



(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: 10 2014 200 633.3

(51) Int Cl.: **B23K 26/06 (2006.01)**

(22) Anmelddatag: 15.01.2014

B23K 26/082 (2014.01)

(43) Offenlegungstag: –

G02B 26/10 (2006.01)

(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 07.05.2015

G02B 27/10 (2006.01)

G02B 27/40 (2006.01)

G02B 13/00 (2006.01)

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

(73) Patentinhaber:

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., 80686 München, DE; Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 52062 Aachen, DE

(74) Vertreter:

PFENNING MEINIG & PARTNER GbR, 80339 München, DE

(72) Erfinder:

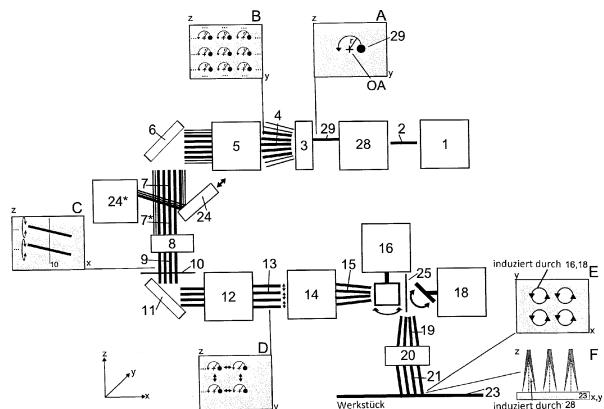
Eifel, Stephan, 50679 Köln, DE; Büsing, Lasse, 52072 Aachen, DE; Gatej, Alexander, 52064 Aachen, DE; Traub, Martin, 52146 Würselen, DE; Gillner, Arnold, Dr., 52159 Roetgen, DE; Holtkamp, Jens, Dr., 41849 Wassenberg, DE; Ryll, Joachim, 52076 Aachen, DE; Gretzki, Patrick, 52074 Aachen, DE

(56) Ermittelter Stand der Technik:

**DE 10 2007 032 231 A1
US 5 463 200 A**

(54) Bezeichnung: **Bearbeitungsvorrichtung und -verfahren zur Laserbearbeitung einer Oberfläche**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Bearbeitungsvorrichtung zur Laserbearbeitung einer Oberfläche, mit welcher ein Laserstrahlbündel mittels einer Rotationseinheit umlaufend um eine optische Achse parallel versetzbare ist, das versetzte Laserstrahlbündel mit einer Divergenzeinheit in eine Mehrzahl von Teilstrahlbündel auffächerbar ist, die Mehrzahl von Teilstrahlbündel jeweils fokussierbar sind, einige der Teilstrahlbündel aus dem entstehenden Gesamtstrahlenbündel entfernbare sind, Winkel von Strahlen der Teilstrahlbündel zueinander jeweils verkleinerbar sind, die verbleibenden Teilstrahlbündel zeitabhängig ablenkbar sind und die verbleibenden Teilstrahlbündel jeweils fokussierbar sind.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Bearbeitungsvorrichtung zur Laserbearbeitung einer Oberfläche, mit welcher ein Laserstrahlbündel mittels einer Rotationseinheit umlaufend um eine optische Achse parallel versetzbare ist, das versetzte Laserstrahlbündel mit einer Divergenzeinheit in eine Mehrzahl von Teilstrahlbündeln auffächerbar ist, die Mehrzahl von Teilstrahlbündeln jeweils fokussierbar sind, einige der Teilstrahlbündel aus dem entstehenden Gesamtstrahlenbündel entfernbare sind, Winkel von Strahlen der Teilstrahlbündel zueinander jeweils verkleinerbar sind, die verbleibenden Teilstrahlbündel zeitabhängig ablenkbar sind und die verbleibenden Teilstrahlbündel jeweils fokussierbar sind.

[0002] Die Erfindung betrifft außerdem ein entsprechendes Verfahren.

