



(10) **DE 10 2014 208 792 A1** 2015.11.12

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2014 208 792.9**

(22) Anmeldetag: **09.05.2014**

(43) Offenlegungstag: **12.11.2015**

(51) Int Cl.: **G01J 1/42 (2006.01)**

**G02B 23/00 (2006.01)**

**G03F 7/20 (2006.01)**

(71) Anmelder:

**Carl Zeiss SMT GmbH, 73447 Oberkochen, DE**

(72) Erfinder:

**Manger, Matthias, 73432 Aalen, DE; Baumer,  
Florian, 73447 Oberkochen, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

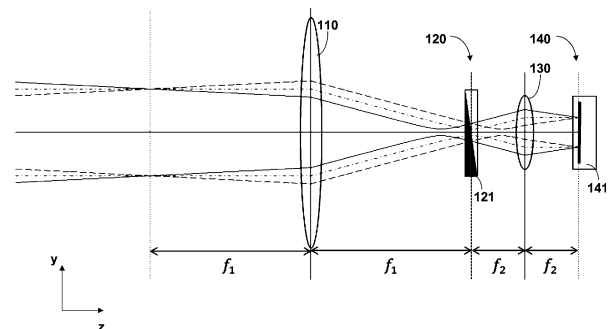
DE	198 22 924	C2
DE	10 2012 204 674	B4
US	8 237 922	B2
US	5 329 350	A

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

(54) Bezeichnung: **System und Verfahren zur Analyse eines von einer Strahlführungsoptik geführten Lichtstrahls**

(57) Zusammenfassung: 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).



**Beschreibung****HINTERGRUND DER ERFINDUNG****Gebiet der Erfindung**

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein System und ein Verfahren zur Analyse eines von einer Strahlführungsoptik geführten Lichtstrahls. Die Erfindung ist insbesondere einsetzbar, 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.

**[0002]** 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 Mess-)Zwecken eingesetzt wird, zu analysieren.

**Stand der Technik**

**[0003]** 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.

**[0004]** Diese EUV-Lichtquelle weist zunächst einen (nicht gezeigten) Hochenergielaser z.B. zur Erzeugung von Infrarotstrahlung **706** (z.B. CO<sub>2</sub>-Laser mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ ) 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.

**[0005]** 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  $\mu\text{s}$ ) in die Laserplasmaquelle „einfliegenden“ Zinntröpfchen individuell hochgenau (z.B. mit einer Genauigkeit unterhalb von 1  $\mu\text{m}$ ) 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 CO<sub>2</sub>-Laser erzeugten Infrarotstrahlung **706**.

**[0006]** 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 „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.

**[0007]** 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 CO<sub>2</sub>-Laser erzeugten Infrarotstrahlung **706** erschwert. Zum Stand der Technik wird beispielhaft auf US 8,237,922 B2 und US 5,329,350 verwiesen.

**[0008]** **Fig. 13** dient zur Erläuterung eines möglichen herkömmlichen Ansatzes zur Lichtstrahlanalyse. Dabei wird der zu analysierende Lichtstrahl mit einer Fokussier-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.

**[0009]** 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 Defokus 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

**[0010]** Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, ein System und ein Verfahren zur 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.

**[0011]** Diese Aufgabe wird gemäß den Merkmalen der unabhängigen Patentansprüche gelöst.

**[0012]** Ein erfindungsgemäßes System weist auf:

- eine Grauverlaufsfilter-Anordnung, welche in einer Fernfeldebene der Strahlführungsoptik angeordnet ist und wenigstens einen Grauverlaufsfilter mit örtlich variierender Transmission aufweist; und
- einer Lichtintensitätssensor-Anordnung mit mindestens 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.

**[0013]** 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-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 auf einem in der Nahfeldebene der Strahlführungsoptik angeordneten Lichtintensitätssensor gesammelt, der anschließend die Intensität als Integral über die Sensorfläche misst.

**[0014]** 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.

**[0015]** 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 Feldebene 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.

**[0016]** Die Formulierungen, wonach die Grauverlaufsfilter-Anordnung in einer Fernfeldebene der Strahlführungsoptik angeordnet ist und die Lichtintensitätssensor-Anordnung in einer Nahfeldebene der Strahlführungs-

optik 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.

**[0017]** 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 Nahfeldebene der Strahlführungsoptik sich bezogen auf den optischen Strahlengang nach der zweiten Fourier-Optik befindet.

**[0018]** Gemäß einer Ausführungsform besitzt wenigstens ein Grauverlaufsfilter einen in einer vorbestimmten Raumrichtung linearen Transmissionsverlauf.

**[0019]** 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.

**[0020]** 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.

**[0021]** 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.

**[0022]** Gemäß einer Ausführungsform besitzt wenigstens ein Grauverlaufsfilter einen Transmissionsverlauf mit rotationsparaboloidförmiger oder sattelförmiger Geometrie.

**[0023]** 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.

**[0024]** 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.

**[0025]** 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.

**[0026]** 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.

**[0027]** 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.

**[0028]** 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 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.

**[0029]** Gemäß einer Ausführungsform ist der zu analysierende Lichtstrahl ein Laserstrahl, insbesondere ein Laserstrahl mit einer Wellenlänge im Infrarotbereich.

**[0030]** Die Erfindung betrifft weiter auch ein Verfahren zur Analyse eines von einer Strahlführungsoptik geführten Lichtstrahls,

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

**[0031]** Gemäß einem weiteren Aspekt betrifft die Erfindung auch die Verwendung eines Grauverlaufsfilters zur Lichtstrahlanalyse, wobei der Grauverlaufsfilter aus Binärstrukturen gebildet ist, und wobei die Strukturgrößen dieser Binärstrukturen kleiner sind als die Wellenlänge eines zu analysierenden Lichtstrahls.

**[0032]** Weitere Ausgestaltungen der Erfindung sind der Beschreibung sowie den Unteransprüchen zu entnehmen.

**[0033]** Die Erfindung wird nachstehend anhand von in den beigefügten Abbildungen dargestellten Ausführungsbeispielen näher erläutert.

#### KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

**[0034]** Es zeigen:

**[0035]** Fig. 1 eine schematische Darstellung zur Erläuterung des der vorliegenden Erfindung zugrundeliegenden Prinzips;

**[0036]** Fig. 2–Fig. 3 schematische Darstellungen eines in einer Laserplasmaquelle sowohl zur Bestimmung der Target-Tröpfchen-Position als auch zur Analyse der entsprechend nachzuführenden Laserstrahlen möglichen prinzipiellen Aufbaus;

**[0037]** Fig. 4 schematische Darstellungen zur Erläuterung unterschiedlicher im Rahmen der vorliegenden Erfindung einsetzbarer Grauverlaufsfilter;

**[0038]** Fig. 5 eine schematische Darstellung zur Erläuterung eines möglichen Aufbaus eines erfindungsgemäßen Systems mit einer Grauverlaufsfilter-Anordnung in einer konkreten Ausführungsform;

**[0039]** Fig. 6–Fig. 10 schematische Darstellungen zur Erläuterung weiterer Ausführungsformen von im Rahmen der vorliegenden Erfindung einsetzbaren Grauverlaufsfiltern;

**[0040]** Fig. 11–Fig. 12 schematische Darstellungen zur Erläuterung konkreter Ausführungsformen eines im Rahmen der vorliegenden Erfindung einsetzbaren Grauverlaufsfilters mit Sublambda-Binärstrukturen;

**[0041]** Fig. 13 eine schematische Darstellung zur Erläuterung eines herkömmlichen Ansatzes zur Strahlanalyse; und

**[0042]** Fig. 14 eine schematische Darstellung des prinzipiellen Aufbaus einer EUV-Lichtquelle gemäß dem Stand der Technik.

#### DETAILLIERTE BESCHREIBUNG BEVORZUGTER AUSFÜHRUNGSFORMEN

**[0043]** Fig. 1 zeigt eine schematische Darstellung zur Erläuterung des der vorliegenden Erfindung zugrundeliegenden Prinzips und des grundsätzlichen Aufbaus eines erfindungsgemäßen Systems zur Strahlanalyse.

