grauverlaufsfilter (121, 521, 522, 523) der Grauverlaufsfilter-Anordnung (120, 520) jeweils die durch den Grauverlaufsfilter transmittierte Lichtintensität misst (141,
25 541, 542, 543), gelenkt wird;
 - wobei aus der gemessenen Lichtintensität wenigstens ein Strahlparameter zur Charakterisierung des zu analysierenden Lichtstrahls abgeleitet wird.

16. Verwendung eines Grauverlaufsfilters in einem System nach einem der Ansprüche 1 bis 14, wobei der Grauverlaufsfilter aus Binärstrukturen gebildet ist, und wobei die Strukturgrößen dieser Binärstrukturen kleiner sind als die Wellenlänge eines zu analysierenden Lichtstrahls.

5

17. Verwendung eines Grauverlaufsfilters nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, dass der zu analysierende Lichtstrahl eine Wellenlänge im Infrarotbereich besitzt.

Fig. 1

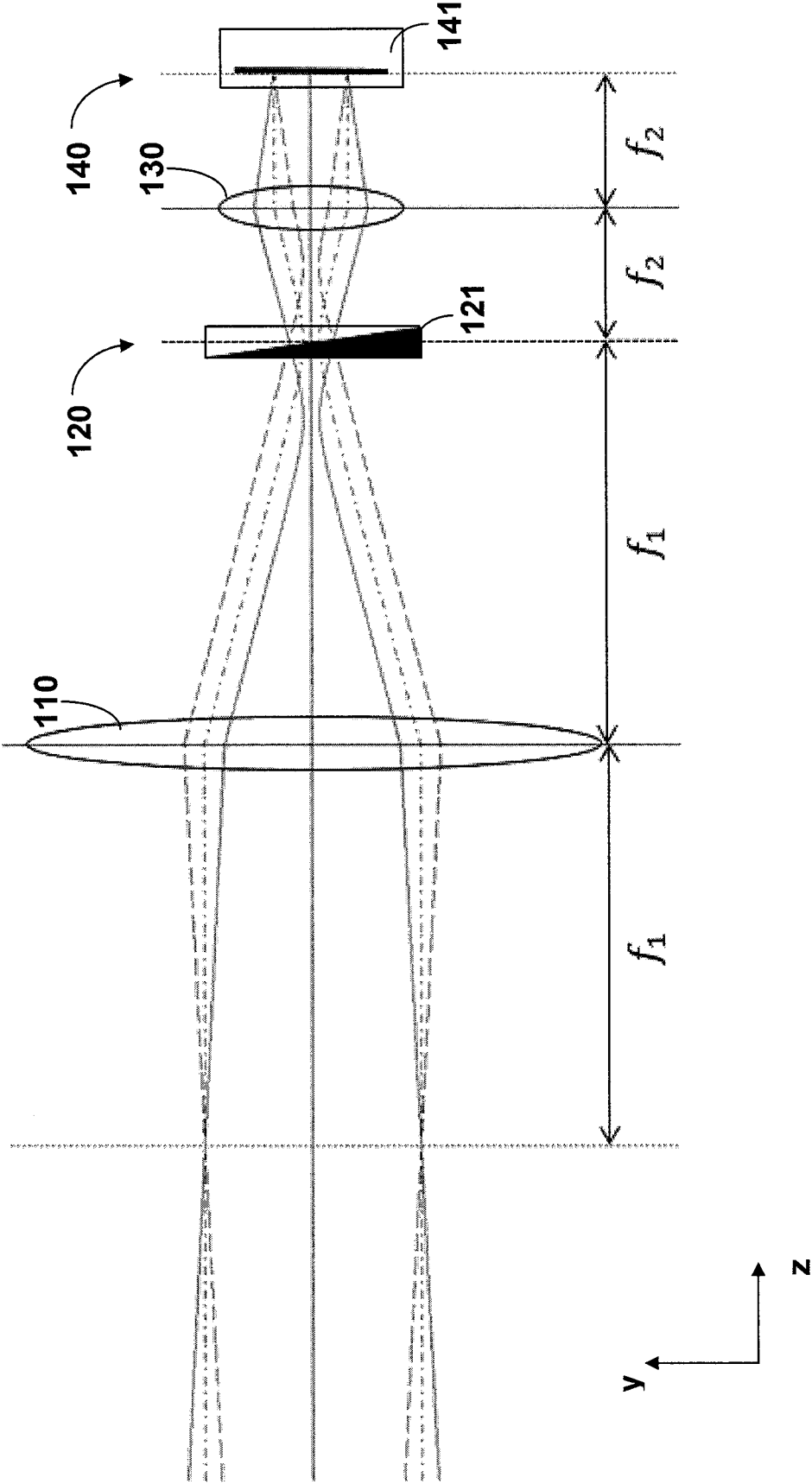


Fig. 2

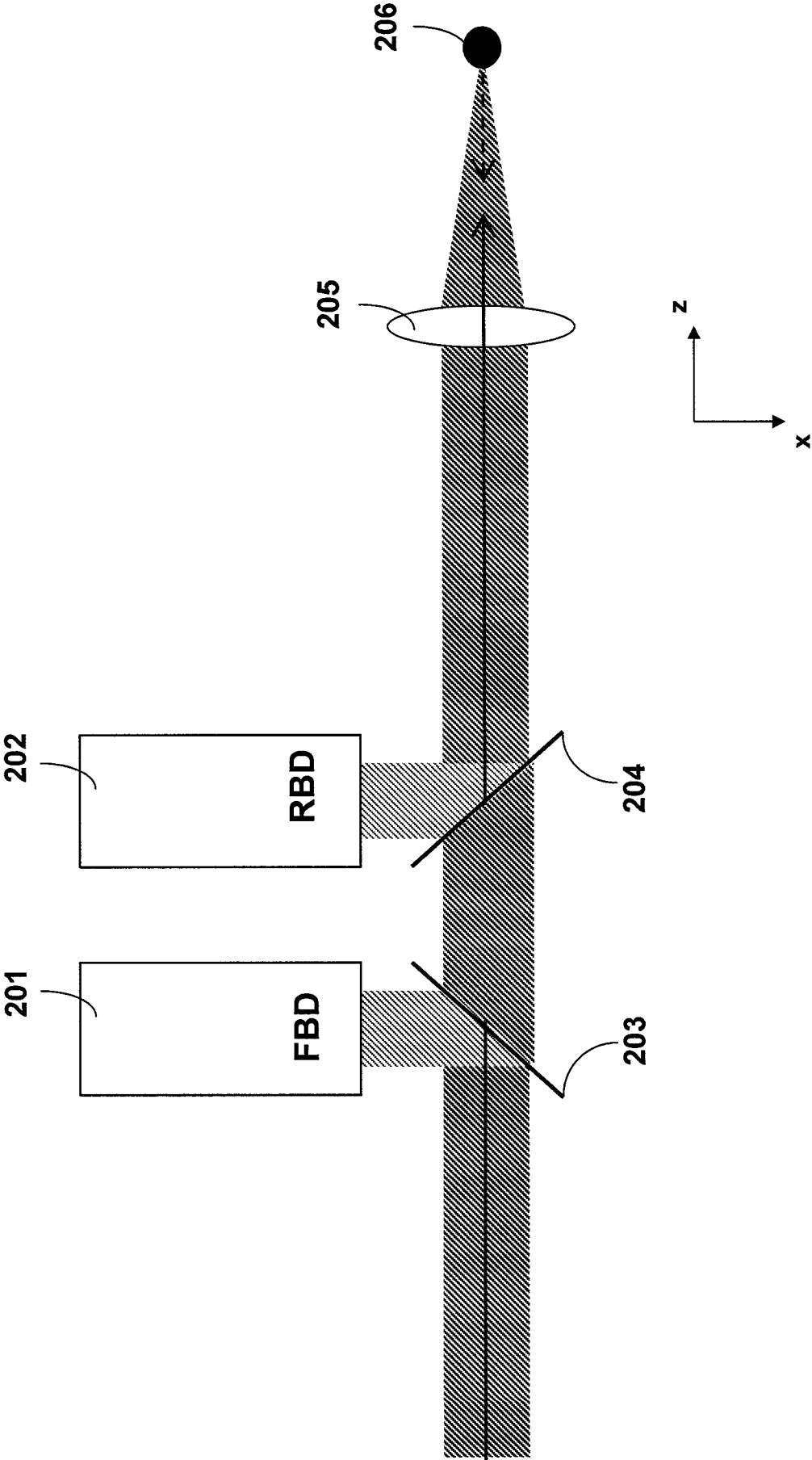


Fig. 3

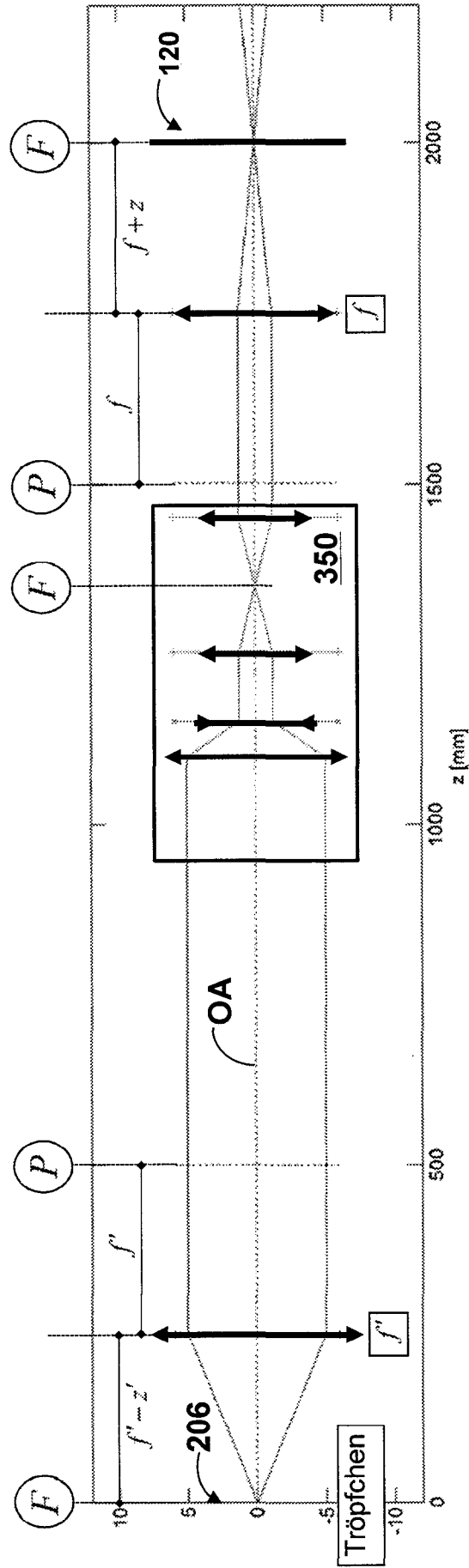


Fig. 4