[0003] Bei der Laserbearbeitung mit gepulster oder kontinuierlicher (continuous wave) Laserstrahlung stehen aufgrund der ständigen Weiterentwicklung der Laserstrahlquellen immer höhere mittlere Laserleistungen zur Verfügung. Auf dem Markt der Ultrakurzpuls-laserstrahlquellen gab es in den letzten Jahren einen deutlichen Anstieg der mittleren Laserleistungen industriell verwendbarer Lasersysteme. So sind heute industrietaugliche UKP-Laserquellen mit Ausgangleistungen im Bereich von 50–150 W kommerziell verfügbar. Laserquellen mit Leistungen von 400 W und mehr werden in den kommenden Jahren den Markt erobern. Die höhere mittlere Leistung kann dazu verwendet werden einen Laserprozess durch Verwendung höherer Intensitäten oder der Bestrahlung größerer Flächen zu beschleunigen. In vielen Anwendungen, vor allem in der Lasermikrobearbeitung, sind jedoch oft kleine Spotdurchmesser zur Erzielung hoher Genauigkeiten an Geometrie gefragt. Mit einer Erhöhung der mittleren Laserleistung bei gleichbleibend kleiner Spotgeometrie kann jedoch aufgrund zu großem Energieeintrag nur bedingt eine Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit bei gleichbleibender Qualität der Bearbeitung erzielt werden. Damit existiert für jeden Prozess meist eine maximale Grenze an sinnvoller Laserleistung bzw. Laserintensität für einen definierten Bearbeitungspunkt. Um die Prozessgeschwindigkeit bei gleich bleibendem Spotdurchmesser dennoch zu erhöhen, können generell zwei Ansätze verfolgt werden: Der erste Ansatz ist eine zeitlich schnellere Verteilung der Laserenergie auf dem Werkstück durch schnelle Bewegung des Werkstücks oder des Laserspots. Der zweite Ansatz beinhaltet eine Aufteilung der Laserleistung auf eine größere Fläche. Als Beispiel für den zweiten Ansatz kann eine Parallelbearbeitung mit mehreren Bearbeitungspunkten gesehen werden.

[0004] Eine solche Parallelbearbeitung wird in der Offenlegungsschritt DE 10 2007 032 231 A1 betreffend die Erzeugung von Mikrolöchern beschrieben. In der genannten Veröffentlichung wird ein Laserstrahlbündel durch einen Laserstrahleingang und eine dahinter befindliche Rotationseinheit in einer zeitlich die optische Achse umlaufenden Versatzrichtung parallel versetzt. Hinter der Rotationseinheit ist eine Divergenzeinheit angeordnet mit der das Laserstrahlbündel in eine Vielzahl von Teilstrahlbündeln auffächerbar ist. Diese Teilstrahlbündel sind mit einer Umlenkeinheit zeitabhängig umlenkbar und anschließend mit einer Fokussiereinheit jeweils fokussierbar.

[0005] In der US Patentanmeldung US 5 463 200 A ist ebenfalls eine Bearbeitungsvorrichtung mit dem Ziel der Parallelbearbeitung beschrieben, wobei durch eine Divergenzeinheit ein Laserstrahlbündel in eine Vielzahl von Teilstrahlbündeln auffächerbar ist, und wobei die Teilstrahlbündel radial zur optischen Achse eine diskontinuierliche Intensitätsverteilung aufweisen. Außerdem ist ein Teil der Teilstrahlbündel durch eine Selektionsseinheit entfernbare.

[0006] Die genannten Ansätze können durch Scansysteme umgesetzt werden, die eine schnelle Strahlbewegung und/oder Strahlformung realisieren können. Dazu existieren auf dem Markt einige Scansysteme wie beispielsweise Galvanometerscanner oder Polygonscanner.

[0007] Mit der weiteren Erhöhung der mittleren Laserleistungen reichen bereits heute die Scangeschwindigkeiten klassischer Scansysteme nicht mehr aus, um die Laserleistung in einem Strahl umzusetzen.

[0008] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es daher, eine Bearbeitungsvorrichtung zur Laserbearbeitung einer Oberfläche anzugeben, die auch bei sehr hohen Laserleistungen eine hochpräzise Überarbeitung der Oberfläche mit Lasern ermöglicht. Aufgabe ist es außerdem, ein entsprechendes Verfahren zur Laserbearbeitung anzugeben.

[0009] Diese Aufgabe wird gelöst durch die Bearbeitungsvorrichtung zur Laserbearbeitung einer Oberfläche nach Anspruch 1 und das Verfahren zur Laserbearbeitung nach Anspruch 39. Die abhängigen Ansprüche ge-

ben vorteilhafte Weiterbildungen der erfindungsgemäßen Bearbeitungsvorrichtung und des erfindungsgemäßen Verfahrens an.

[0010] Erfindungsgemäß wird eine Bearbeitungsvorrichtung zur Laserbearbeitung einer Oberfläche angegeben, mit der eine Mehrzahl von Teilstrahlbündeln über eine zu bearbeitende Oberfläche bewegbar sind.

[0011] Die Bearbeitungsvorrichtung weist einen Laserstrahleingang auf, an welchem ein Laserstrahlbündel einstrahlbar ist. Die Richtung, in welcher das Laserstrahlbündel einstrahlbar ist, wird hier als Strahlrichtung bezeichnet. Die Strahlrichtung des eingestrahlten Laserstrahlbündels definiert auch die optische Achse des Systems. Die optische Achse des Systems soll hier als durchgehende Gerade verstanden werden, die jedoch bei gegebenenfalls vorhandenen Umlenkspiegeln entsprechend abgewinkelt wird.