**[0044]** 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.

**[0045]** 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.

**[0046]** 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.

**[0047]** 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.

**[0048]** 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 das 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 hinreichend verdünnt vorliegt. Infolgedessen werden sämtliche Hauptstörquellen entweder – wie im Falle der Strahlrichtung und der Divergenz – eliminiert oder – wie im Falle der Strahldzentrierung 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.

**[0049]** 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.

**[0050]** 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 x-Richtung linearen Transmissionsverlauf und ein dritter der Grauverlaufsfilter **522** zwecks Intensitätsnormierung einen konstanten Transmissionsverlauf aufweist.

**[0051]** 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.

**[0052]** 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.

**[0053]** 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.

**[0054]** 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.

**[0055]** Der Transmissionsverlauf eines Grauverlaufsfilters mit linearem Transmissionsverlauf wird dabei durch

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

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

**[0056]** 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

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

**[0057]** Die Parameter  $W_x$  und  $W_y$  sowie  $x_0$  und  $y_0$  charakterisieren die beiden Grauverlaufsfilter **521**, **523** mit linearem Transmissionsverlauf. Die Parameter  $\eta_1$  bis  $\eta_3$  stehen für die Nachweisempfindlichkeiten der Kanäle, die aus unterschiedlichen Gründen (z.B. Bauteilschwankungen etc.) variieren kann.

**[0058]** Durch Normierung auf ein Referenzsignal, welches hier durch einen uniformen Grauverlaufsfilter **522** mit konstantem Transmissionsverlauf (z.B. mit der Transmission  $\frac{1}{2}$ ) erhalten wird, werden Energieschwankungen (Laserpulsschwankungen) eliminiert. Die beiden normierten Signale enthalten dann die Schwerpunktförderung für den zu analysierenden Lichtstrahl und lauten:

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

**[0059]** 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.

**[0060]** Durch Umstellung der Gleichung in Kenntnis der vier Kalibrierparameter ergeben sich schließlich die Schwerpunktpositionen aus den Messsignalen zu

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

**[0061]** 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.

**[0062]** 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** auf-



weisen 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.

**[0063]** Ein schematischer Strahlengang zur Analyse des Laserstrahls in „Rückwärtsrichtung“ ist in **Fig. 3** dargestellt, wobei jeweils Feldebene mit „F“ und Pupillenebenen 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.

**[0064]** 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.

**[0065]** 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

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

**[0066]** Die objekt- und bildseitigen Brennweiten  $f'$  und  $f$  sowie der Teleskopabbildungsmaßstab  $\text{mag}$  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  $\underline{\text{ray}}' = (x', u')$  und Bildraum  $\underline{\text{ray}} = (x, u)$  gemäß

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

wobei

$$\text{Mag} = \frac{f}{f_{\text{mag}}}$$

für den Abbildungsmaßstab der Fernfeldabbildung steht.

**[0067]** Eine scharfe Abbildung liegt vor, wenn alle von einem Objektpunkt ausgehenden Strahlen unabhängig vom Strahlwinkel in einem Bildpunkt zusammengeführt werden. Entsprechend lautet die Fokusbedingung

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

**[0068]** Daraus folgt unmittelbar die Abbildungsbedingung  $z = \text{Mag}^2 z'$ .

**[0069]** 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  $\theta'$  den Öffnungsbzw. Divergenzwinkel bezeichnen. Die Propagation des Strahlenbündels durch die Abbildungsoptik mit dem Bildsensor an der Position  $z = 0$  (in der Brennebene der bildseitigen Fourier-Optik) lautet gemäß dem (um die Richtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung erweiterten) Transfermatrixformalismus

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

**[0070]** Daraus ergeben sich die geometrisch-optischen Abbildungsgleichungen schließlich zu

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

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

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

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

**[0071]** Der Querbalken über dem Symbol zeigt dabei den Schwerstrahl an.

**[0072]** 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

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

mit

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

als Grundlage einer Strahlgrößendefinition entsprechend

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

oder

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

**[0073]** Hierin bezeichnet  $I(x, y; z)$  die Lichtintensität für die gewählte Schnittebene.

**[0074]** 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:

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

**[0075]** 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 Ausbreitungsordinate  $z$  in guter Näherung

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

gilt, wobei  $w_0$  die Taillengröße,  $\theta$  die Divergenz und  $z_0$  die Tailenlage (Fokuslage) bezeichnen.

**[0076]** 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

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

wobei  $L_c = \frac{\lambda}{NA}$  die charakteristische Länge,  $P$  die gesamte durch  $NA$  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

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

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  $R_{NA}$ .

**[0077]** Im Weiteren werden unterschiedliche mögliche Ausführungsformen bzw. Transmissionsverläufe von gemäß der Erfindung einsetzbaren Grauverlaufsfiltern unter Bezugnahme auf **Fig. 6ff** detaillierter beschrieben.

**[0078]** **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 Grauverlaufsfiltern (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-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 Grauverlaufsfiltern ausgehend von einer linearen Anordnung zu einer 2D-Matrixanordnung.

**[0079]** Durch Verwendung von paarweise entgegengesetzten Grauverlaufsfiltern (bzw. „Keilverlaufsfiltern“) kann ebenfalls eine Energienormierung abgeleitet werden. 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.

**[0080]** Für das Ausführungsbeispiel von **Fig. 8a** ergeben sich die Sensorsignale zu:

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

**[0081]** Zur einfacheren Erläuterung des Prinzips wird für alle Grauverlaufsfilter ein einheitlicher Gain-Wert  $G$  sowie eine einheitliche („Keil-“)Breite  $W$  des linearen Transmissionsverlaufs vorausgesetzt. Die „Keilverschiebungen“  $x_1$  und  $y_3$  sind ebenfalls paarweise gleich gewählt.  $I$  steht für die über das Lichtgebilde integrierte Gesamtintensität

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

**[0082]** Durch Addition und Differenzbildung ergibt sich

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

**[0083]** 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.

**[0084]** 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

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

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.

**[0085]** 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:

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

**[0086]** 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  $\eta_1$  bis  $\eta_5$  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:

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

**[0087]** 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

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

**[0088]** Zusammenfassend bieten Grauverlaufsfilter zweiter Ordnung auch den messtechnischen Zugang auf die Strahlgrößenparameter  $w_x^2$  und  $w_y^2$

**[0089]** 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.

**[0090]** 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.

**[0091]** Für diese Auslegung ergeben sich die auf die Referenz normierten Signale zu:

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

**[0092]** 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.

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

**[0093]** Das vorstehend beschriebene Schema kann zur Messung von Momenten höherer Ordnung beliebig fortgesetzt werden. Die auf den Schwerpunkt bezogenen Momente

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

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

**[0094]** 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** gemäß **Fig. 9a** einen ersten Grauverlaufsfilter **921** mit linearem Transmissionsverlauf in  $x$ -Richtung, einen zweiten Grauverlaufsfilter **922** mit linearem Transmissionsverlauf in  $y$ -Richtung, einen dritten Grauverlaufsfilter **923** mit konstantem Transmissionsverlauf als Referenz sowie einen vierten Grauverlaufsfilter **924** mit rotationsparaboloidförmigem Transmissionsverlauf auf, womit die Strahlparameter  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  und  $w^2 = w_x^2 + w_y^2$  nach Fokussierung messtechnisch zugänglich werden.

**[0095]** 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 Beugungsordnung werden nicht transmittiert.

**[0096]** 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.

**[0097]** Eine exemplarische Auslegung eines Grauverlaufsfilters **950** ist in **Fig. 10** veranschaulicht. Die die Auslegung bestimmenden Parameter sind:

- Durchmesser  $d_{\max}$  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 Durchmesserkreise sich gerade gegenseitig berühren, niemals während des Betriebes störend überlagern oder gar interferieren.
- Radius  $\theta_{\max}$  des Bereiches im Winkelraum, der die auftretenden (und zu messenden) Strahlrichtungsvariationen beschränkt.
- Radius des Nutzbereichs im Fernfeld (=Verlaufsfilterebene)  $r_{\max}$ . Entsprechend der in **Abb. 21** dargestellten Geometrie gilt  $r_{\max} = \theta_{\max} f_{\text{FF}} + d_{\max}$ . Darin steht  $f_{\text{FF}}$  für die Brennweite der Fokussierlinse.
- Breite des Keilverlaufs  $W$ , in dem die Transmission von 1 auf 0 abfällt ist damit durch  $W = \kappa_1 r_{\max}$  gegeben. Die Wahl des Überlaufparameters  $\kappa_1 (>1.5)$  hängt von den für die Justage oder die Systemeinrichtung benötigten Reserven ab.
- Betrag des Beugungswinkels  $\Delta_0$  der ersten Ordnungen des replizierenden 2D-Schachbrettgitters wird durch den Abstand der Verlaufsfilterzentren von der optischen Achse bestimmt, entsprechend  $f_{\text{FF}} \Delta_0 = \kappa_2 \sqrt{2} W$ ,  $\kappa_2 > 0.5$ . Der Faktor  $\sqrt{2}$  trägt der diagonalen Kanalanordnung Rechnung. Vorteilhafterweise wird die Auswirkung einer parasitären nullten Ordnung durch einen Dunkelbereich von der Größe eines Graufilters geblockt, was  $\kappa_2 \approx 1$  entspricht.