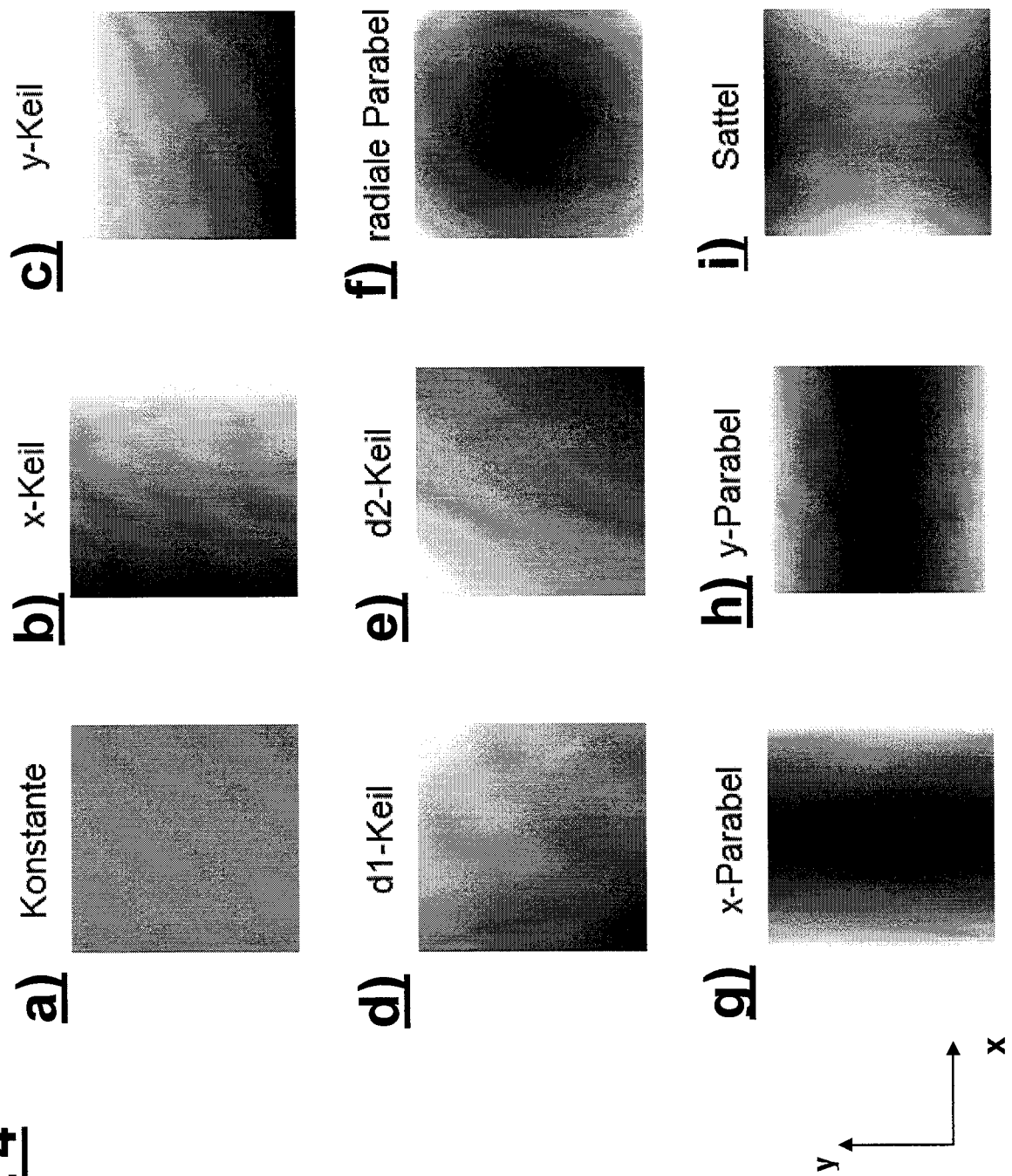


Fig. 6

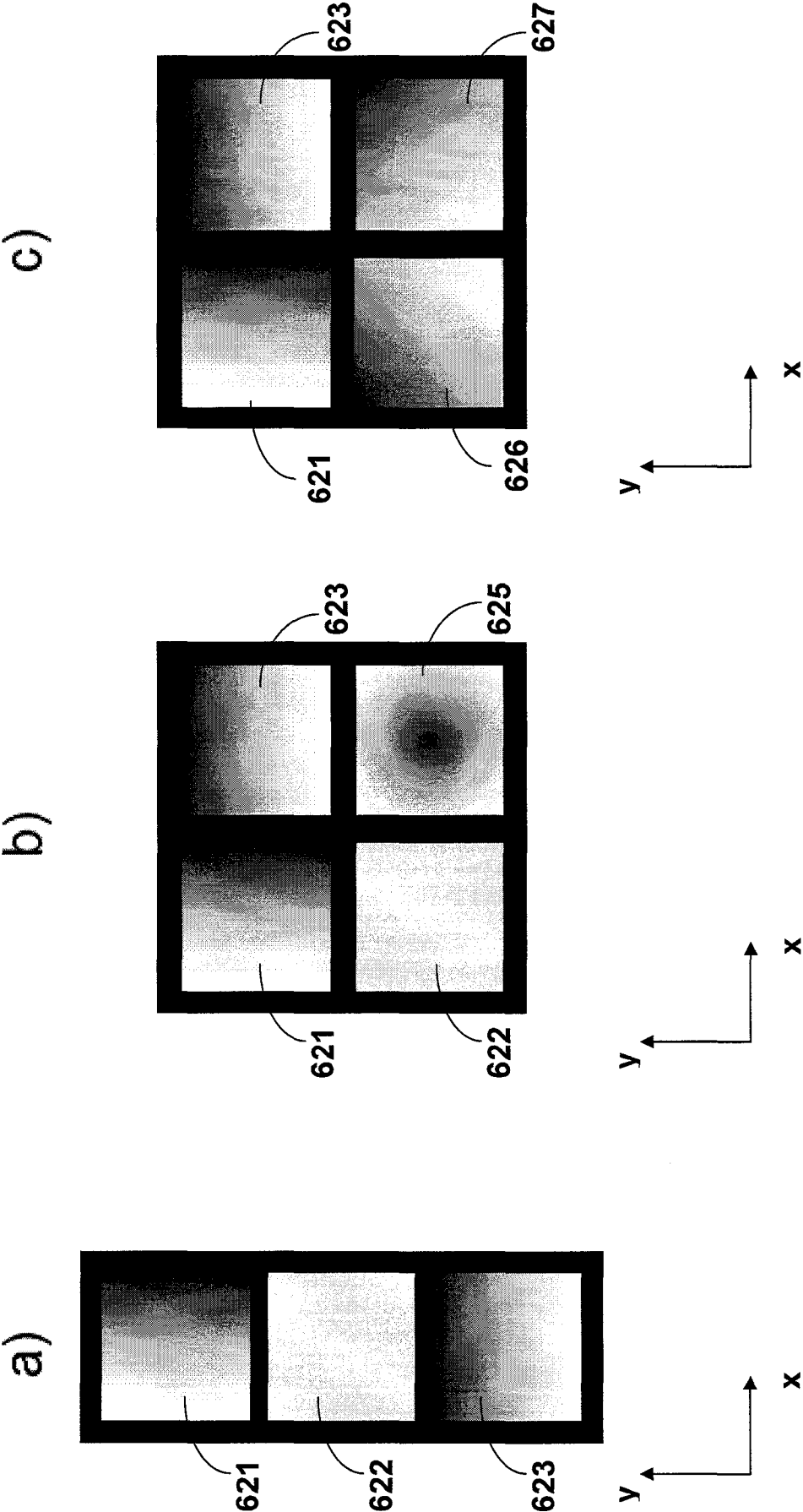


Fig. 7

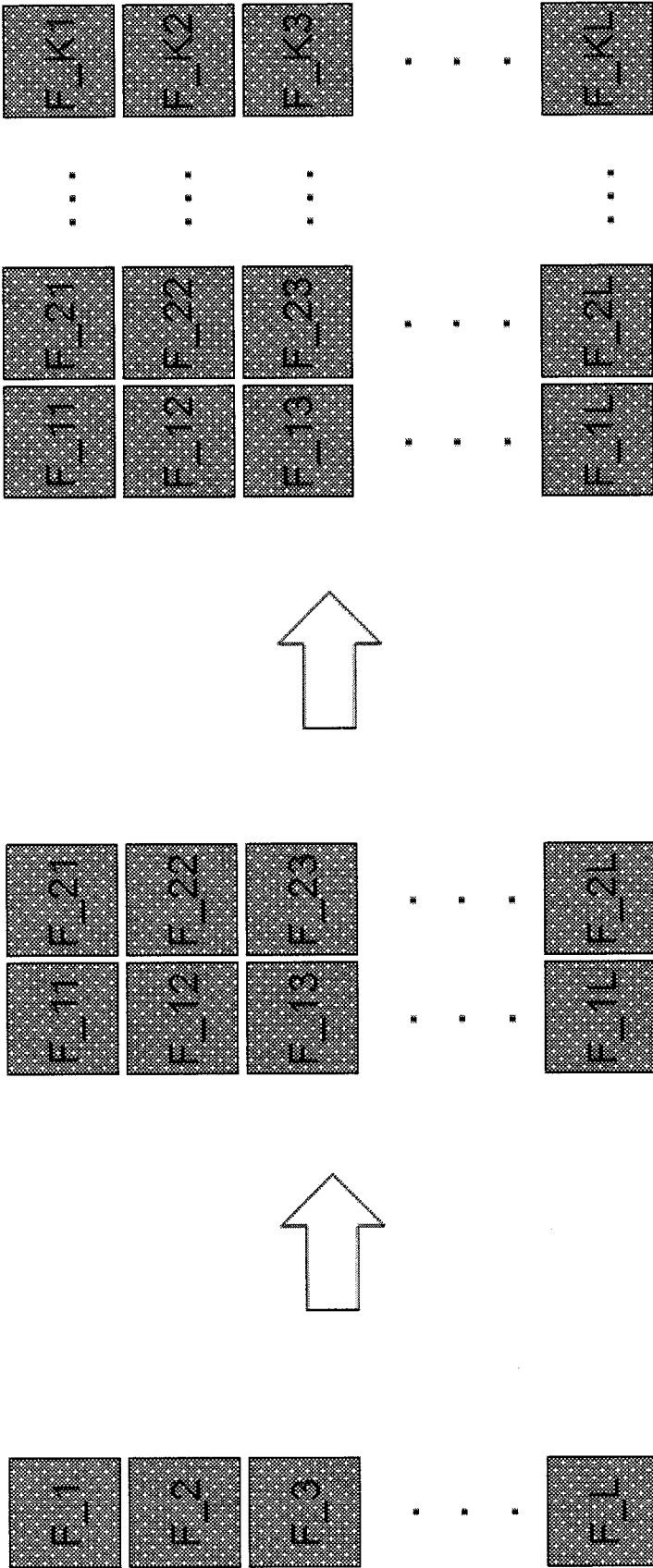


Fig. 8

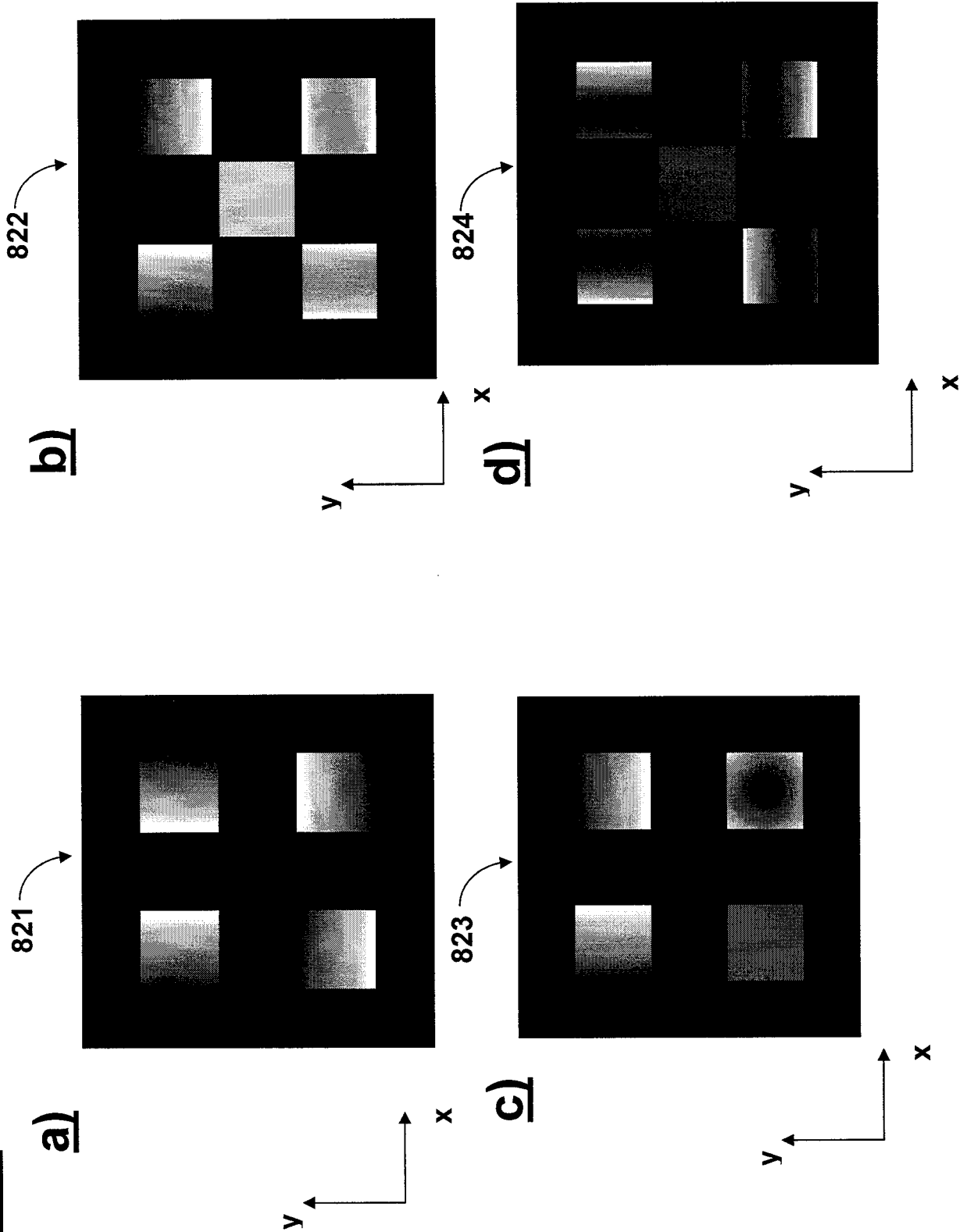


Fig. 9

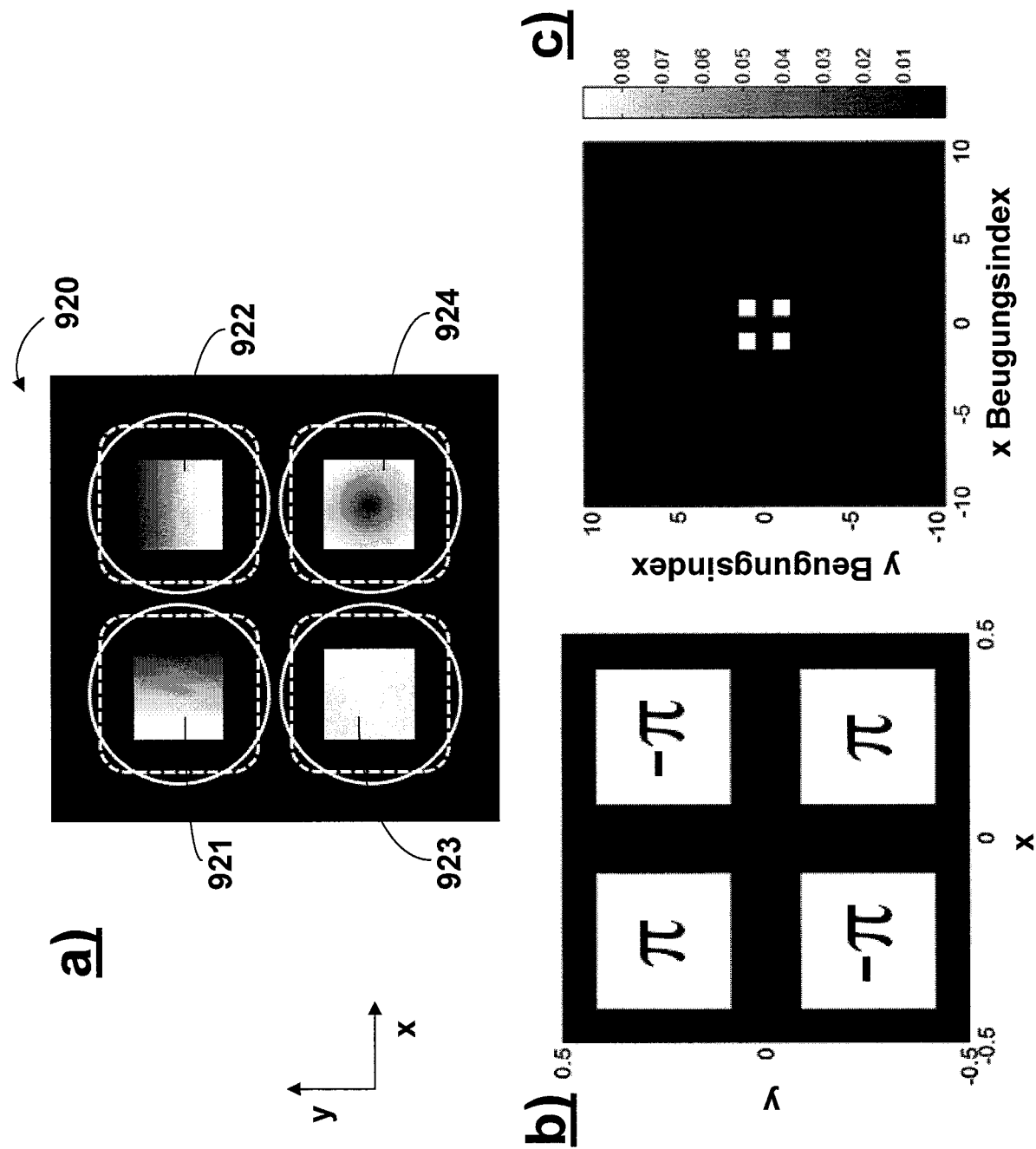


Fig. 10

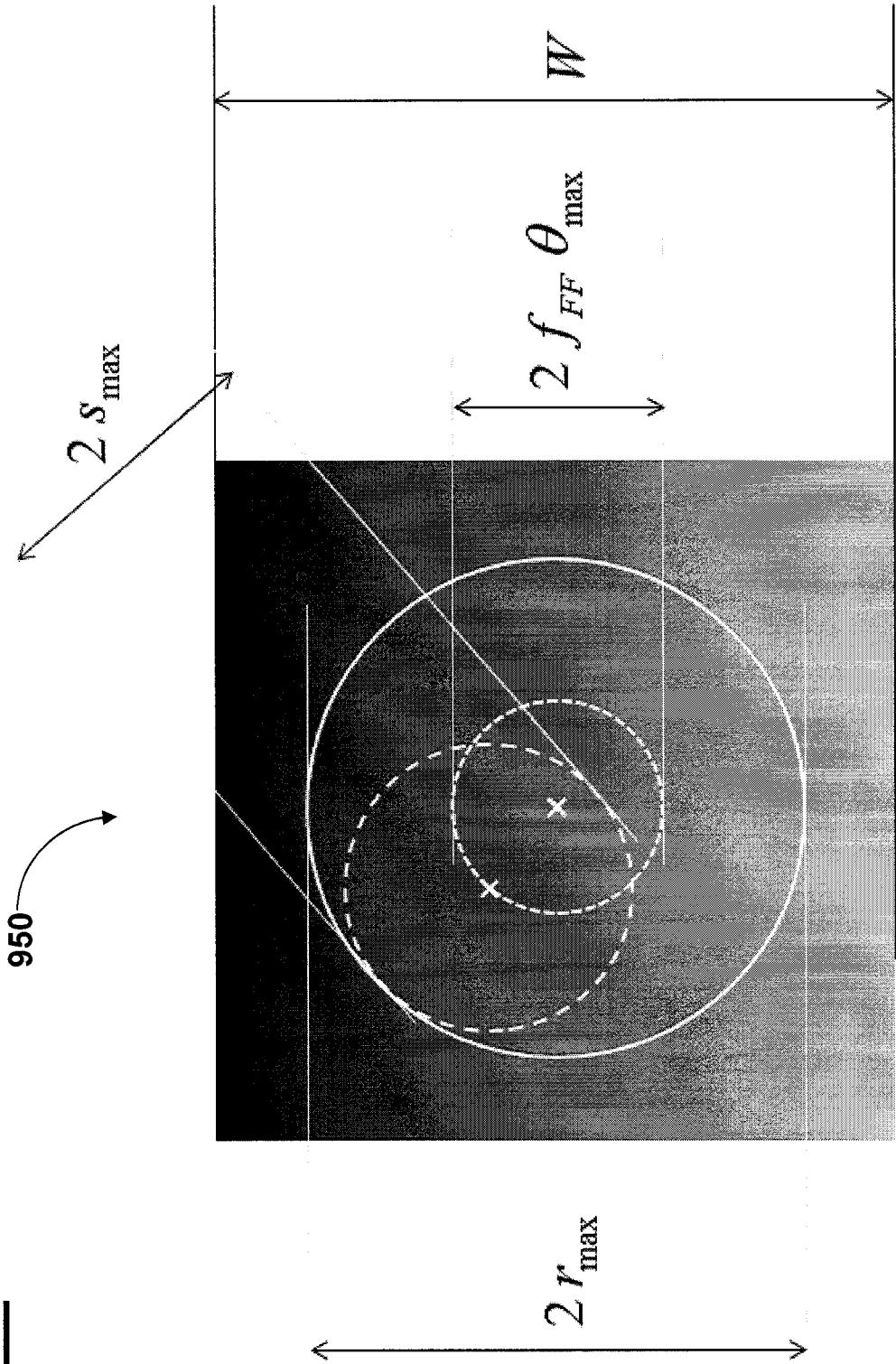


Fig. 11

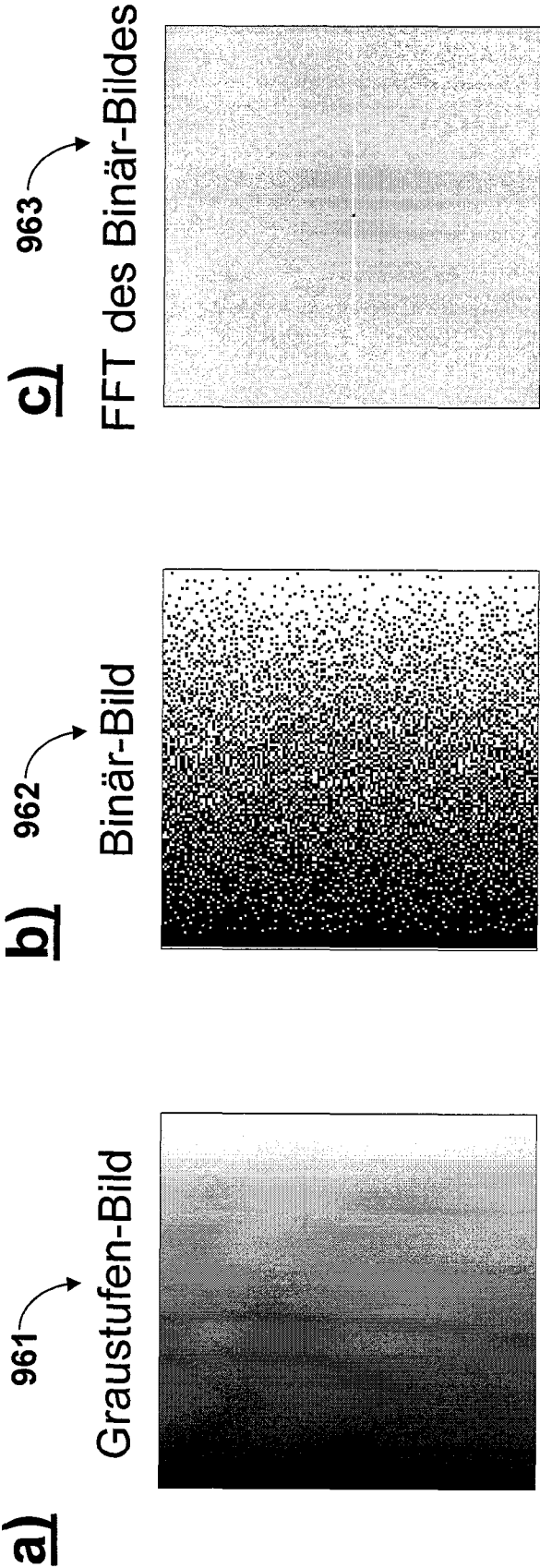


Fig. 12

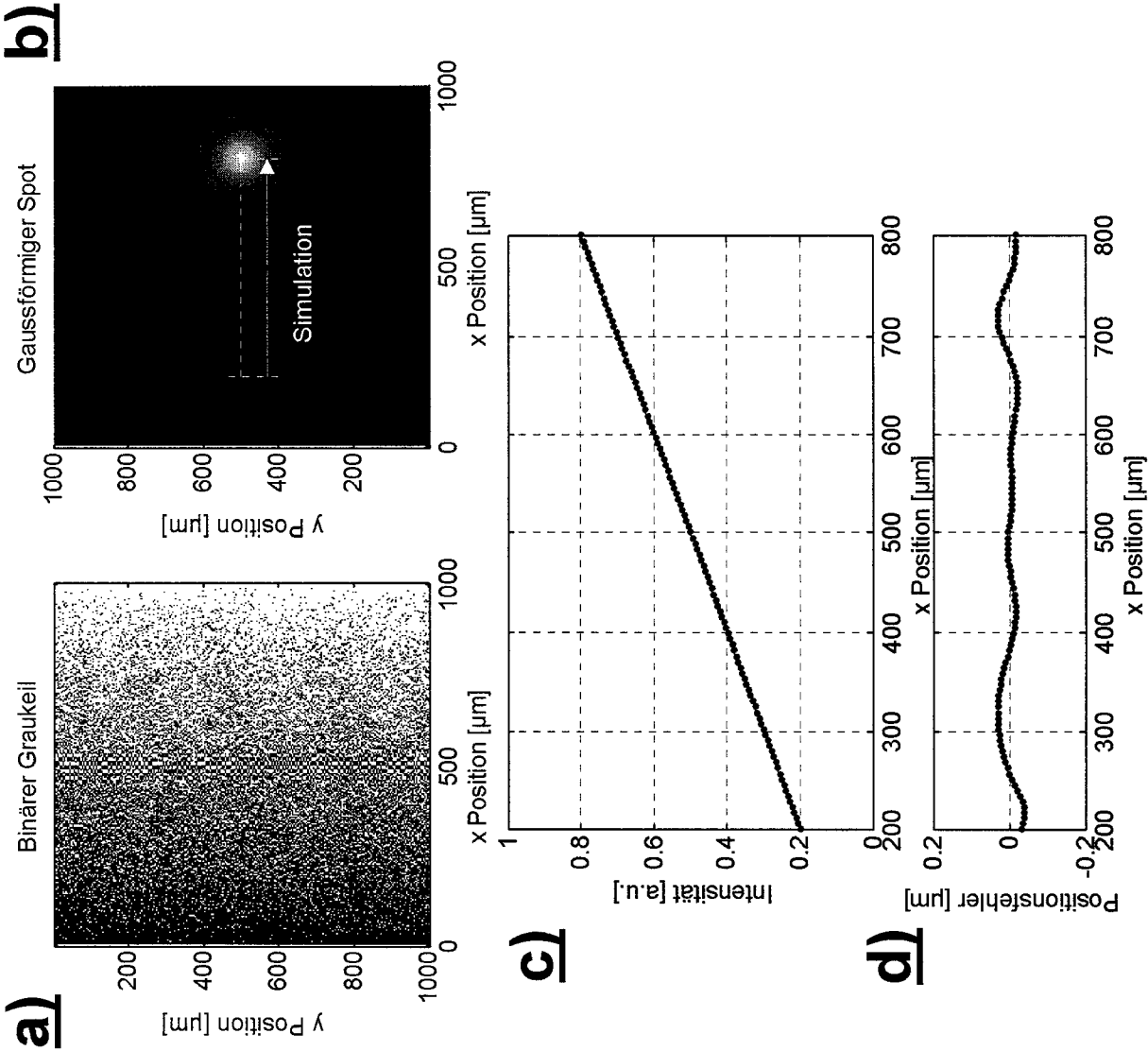


Fig. 13

Stand der Technik

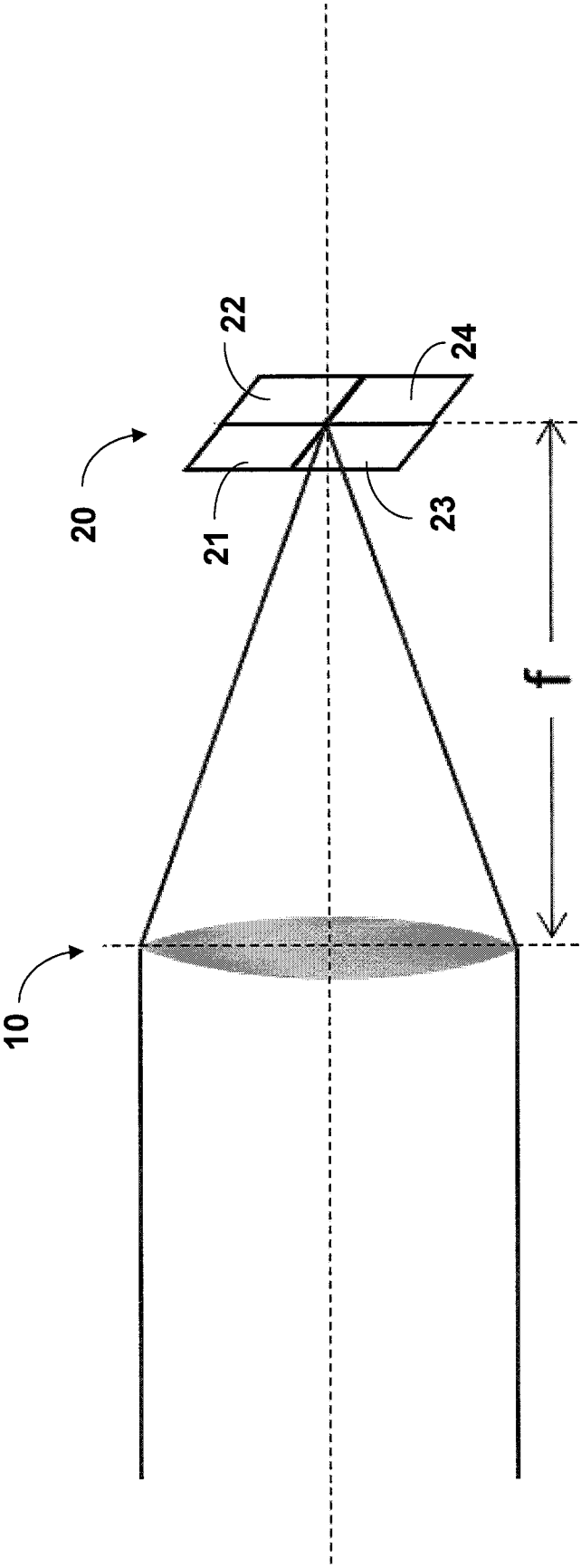
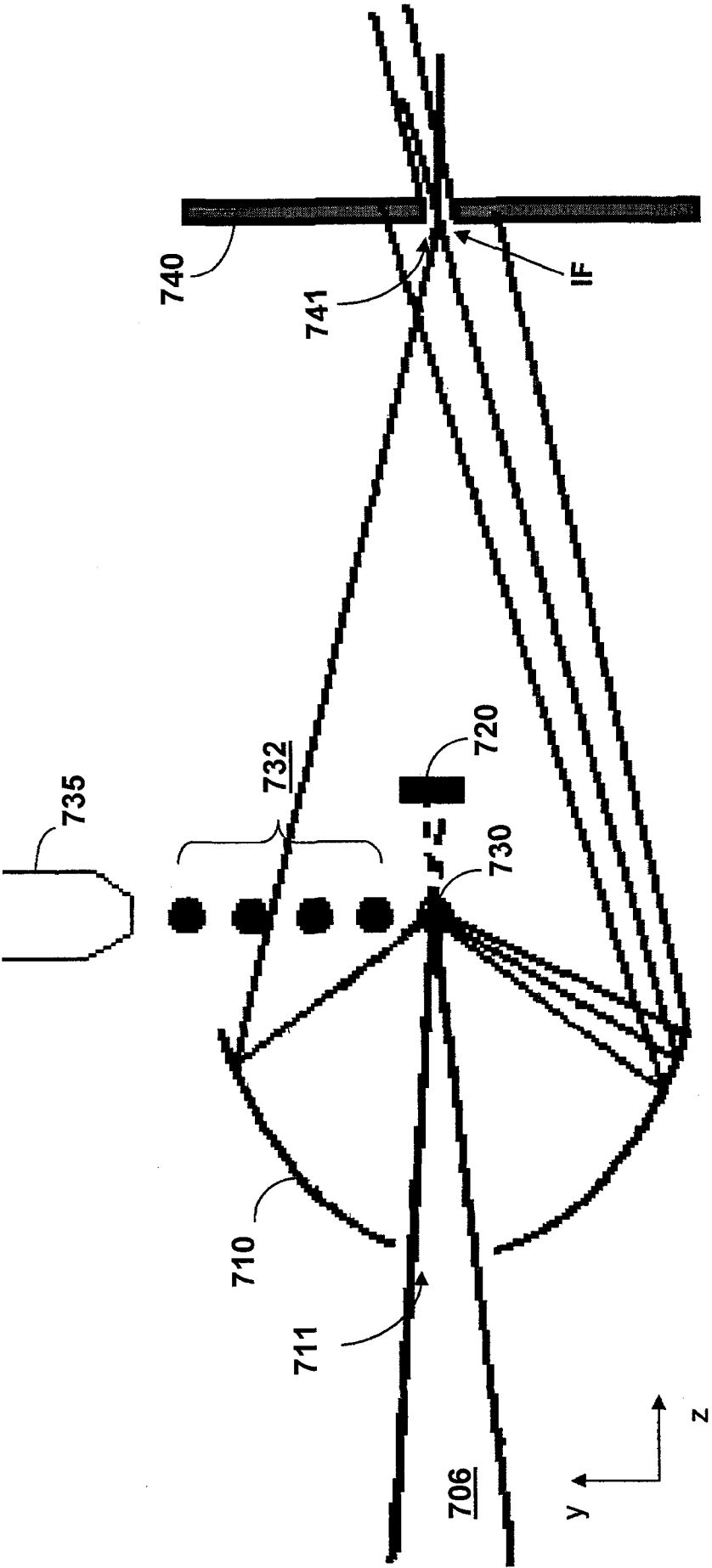