[0012] Unter einem Strahlbündel, also insbesondere einem Laserstrahlbündel und einem Teilstrahlbündel, soll hier vorzugsweise eine Menge von Strahlen verstanden werden, die sich in einem bestimmten Winkelbereich um einen Hauptstrahl des entsprechenden Strahlbündels oder in einem bestimmten Abstandsbereich (vorzugsweise gemessen in Richtung senkrecht zum Hauptstrahl) vom Hauptstrahl ausbreiten. Jedem Strahlbündel ist also bevorzugt ein Hauptstrahl sowie eine Menge von Strahlen um diesen Hauptstrahl zugeordnet. Der Winkelbereich bzw. der Abstandsbereich kann eine endliche Größe haben oder infinitesimal sein. Das Teilstrahlbündel wird bevorzugt durch den Abstandsbereich anstelle des Winkelbereiches definiert, wenn das Strahlbündel kollimiert ist. Unter einem Strahl wird hier vorteilhafterweise die Flugbahn eines Photons oder eine senkrecht auf der Wellenfront des Strahlbündels stehende Gerade auf verstanden.

[0013] Alternativ kann das Strahlbündel in einem Bild der geometrischen Optik beschrieben werden als eine Vielzahl von Strahlen, die relativ zu einem Hauptstrahl jeweils einen Winkel aufweisen, der sich über die freie Propagation nicht ändert. Insgesamt lässt sich aus der Gesamtheit aller Winkel zwischen dem Hauptstrahl und den anderen Strahlen eine Winkelverteilung definieren. Der Hauptstrahl kann dann jener Strahl sein, der durch das Zentrum der Eintrittspupille verläuft. Vorzugsweise ist die Eintrittspupille die freie Apertur des Laserstrahleingangs in das optische System. Das Laserstrahlbündel kann in einer Ebene senkrecht zur optischen Achse eine Intensitätsverteilung bilden, die im zeitlichen Mittel die örtliche Energieverteilung des Laserstrahlbündels beschreibt.

[0014] Erfindungsgemäß ist in Strahlrichtung hinter dem Laserstrahleingang eine Rotationseinheit angeordnet, durch welche das Laserstrahlbündel gegenüber der optischen Achse in einer Versatzrichtung um einen Abstand parallel versetzbare ist, wobei die Versatzrichtung zeitlich um die optische Achse umläuft. Der Abstand ist vorzugsweise größer als Null, kann jedoch auch Null sein.

[0015] Dass die Rotationseinheit in Strahlrichtung hinter dem Laserstrahleingang angeordnet ist, bedeutet, dass ein am Laserstrahleingang in Strahlrichtung auf der optischen Achse eingestrahltes Laserstrahlbündel die Rotationseinheit nach dem Eintreten in die Bearbeitungsvorrichtung erreicht. Die Rotationseinheit versetzt das Laserstrahlbündel parallel gegenüber der optischen Achse um den besagten Abstand. Während also das Laserstrahlbündel auf der optischen Achse in die Rotationsvorrichtung eintritt, verlässt es diese in dem genannten Abstand zur optischen Achse, jedoch parallel zu dieser. Die Richtung von der optischen Achse zum die Rotationseinheit verlassenden Laserstrahlbündel soll hier als Versatzrichtung bezeichnet werden. Erfindungsgemäß läuft die Versatzrichtung zeitlich um die optische Achse um. Das aus der Rotationsvorrichtung austretende Laserstrahlbündel beschreibt also in einer zur optischen Achse senkrecht stehenden Ebene eine Bahn, die um die optische Achse umläuft. Ist der genannte Abstand Null, so ist keine Versatzrichtung definiert.

[0016] Vorzugsweise läuft die Versatzrichtung entlang einer geschlossenen Bahn um die optische Achse um und besonders bevorzugt kreisförmig, so dass die besagte Bahn kreisförmig ist.

[0017] Die erfindungsgemäße Bearbeitungsvorrichtung weist weiter eine in Strahlrichtung hinter der Rotationseinheit angeordnete Divergenzeinheit auf, mit welcher das Laserstrahlbündel in eine Mehrzahl von Teilstrahlbündeln auffächerbar ist. Die Divergenzeinheit kann vorzugsweise als Strahlteiler angesehen werden. Die Teilstrahlbündel können dabei in einer Ebene senkrecht zur optischen Achse eine kontinuierliche Intensitätsverteilung bilden, sie können jedoch bevorzugt auch eine Intensitätsverteilung haben, die für jedes der Teilstrahlbündel ein lokales Maximum der Intensität in besagter Ebene senkrecht zur optischen Achse hat. In diesem Fall können die Teilstrahlbündel jeweils als einzelne Laserstrahlbündel angesehen werden bzw. ausgebildet sein. Die Teilstrahlbündel können sich dabei in ihren Randbereichen mit benachbarten Teilstrahlbündel in Teilbereichen entlang der optischen Achse überlagern oder vollständig getrennt voneinander vorliegen.