**[0098]** **Fig. 11a–c** und **Fig. 12a–d** zeigen schematische Darstellungen zur Erläuterung konkreter Ausführungsformen eines im Rahmen der vorliegenden Erfindung einsetzbaren 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 zur Folge haben.

**[0099]** 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 Strecken erforderlich (z.B. typische Transmissionsgradienten im Bereich von  $0.2 \text{ mm}^{-1}$  bis  $5 \text{ mm}^{-1}$ ). Bei typischen angestrebten „Genauigkeit vs. Messbereich“-Verhältnissen von 1:1000 (z.B.: Messbereich bei der Strahlwinkelbestimmung:  $\pm 1 \text{ mrad}$  bei Genauigkeit  $\pm 1 \text{ } \mu\text{rad}$ ) kann ferner z.B. gefordert sein, dass die Abweichung der lokalen Transmission nicht größer ist als  $1/1000$  des gesamten Transmissionsbereichs.

**[0100]** 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  $1 \text{ mm} \cdot 1 \text{ mm}$  aufweisen und mit einer Struktur aus  $1000 \times 1000$  Pixeln bedruckt sein, so dass sich etwa  $1 \text{ } \mu\text{m}$  große Strukturelemente ergeben, deren Größe somit deutlich unterhalb der beispielhaften Wellenlänge von etwa  $10.6 \text{ } \mu\text{m}$  eines zu analysierenden Lichtstrahls im langwelligen Infrarotbereich liegt.

**[0101]** 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.

**[0102]** 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.

**[0103]** Die lokale Mittelung, die nötig ist, um für die den Binär-Strukturen eine effektive lokale Transmission  $T_{\text{eff}}$  zu erhalten, wird somit durch Integration über die endliche Strahlgröße realisiert:

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

**[0104]** 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.

**[0105]** 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 in **Fig. 12d** gezeigter, aus den sehr geringen Abweichungen von der Linearität resultierender Positionsfehler liegt deutlich unterhalb von 1 µm über eine Strecke von etwa 600 µm, so dass ein sehr gutes Verhältnis von Messfehler zu Messbereich erhalten wird.

**[0106]** 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 vorliegenden Erfindung mit umfasst sind, und die Reichweite der Erfindung nur im Sinne der beigefügten Patentansprüche und deren Äquivalente beschränkt ist.

**ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG**

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

**Zitierte Patentliteratur**

- US 8237922 B2 [0007]
- US 5329350 [0007]

**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.
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 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.
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.
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.
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.
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.

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. 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 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, 541, 542, 543**), gelenkt wird;  
– wobei aus der gemessenen Lichtintensität wenigstens ein Strahlparameter zur Charakterisierung des zu analysierenden Lichtstrahls abgeleitet wird.

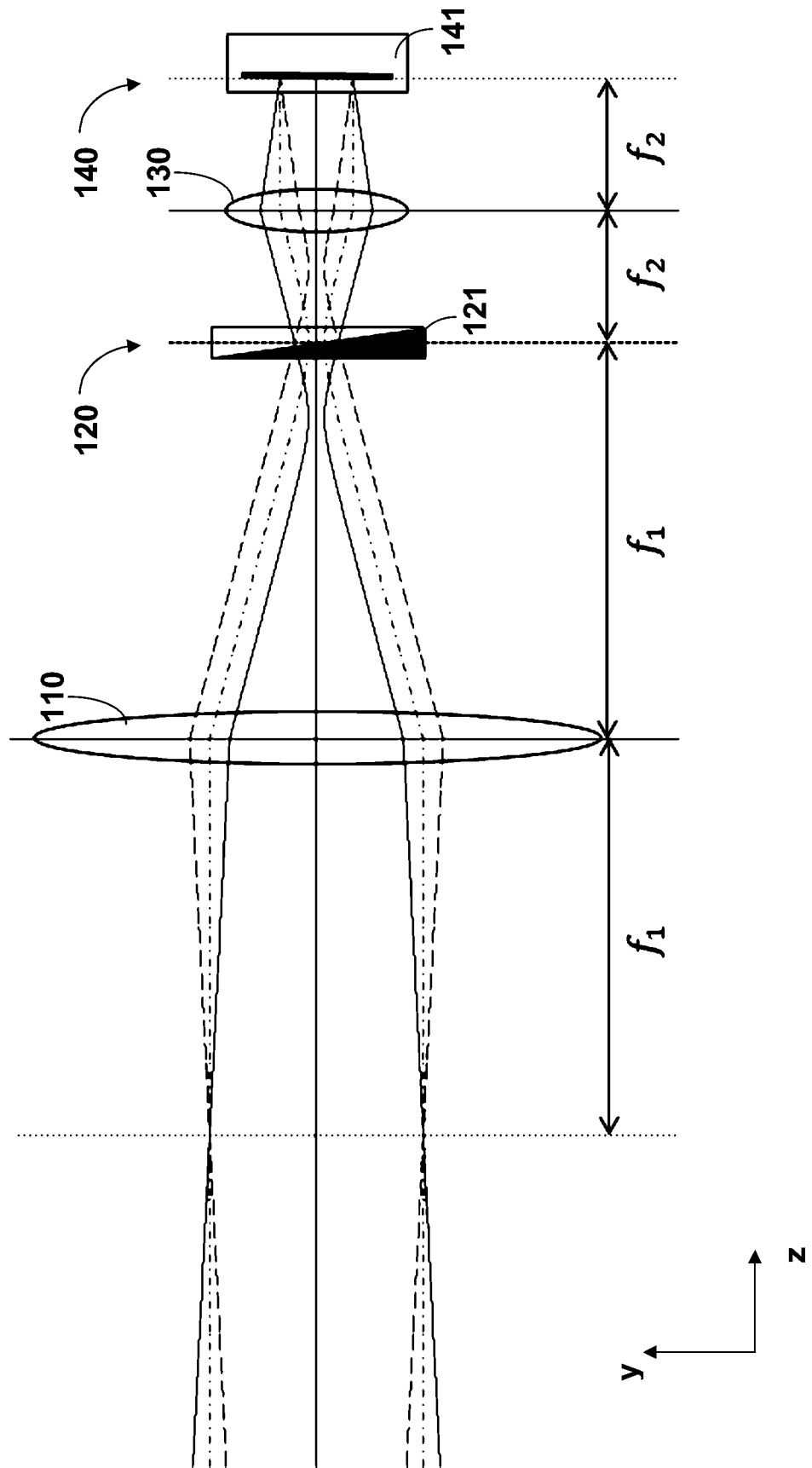
16. Verwendung eines Grauverlaufsfilters zur Lichtstrahlanalyse, wobei der Grauverlaufsfilter aus Binärstrukturen gebildet ist, und wobei die Strukturgrößen dieser Binärstrukturen kleiner sind als die Wellenlänge eines zu analysierenden Lichtstrahls.