Fig. 14

Stand der Technik



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2015/060145

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

INV. G01J1/42 H01S3/00 G01J1/04 B23K26/30 H05G2/00
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)

G01J H01S B23K H05G

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.
X	US 4 037 959 A (BUMGARDNER JON H) 26 July 1977 (1977-07-26) figure 1	1-17
X	----- US 3 538 335 A (TARTANIAN CHARLES N) 3 November 1970 (1970-11-03) figure 1	1
X	----- US 5 329 350 A (WRIGHT DAVID L [US] ET AL) 12 July 1994 (1994-07-12) cited in the application	1
A	the whole document -----	2-17



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

22 July 2015

Date of mailing of the international search report

29/07/2015

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

Rödig, Christoph

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2015/060145

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 4037959	A	26-07-1977	NONE

US 3538335	A	03-11-1970	BE 738042 A 02-02-1970
		DE 1943501 A1 11-06-1970	
		FR 2024313 A1 28-08-1970	
		GB 1272448 A 26-04-1972	
		JP S4932013 B1 27-08-1974	
		NL 6913082 A 29-05-1970	
		US 3538335 A 03-11-1970	

US 5329350	A	12-07-1994	NONE

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES INV. G01J1/42 H01S3/00 G01J1/04 B23K26/30 H05G2/00 ADD.		
Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC		
B. RECHERCHIERTE GEBIETE Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole) G01J H01S B23K H05G		
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.
X	US 4 037 959 A (BUMGARDNER JON H) 26. Juli 1977 (1977-07-26) Abbildung 1	1-17
X	US 3 538 335 A (TARTANIAN CHARLES N) 3. November 1970 (1970-11-03) Abbildung 1	1
X	US 5 329 350 A (WRIGHT DAVID L [US] ET AL) 12. Juli 1994 (1994-07-12) in der Anmeldung erwähnt	1
A	das ganze Dokument	2-17
<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		Absendedatum des internationalen Recherchenberichts
22. Juli 2015		29/07/2015
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 Rödig, Christoph

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2015/060145

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 4037959	A	26-07-1977	KEINE

US 3538335	A	03-11-1970	BE 738042 A 02-02-1970
		DE 1943501 A1 11-06-1970	
		FR 2024313 A1 28-08-1970	
		GB 1272448 A 26-04-1972	
		JP S4932013 B1 27-08-1974	
		NL 6913082 A 29-05-1970	
		US 3538335 A 03-11-1970	

US 5329350	A	12-07-1994	KEINE