In letzterem Fall ist die Intensitätsverteilung in besagter Ebene diskontinuierlich. Die Verteilung der Teilstrahlbündel wird durch den Aufbau des Strahlteilers bestimmt.

[0018] Dass das Laserstrahlbündel in die Mehrzahl von Teilstahlbündeln aufgefächert wird, bedeutet vorzugsweise, dass Hauptstrahlen der Teilstrahlbündel hinter der Divergenzeinheit divergent verlaufen. Die Funktion der Divergenzeinheit kann vorteilhaft so beschrieben werden, dass sie die Hauptstrahlen in eine endliche oder unendliche Anzahl von neuen Hauptstrahlen aufteilt, die sich jeweils in ihrer Richtung relativ zur optischen Achse unterscheiden. Zu jedem neuen Hauptstrahl gibt es dann eine Menge von Strahlen, die bezogen auf den neuen Hauptstrahl die gleiche Winkelverteilung aufweisen, wie die Strahlen des in die Divergenzeinheit einfallenden Laserstrahlbündels. Ein neuer Hauptstrahl kann dann zusammen mit dieser Menge von Strahlen als Teilstrahlbündel angesehen werden. Die Divergenzeinheit führt damit zu einer Änderung der Intensitätsverteilung des einfallenden Laserstrahlbündels im Winkelraum.

[0019] Eine kontinuierliche Intensitätsverteilung kann eine in sich zusammenhängende Intensitätsverteilung sein, die durch die Divergenzeinheit gebildet wird. Durch das erste Modul kann dann jedes Teilstrahlbündel im Sinne der paraxialen geometrischen Optik in einen Punkt auf einer gemeinsamen Fokusebene mit Ausrichtung senkrecht zur optischen Achse fokussiert werden. Im kontinuierlichen Fall gibt es daher in der Fokusebene unendlich viele Punkte und somit unendlich viele Teilstrahlbündel.

[0020] Ein Beispiel für eine diskontinuierliche Intensitätsverteilung ist ein Strahlteiler (z. B. eine Aufteilung in ein Raster aus 4 mal 4 Teilstrahlbündeln), der das Laserstrahlbündel in eine endliche Anzahl von Teilstrahlbündeln aufteilt. In der Fokusebene des ersten Moduls können durch die Fokussierung in einem Bild der paraxialen Optik somit örtlich separierte Fokuspunkte entstehen. In einem Bild der beugungsbegrenzten Optik können in der Fokusebene Fokusbereiche entstehen.

[0021] Eine Kombination aus kontinuierlicher Intensitätsverteilung und diskontinuierlicher Intensitätsverteilung durch die Divergenzenheit kann auch erfolgen. Als Beispiel dafür kann die Bildung eines Raster aus 4 mal 4 Bereichen genannt werden, die jeweils ein „F“ bilden.

[0022] Die Gesamtheit der durch die Divergenzeinheit erzeugten Teilstrahlbündel soll hier als Gesamtstrahlbündel bezeichnet werden.

[0023] Die Divergenzeinheit kann jedoch auch eine beliebige Intensitätsverteilung in besagter Ebene senkrecht zur optischen Achse erzeugen. Im einfachsten Fall kann beispielsweise die Divergenzeinheit den Strahl nach der Gittergleichung

$$\sin(\theta_n) = n \cdot \frac{\lambda}{g}$$

erzeugen, wobei n die ganzzahlige Ordnung des Gitters, λ die Wellenlänge des Laserstrahlbündels, g die Gitterkonstante und θ_n den Winkel des Hauptstrahls des Teilstrahlbündels zur optischen Achse beschreibt. Je nach Aufbau des Strahlteilers können hier zweidimensionale Raster der Intensitätsverteilung oder komplexe Intensitätsverteilungen erzeugt werden.