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

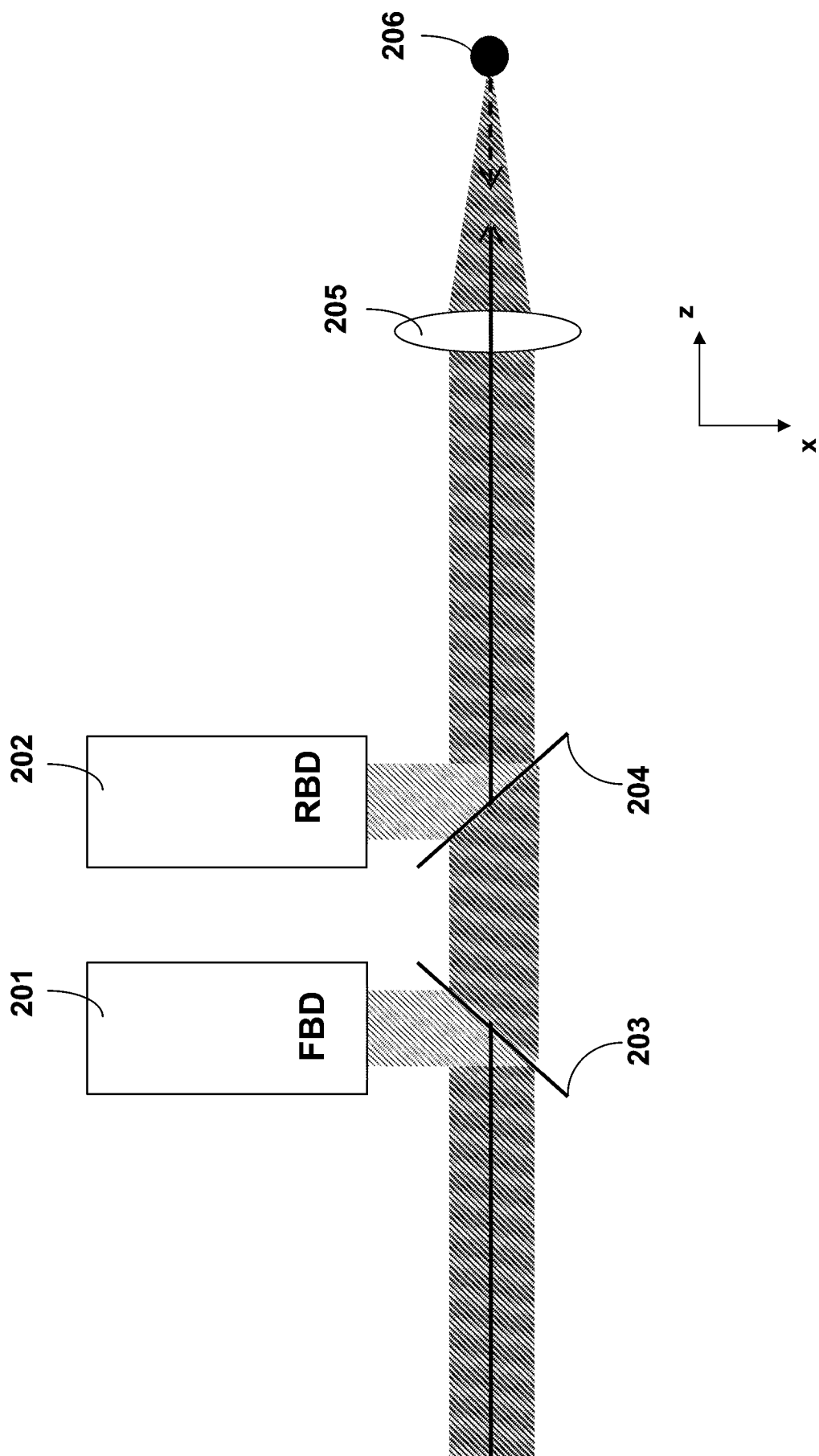
Es folgen 14 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