[0024] Wie oben beschrieben kann die Divergenzeinheit Teilstrahlbündel bilden, die eine kontinuierliche Intensitätsverteilung in einer gedachten Ebene senkrecht zur optischen Achse bilden. In diesem Fall gehen benachbarte Teilstrahlbündel ineinander über. Die Intensitätsverteilung kann dabei beliebige Formen annehmen, wobei die Form der Intensitätsverteilung durch die Divergenzeinheit vorgegeben wird. Die oben beschriebene Definition der Teilstrahlbündel ist für beliebige Divergenzeinheiten anwendbar. Jedes Gesamtstrahlbündel, das durch die Divergenzeinheit gebildet wird, kann als zusammengesetzt aus einer beliebigen Zahl an Teilstrahlbündeln dargestellt werden, wobei die Winkelbereiche bzw. Abstandsbereiche, in denen sich die Strahlen eines gegebenen Teilstahlbündels um den entsprechenden Hauptstrahl erstrecken auch infinitesimal sein können. Andere Divergenzeinheiten können jedoch auch diskontinuierliche Teilstrahlbündel erzeugen, die nicht überlappen und deren Strahlen sich in einem endlichen, nicht verschwindenden Winkelbereich bzw. Abstandsbereich um den entsprechenden Hauptstrahl ausbreiten.

[0025] Die Divergenzeinheit kann bevorzugt ein diffraktives optisches Element mit einem Muster von Mikro- und/oder Nanostrukturen sein. Der Strahlteiler kann außerdem auch ein dichroitischer Strahlteiler, ein refraktives optisches Element, wie z. B. ein Mikrolinsenarray, oder ein anderes festes oder dynamisches Beugungsgitter sein, wie beispielsweise ein Spatial Light Modulator (räumlicher Lichtmodulator), ein Hologramm oder ein Grating Light Valve (Gitter-Lichtventil).

[0026] Bevorzugterweise erzeugt die Divergenzeinheit kollimierte Teilstrahlbündel.

[0027] In einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung kann die Divergenzeinheit um zumindest eine Achse, insbesondere die optische Achse, vorzugsweise um zwei oder drei zueinander senkrecht stehende Achsen, die besonders bevorzugt die optische Achse umfassen, drehbar gelagert sein.

[0028] Die erfindungsgemäße Bearbeitungsvorrichtung weist außerdem ein in Strahlrichtung hinter der Divergenzeinheit angeordnetes erstes Modul auf, mit welchem die Mehrzahl von Teilstrahlbündeln jeweils fokussierbar sind. Es werden also in jedem durch die Divergenzeinheit erzeugten Teilstrahlbündel die Strahlen des entsprechenden Teilstrahlbündels aufeinander zu abgelenkt, so dass sie sich jeweils in einem Fokuspunkt schneiden.

[0029] Vorteilhafterweise können durch das erste Modul außerdem auch Winkel der Hauptstrahlen der Teilstrahlbündel zueinander verkleinert werden, wobei besonders bevorzugt die Hauptstrahlen aller Teilstrahlbündel zueinander parallelisiert werden können. Die Teilstrahlbündel können also so durch das erste Modul abgelenkt werden, dass ihre Hauptstrahlrichtungen hinter dem ersten Modul parallel zueinander verlaufen. Sind die durch die Divergenzeinheit erzeugten Teilstrahlbündel einzelne Laserstrahlen bzw. einzelne Laserstrahlbündel, so können diese hinter dem ersten Modul zueinander parallel verlaufen. Das erste Modul kann auch als erstes Relaymodul bezeichnet werden.

[0030] Das Modul ist vorzugsweise so positioniert, dass die Divergenzeinheit in einer Eintrittspupille dieses ersten Moduls steht.

[0031] Die erfindungsgemäße Bearbeitungsvorrichtung weist außerdem eine in Strahlrichtung hinter dem ersten Modul angeordnete Selektionseinheit auf, mit der ein Teil der Teilstrahlbündel aus dem durch das erste Modul erzeugten Gesamtstrahlenbündel entfernt werden kann. Bevorzugterweise ist die Selektionseinheit in einem Bereich entlang der optischen Achse angeordnet, in dem die Teilstrahlbündel aufgrund ihrer Fokussierung durch das erste Modul einander nicht überlappen.

[0032] In einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung kann die Selektionseinheit einen Spiegel aufweisen, der in den Strahlengang der zu entfernenden Teilstrahlbündel einbringbar ist, und mit dem vorzugsweise die zu entfernenden Teilstrahlbündel auf einen Absorber umlenkbar sind. Hierzu kann der Spiegel vorteilhaft in zwei Dimensionen bewegbar sein. Es können dadurch aus dem Gesamtstrahlenbündel bestimmte Teilstrahlbündel selektiert werden, während die restlichen Teilstrahlbündel das Selektionsmodul ungehindert durchlaufen und dem weiteren Strahlengang in der Bearbeitungsvorrichtung folgen.

[0033] Auch kann die Selektionseinheit vorteilhafterweise einen Absorber aufweisen, der in den Strahlengang der zu entfernenden Teilstrahlbündel einbringbar ist.

[0034] Die Selektionseinheit kann auch eine Maske aufweisen, die in den Strahlengang der zu entfernenden Teilstrahlbündel bewegbar ist. Auch diese Maske kann hierzu vorzugsweise in zwei Dimensionen dynamisch bewegbar sein.

[0035] In einer Ausgestaltung der Erfindung kann die Selektionseinheit auch ein Mikrospiegelarray aufweisen, bei welchem einzelne Teilstrahlbündel auf einen oder mehrere bewegliche Spiegel treffen, die die entsprechenden Teilstrahlbündel aus dem Strahlengang des Gesamtstrahlenbündels in einen Absorber lenken, oder die alle Teilstrahlbündel, die nicht aus dem Gesamtstrahlenbündel zu entfernen sind, in Richtung der optischen Achse der Bearbeitungsvorrichtung reflektieren, so dass die zu entfernenden Teilstrahlbündel ohne abgelenkt zu werden beispielsweise auf einen Absorber treffen.

[0036] Die Selektionseinheit kann außerdem zusätzlich oder alternativ eine Maske aufweisen, die zu entfernende Teilstrahlbündel ausblendet und/oder absorbiert. Eine solche Maske kann aus dem Gesamtstrahlenbündel Teilstrahlbündel entfernen. Eine solche Maske kann auch zusätzlich zu den vorstehend beschriebenen Einheiten wie Spiegel, Maske oder statisches oder dynamisches Mikrospiegelarray in Strahlrichtung hinter dieser entsprechenden Vorrichtung eingesetzt werden, und so aus den durch den ersten Teil der Selektionseinheit nicht entfernten Teilstrahlbündeln weitere Teilstrahlbündel aus dem Gesamtstrahlenbündel zu entfernen.

[0037] Ist beispielsweise die Divergenzeinheit ein Gitter, so teilt sie das eingehende Laserstrahlbündel in Haupt- und höhere Ordnungen. Darüber hinaus existiert auch noch eine nullte Ordnung, die dem ungebeugten Licht des in die Divergenzeinheit eingekoppelten Laserstrahls entspricht. Die nullte und die höheren Beu-

gungsordnungen sind häufig unerwünscht, da sie zu einer Verminderung der Effizienz der Divergenzeinheit führen können und in der zu bearbeitenden Oberfläche den Bearbeitungsprozess behindern können. Derartige nullte und höhere Ordnungen können mittels der Selektionseinheit, insbesondere mittels einer Maske, vorteilhafterweise aus dem Gesamtstrahlenbündel entfernt werden.

[0038] Eine derartige Maske kann beispielsweise ein Metallblech, ein beschichtetes transparentes Substrat, bei dem eine nicht transparente Beschichtung geeignete Öffnungen aufweist, oder ein Spiegel mit einem geeigneten Raster aus Bohrungen sein. Die Maske lässt dann die gewünschten Hauptordnungen unbeeinflusst propagieren während die zu selektierenden nullten und höheren Beugungsordnungen absorbiert oder in einen Absorber umgelenkt werden.

[0039] Es kann vorteilhafterweise auch mit der Selektionseinheit zumindest ein Teilstrahlbündel entfernbare sein, das eine Hauptordnung eines durch das diffraktive optische Element erzeugten Beugungsmusters ist.

[0040] In einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung kann die Selektionseinheit einen wie oben beschriebenen senkrecht zur optischen Achse beweglichen Spiegel oder Maske aufweisen und zusätzlich eine Maske mit Öffnungen wie vorstehend beschrieben. Dabei kann die Maske mit den Öffnungen vor oder bevorzugt hinter dem beweglichen Spiegel bzw. der beweglichen Maske angeordnet sein.

[0041] Die erfindungsgemäße Bearbeitungsvorrichtung weist außerdem ein in Strahlrichtung hinter dem ersten Modul, vorzugsweise hinter der Selektionseinheit, angeordnetes zweites Modul auf, mit dem Winkel von Strahlen der Teilstrahlbündel jeweils zueinander verkleinerbar sind. Es sind also mit dem zweiten Modul in jedem der Teilstrahlbündel, die in das zweite Modul einfallen, die Winkel der Strahlen zueinander verkleinerbar. Vorzugsweise sind mit dem zweiten Modul die Teilstrahlbündel kollimierbar.