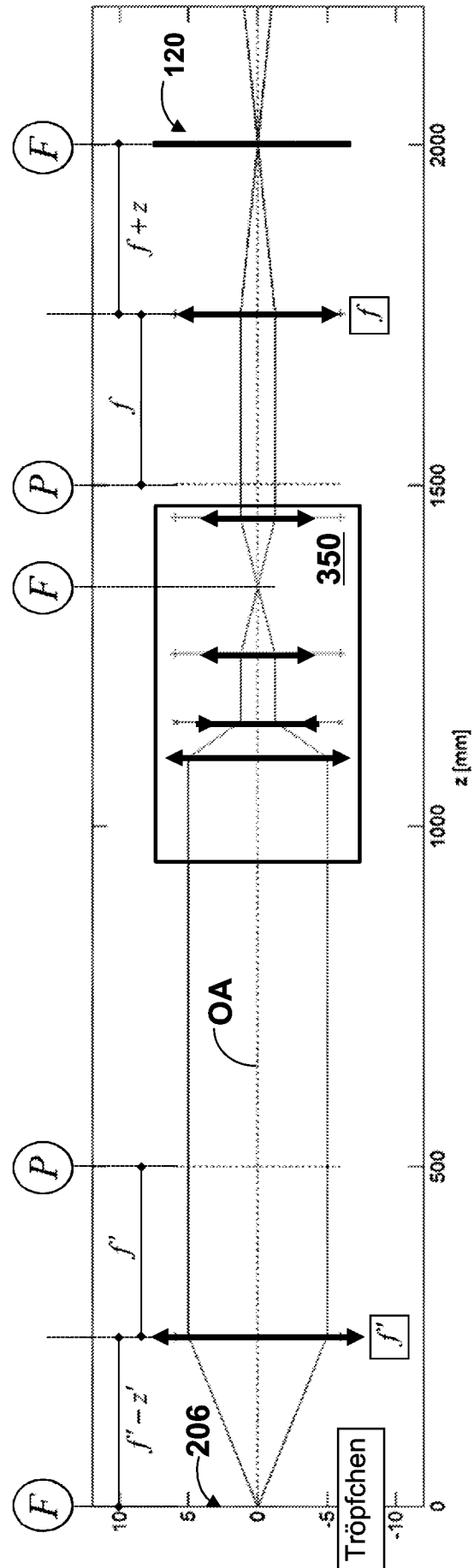
**Fig. 1**



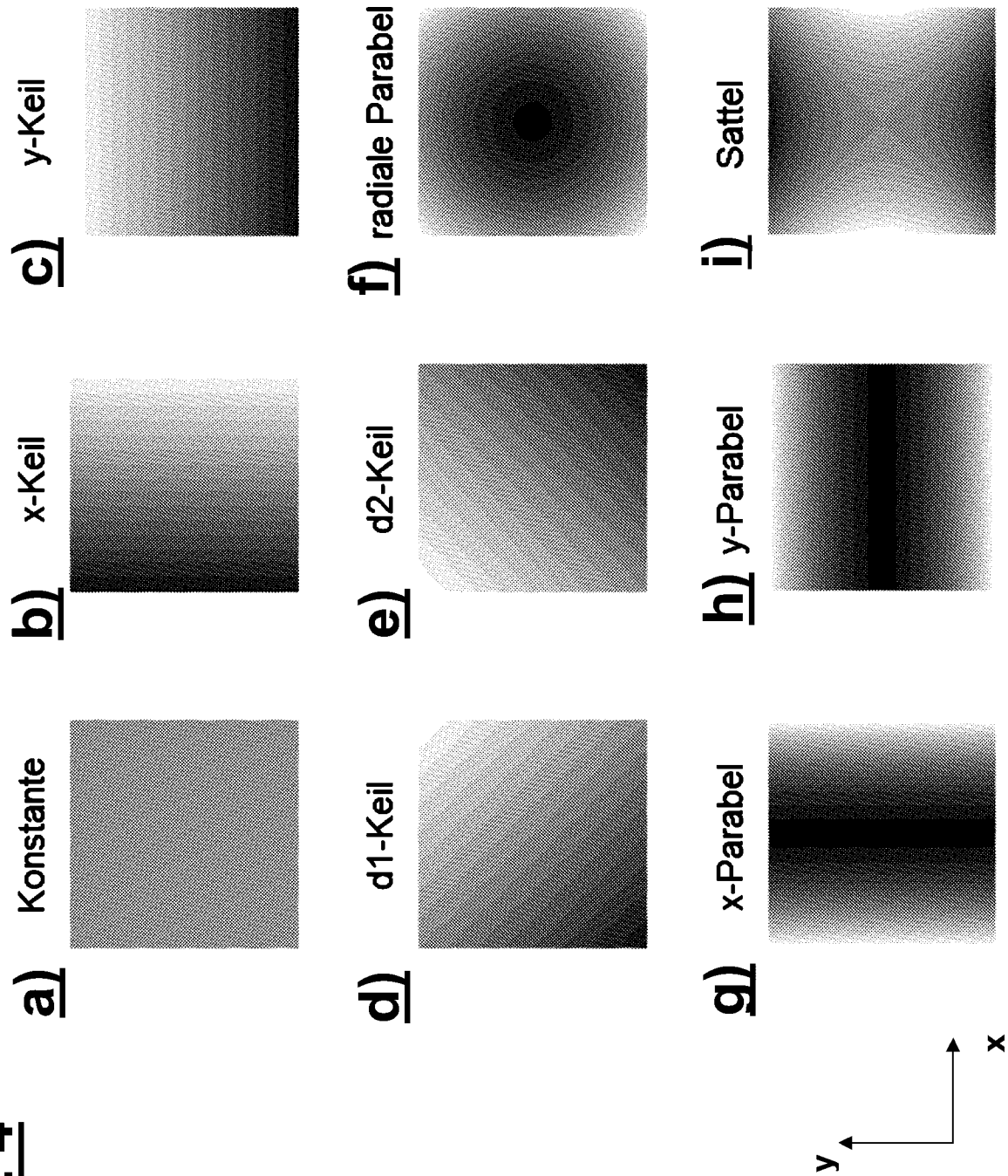
**Fig. 2**



**Fig. 3**

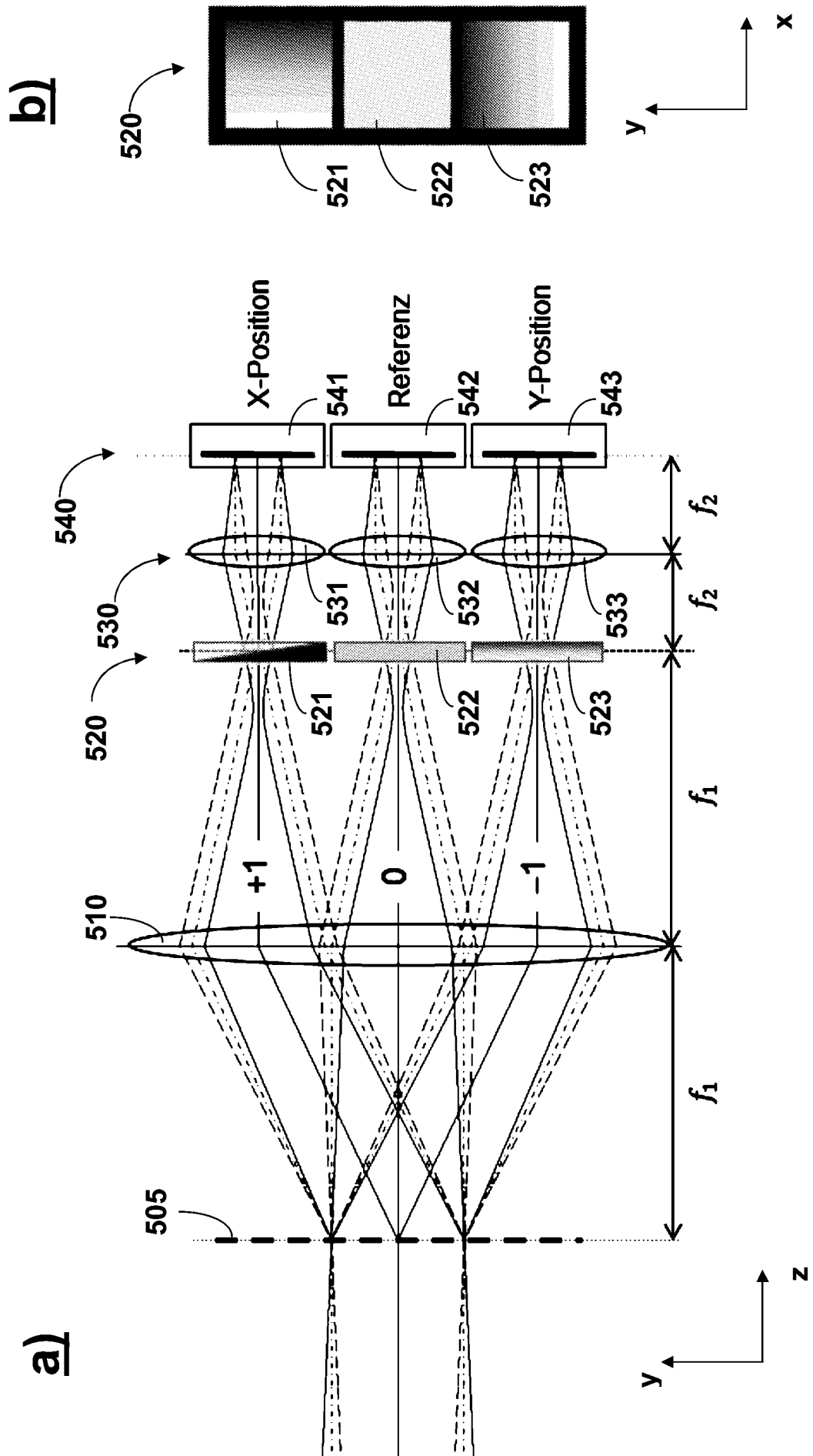