[0042] Bevorzugt ist außerdem eine Ausgestaltung der Erfindung, in der mit dem zweiten Modul Winkel der Strahlen der Teilstrahlbündel zueinander jeweils auf jene Winkel verkleinerbar sind, die gleich den entsprechenden Winkeln an der optischen Achse punktgespiegelt sind, welche die Strahlen der entsprechenden Teilstrahlbündel bei Eintreten in das erste Modul zueinander haben. Betrachtet man also eines der Teilstrahlbündel, so treten dessen Strahlen mit bestimmten Winkeln zueinander in das erste Modul ein. In dieser vorteilhaften Ausgestaltung verlassen die Strahlen das zweite Modul mit den gleichen Winkeln zueinander, aber an der optischen Achse punktgespiegelt. Das Teilstrahlbündel steht also nach Verlassen des zweiten Moduls gegenüber dem Eintritt in das erste Modul auf dem Kopf.

[0043] In einer bevorzugten Ausgestaltung der Erfindung können mit dem zweiten Modul die Hauptstrahlen der Teilstrahlbündel konvergierbar sein. Dass die Hauptstrahlen konvergierbar sind, bedeutet, dass sie durch das zweite Modul so ablenkbar sind, dass sie aufeinander zulaufen. Die Hauptstrahlrichtungen der Teilstrahlbündel werden also durch das zweite Modul so verändert, dass sich der Abstand zwischen den Hauptstrahlen der Teilstrahlbündel in Richtung senkrecht zur optischen Achse entlang der optischen Achse bis zu einem Punkt geringsten Abstands verkleinert.

[0044] Das zweite Modul kann als zweites Relaymodul bezeichnet werden. Das Relaymodul kann zusammen mit den in Strahlrichtung davorliegenden Elementen, insbesondere mit dem ersten Modul das Gesamtstrahlenbündel, gegebenenfalls reduziert um mittels der Selektionseinheit entfernte Teilstrahlbündel, in eine Strahlebene abbilden, in der die Hauptstrahlen Teilstrahlbündel zueinander den geringsten Abstand haben. Das Gesamtstrahlenbündel hat hier dann seinen kleinsten Durchmesser. In dieser Ebene können sich die Hauptstrahlen der jeweiligen Teilstrahlbündel kreuzen.

[0045] Die erfindungsgemäße Bearbeitungsvorrichtung weist in Strahlrichtung hinter dem zweiten Modul, vorzugsweise vor der Fokussiereinheit, eine Umlenkeinheit auf, mit der die Teilstrahlbündel zeitabhängig ablenkbar sind. Mit der Umlenkeinheit sind also die Strahlrichtungen der Hauptstrahlen der Teilstrahlbündel ablenkbar.

[0046] Bevorzugterweise verursacht die Umlenkeinheit eine effektive Umlenkung der Teilstrahlbündel in jedem Punkt, in dem die Hauptstrahlen aufgrund ihrer durch das zweite Modul verursachten Konvergenz den geringsten Abstand voneinander haben.

[0047] Die Umlenkeinheit erlaubt vorzugsweise eine einstellbare Ablenkung der Teilstrahlbündel mit hoher Dynamik in der Bearbeitungsebene eines Werkstücks, also auf der zu bearbeitenden Oberfläche. Bevorzugterweise weist die Umlenkeinheit zwei Strahlumlenker auf, die senkrecht zueinander angeordnet sind, so dass sie eine Strahlumlenkung in zwei Raumrichtungen ermöglichen. Bevorzugterweise wird als Umlenkeinheit ein

Galvanometerscanner eingesetzt. Es ist auch möglich, andere dynamische Strahlablenker wie beispielsweise Polygonscanner, Resonanzscanner, Piezoscaner, MEM-Spiegel, akusto- oder elektrooptische Defektoren (AOD oder EOD) einzusetzen.

[0048] Die erfindungsgemäße Bearbeitungsvorrichtung weist darüber hinaus eine Fokussiereinheit auf, mit der die verbleibenden Teilstrahlbündel des Gesamtstrahlenbündels jeweils fokussierbar sind. Vorzugsweise sind sie dabei auf die zu bearbeitende Oberfläche fokussierbar.

[0049] Die Fokussiereinheit ist vorzugsweise in Strahlrichtung hinter der Umlenkeinheit angeordnet. Vorzugsweise ist sie außerdem in Strahlrichtung hinter einem Punkt angeordnet, an dem die Hauptstrahlen der Teilstrahlbündel, die durch das zweite Modul konvergiert wurden, zueinander den geringsten Abstand haben. In diesem Fall ist also die Fokussiereinheit in einem Abstand zum zweiten Modul entlang der optischen Achse angeordnet, in dem die Hauptstrahlen der Teilstrahlbündel wieder auseinanderlaufen. Hinter der Fokussiereinheit können die Teilstrahlbündel dann parallel zueinander verlaufen.