**Fig. 4**

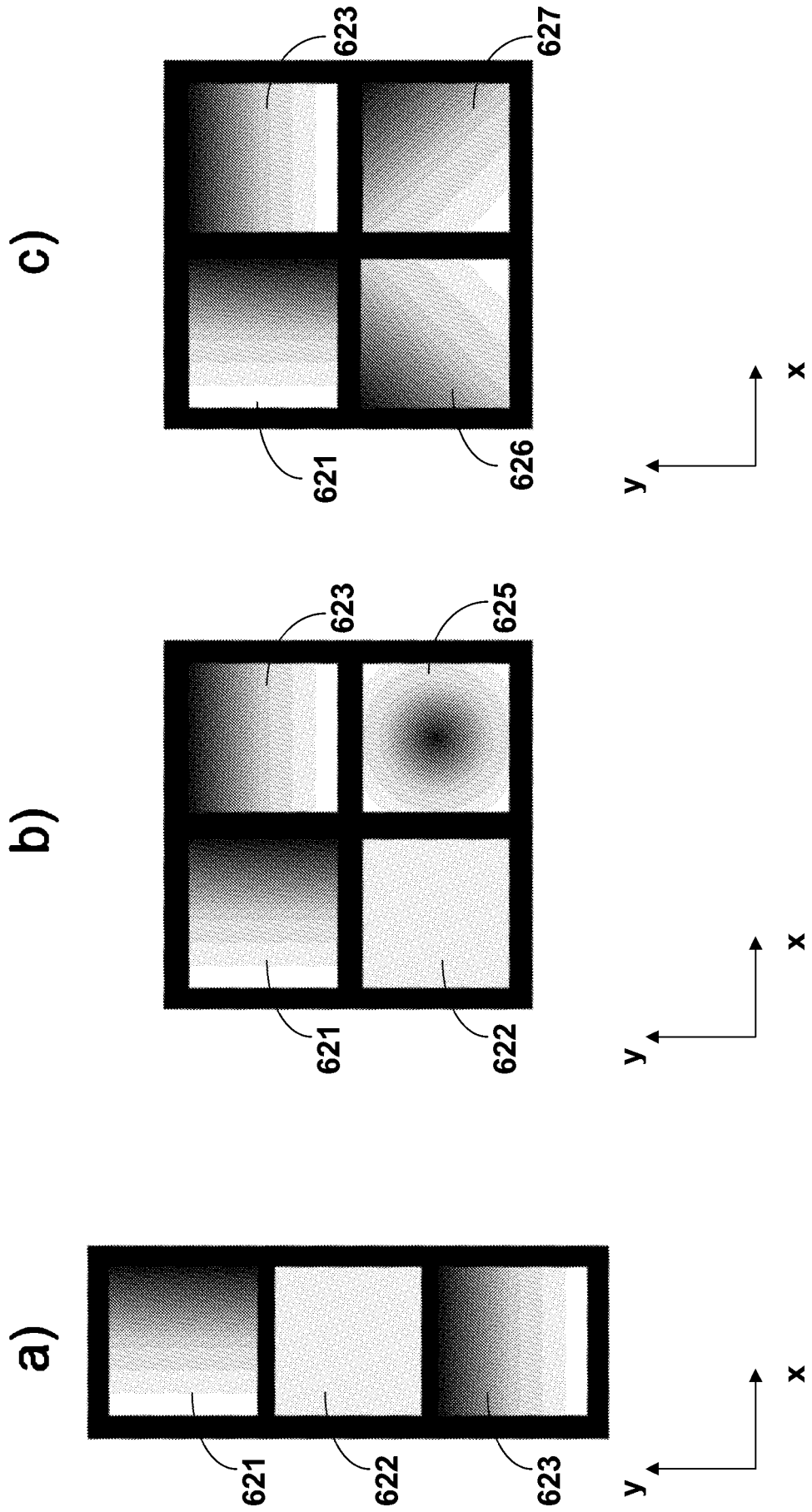




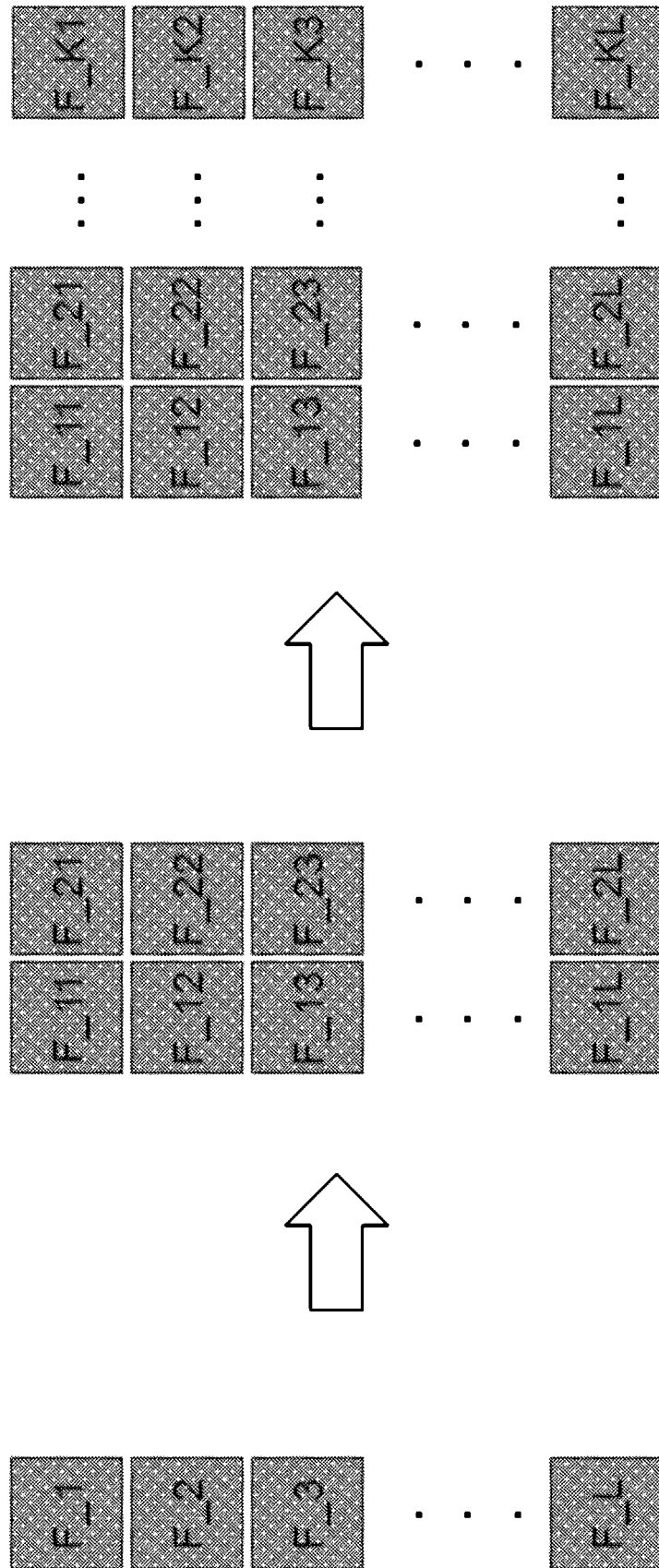
**Fig. 5**



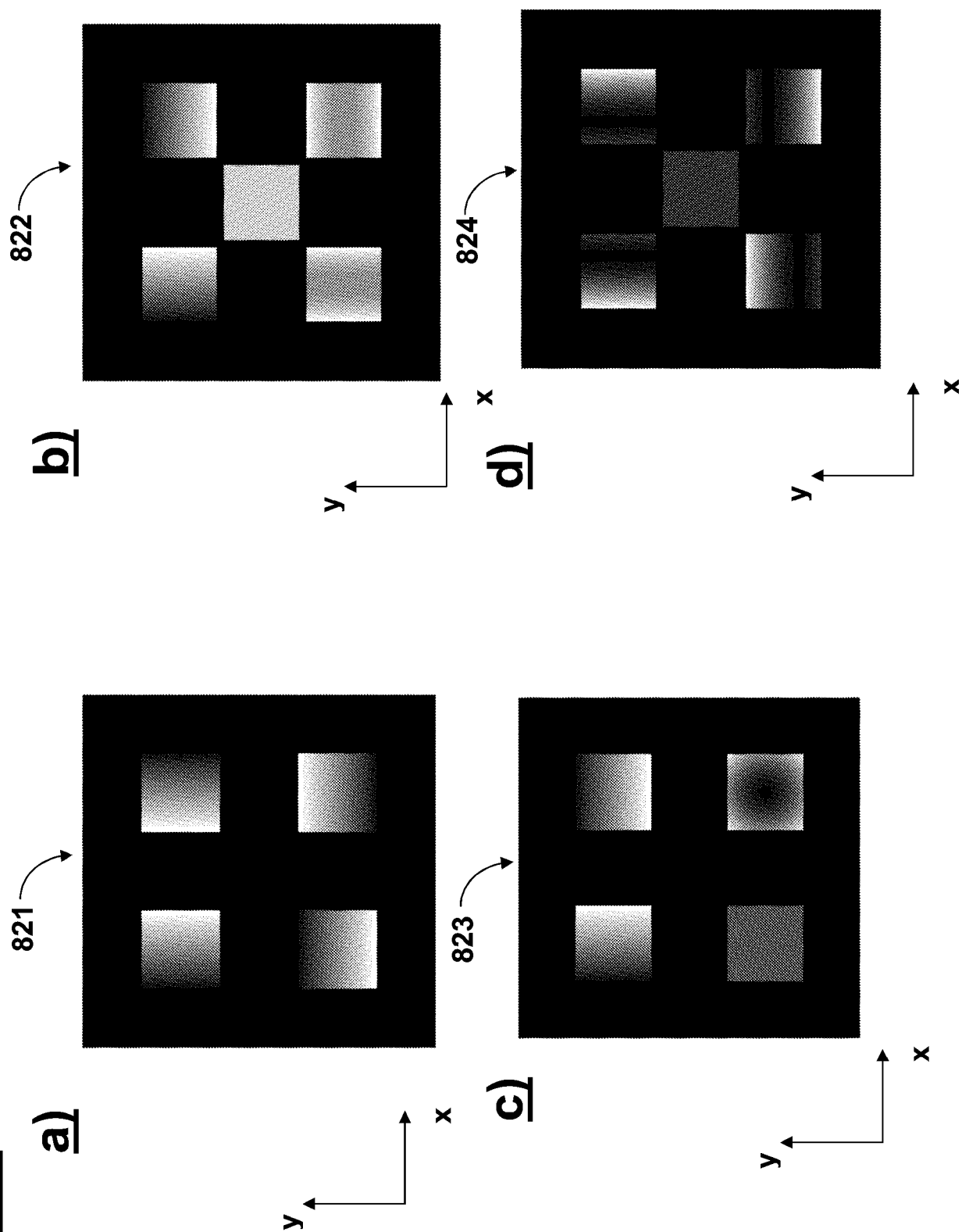
**Fig. 6**



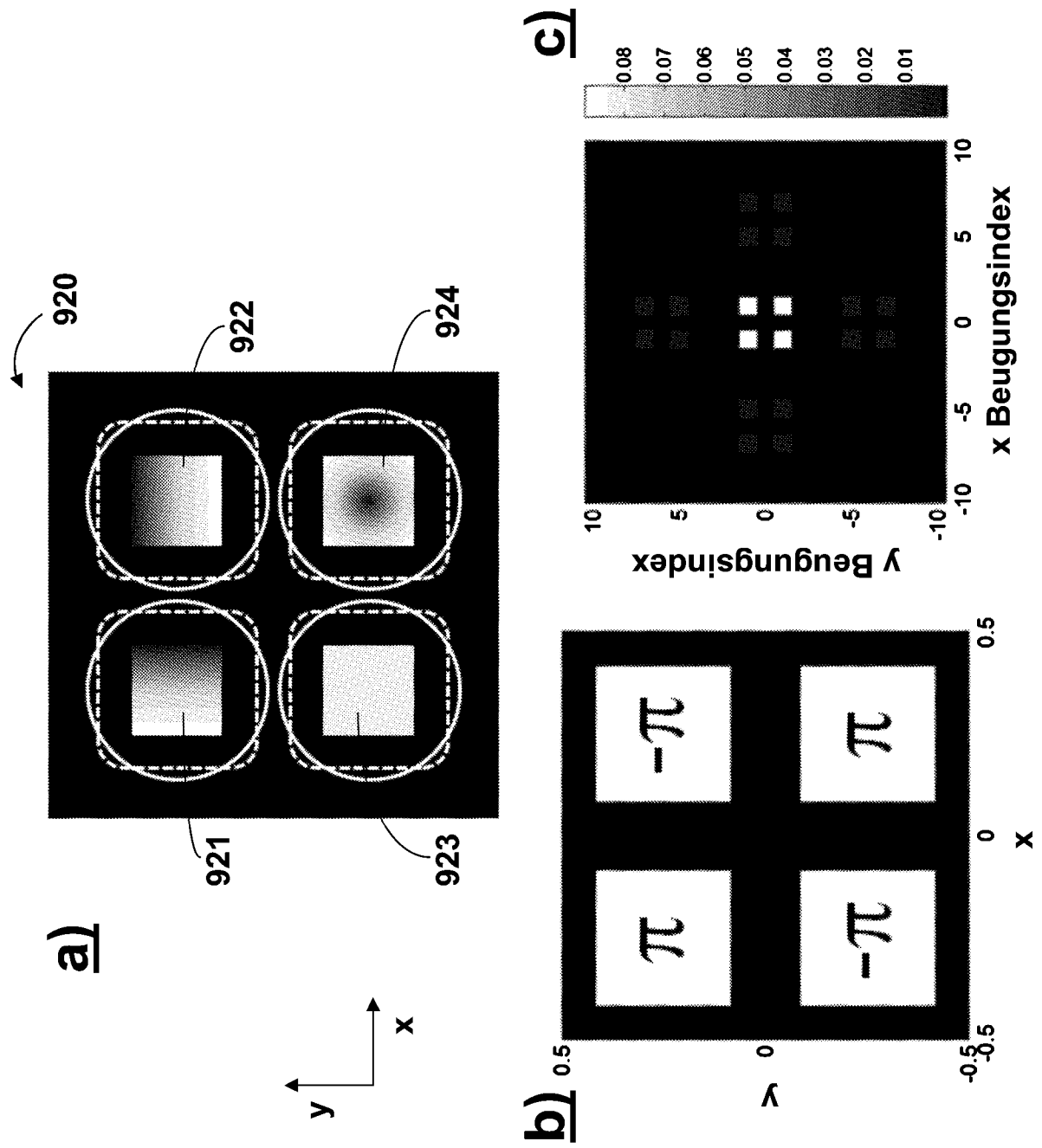
**Fig. 7**



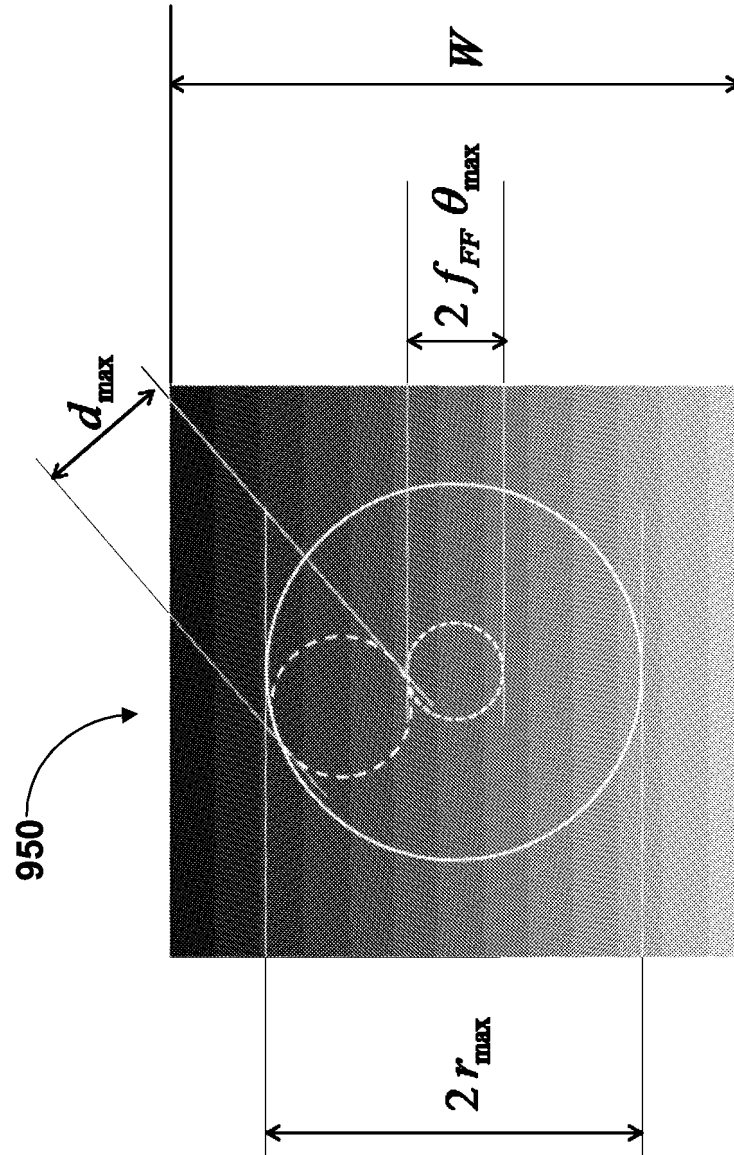
**Fig. 8**



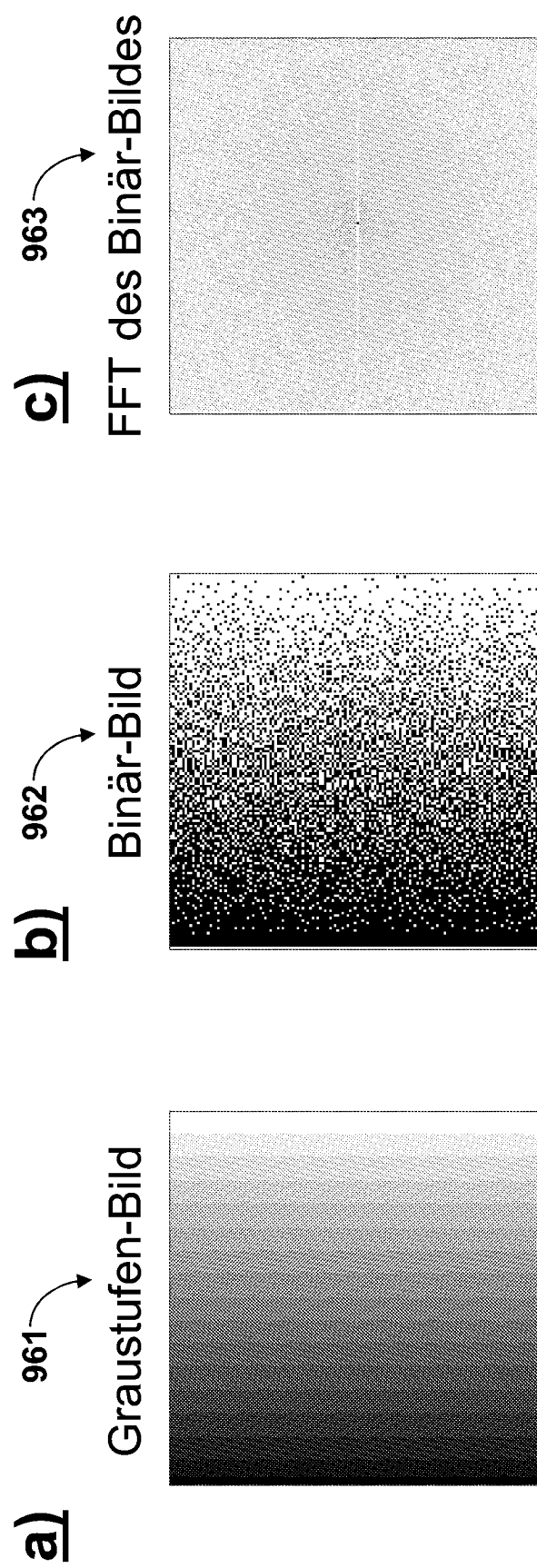
**Fig. 9**



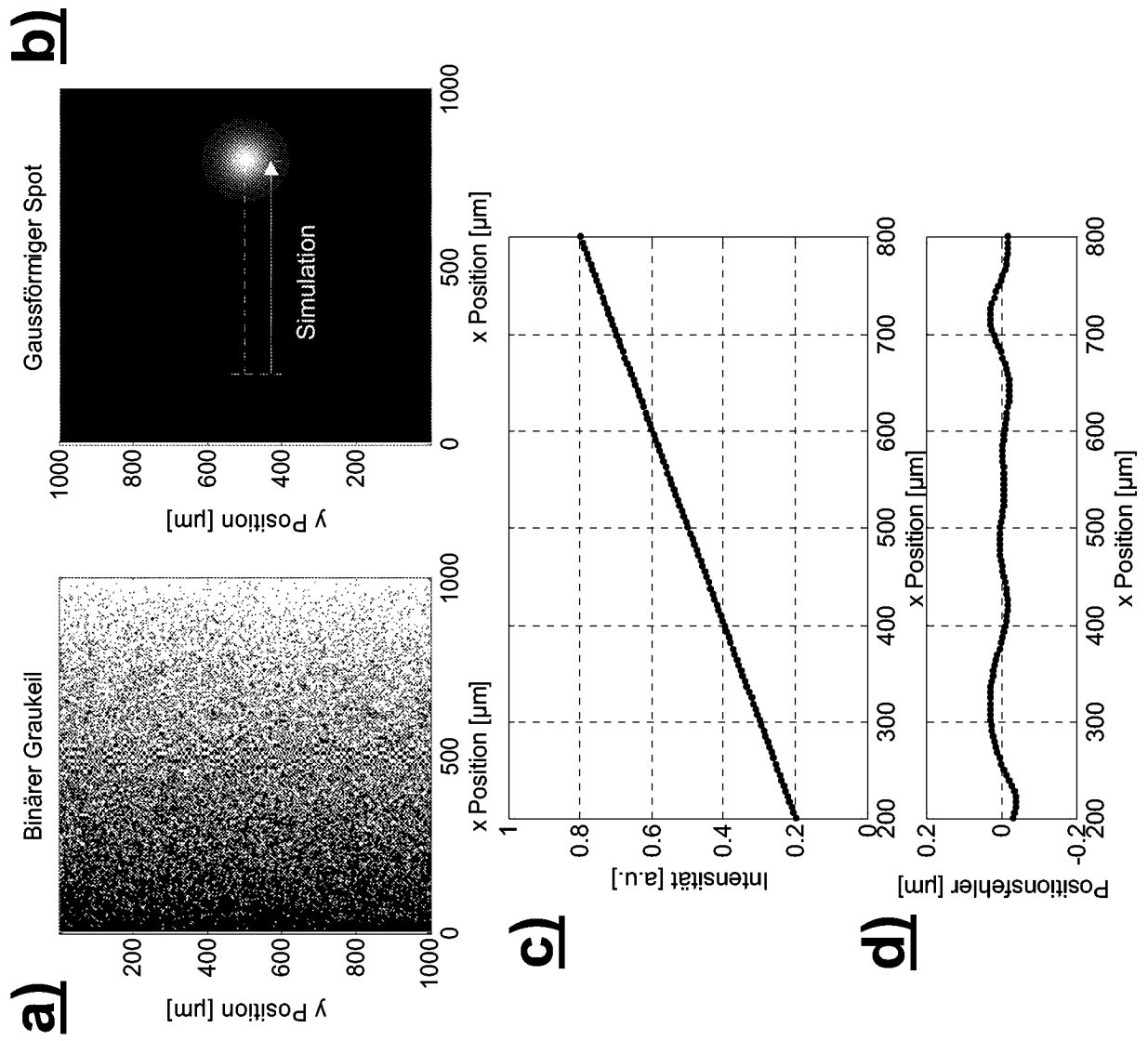
**Fig. 10**



**Fig. 11**



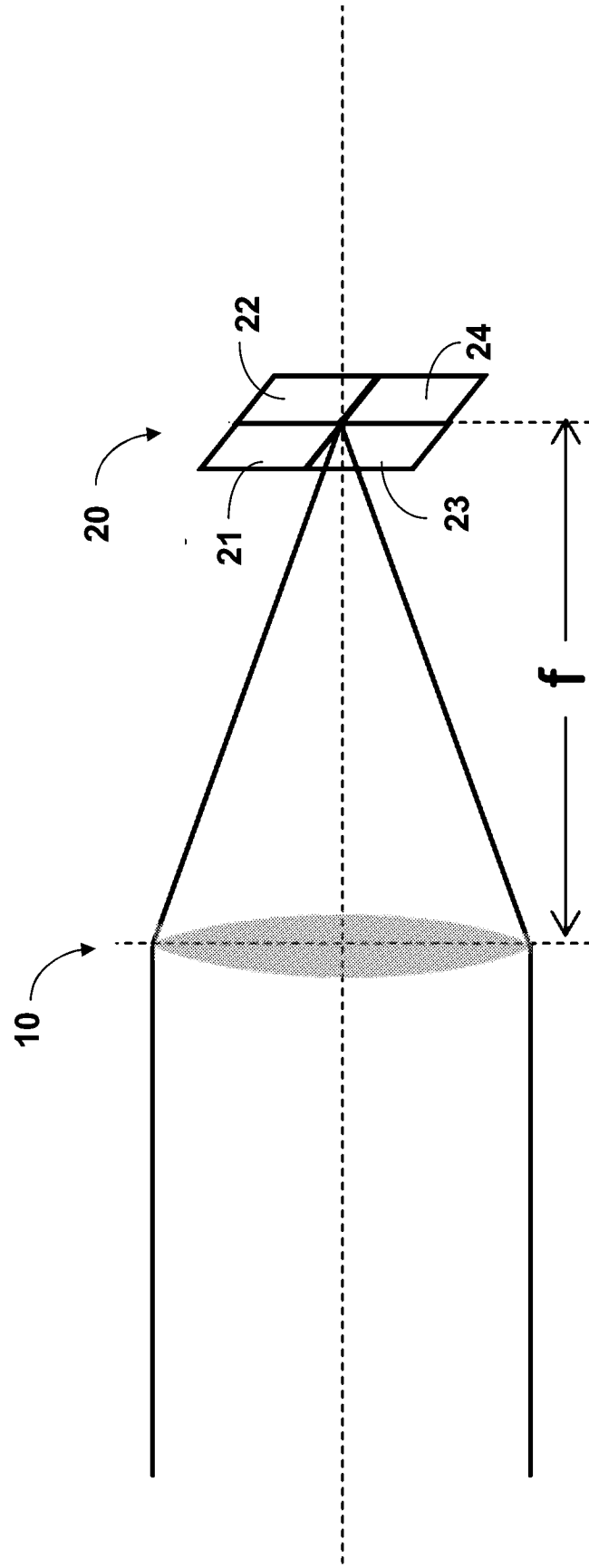
**Fig. 12**





**Fig. 13**

**Stand der Technik**



**Fig. 14**

**Stand der Technik**