[0050] Die Fokussiereinheit kann beispielsweise ein F-Theta-korrigierte Linse mit telezentrischen Eigenschaften sein. Zusammen mit den Strahlumlenkern lassen sich vorteilhafterweise die entstehenden Foki auf beliebigen zweidimensionalen Bahnen auf der zu bearbeitenden Oberfläche ablenken. Der durch die Rotationseinheit bedingte rotierende Strahlversatz kann in der Strahlebene, in welcher die Hauptstrahlen der Teilstrahlbündel hinter dem zweiten Modul den geringsten Abstand zueinander haben, zu einer Bewegung der Teilstrahlbündel auf einer Kreisbahn mit einem Radius r' führen. Dieser Strahlversatz kann zu einer Anstellung des Strahlbündels relativ zur optischen Achse der Fokussiereinheit führen, so dass das Strahlbündel in einem Winkel β seines Hauptstrahls relativ zur optischen Achse auf das Werkstück trifft.

[0051] Es ist bevorzugt, wenn am Laserstrahleingang der Bearbeitungsvorrichtung ein kollimiertes Laserstrahlbündel eintritt. Bevorzugterweise wird durch die Divergenzeinheit das Laserstrahlbündel in eine Mehrzahl von jeweils kollinierten Teilstrahlbündeln aufgefächert.

[0052] In einer bevorzugten Ausgestaltung der Erfindung kann dann das erste Modul die Teilstrahlbündel jeweils vorzugsweise in eine gemeinsame Ebene, die besonders bevorzugt senkrecht zur Strahlrichtung steht, fokussieren. Hierdurch entsteht in Strahlrichtung hinter dem ersten Modul ein Bereich, in dem sich die Teilstrahlbündel des Gesamtstrahlenbündels nicht überlappen. Bevorzugterweise wird die Selektionseinheit in diesem Bereich angeordnet, in dem sich die Teilstrahlbündel nicht überlappen.

[0053] Hinter der genannten Ebene verlaufen in dieser Ausgestaltung der Erfindung die Teilstrahlbündel jeweils zunächst divergent. Bevorzugterweise werden dann die Teilstrahlbündel durch das zweite Modul jeweils kollimiert, so dass die Teilstrahlbündel hinter dem zweiten Modul jeweils kollimiert verlaufen. Die Teilstrahlbündel verlaufen also in diesem Fall insbesondere dort kollimiert, wo sie aufgrund der Ablenkung durch das zweite Modul konvergieren.

[0054] In einer bevorzugten Ausgestaltung der Erfindung sind die Divergenzeinheit, das erste Modul und das zweite Modul in solchen Abständen zueinander angeordnet, dass die Divergenzeinheit in die genannte Ebene abgebildet wird, in der die Teilstrahlbündel nach dem zweiten Modul zueinander den geringsten Abstand haben.

[0055] In einer vorteilhaften Ausgestaltung können das erste Modul und das zweite Modul jeweils zwei Positivlinsen und eine Negativlinse mit einer definierten Petzval-Summe, die vorzugsweise nahe oder gleich Null ist, aufweisen. Dabei ist vorzugsweise das erste Modul gerade genau umgekehrt angeordnet wie das zweite Modul.

[0056] In einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung kann die Bearbeitungsvorrichtung außerdem ein Zoomsystem aufweisen, das in Strahlrichtung hinter der Divergenzeinheit, vorzugsweise hinter dem ersten Modul, angeordnet ist, und mit welchem ein Abstand zwischen den Teilstrahlbündeln bzw. zwischen den Hauptstrahlen der Teilstrahlbündel veränderbar ist. Das Zoomsystem ist also vorteilhafterweise so ausgestaltet, dass die Teilstrahlbündel in das Zoomsystem mit zueinander parallelen Hauptstrahlrichtungen in bestimmten Abständen der Hauptstrahlen zueinander eintreten und mit zueinander parallelen Hauptstrahlrichtungen mit anderen Abständen der Hauptstrahlen aus dem Zoomsystem austreten.

[0057] Besonders bevorzugt kann das Zoomsystem entlang der optischen Achse zwischen der Selektionseinheit und dem zweiten Modul angeordnet sein.

[0058] Das Zoomsystem kann vorteilhafterweise das Gesamtstrahlenbündel skalieren und so eine Änderung der Abstände der Teilstrahlbündel zueinander bewirken. Im Falle einer beliebigen kontinuierlichen Intensitätsverteilung aus endlichen oder infinitesimalen Teilstrahlbündeln kann diese durch das Zoomsystem skaliert werden.

[0059] Bevorzugterweise ist das Zoomsystem in Strahlrichtung zwischen der Selektionseinheit und dem zweiten Modul angeordnet.

[0060] Das Zoomsystem kann beispielsweise Festbrennweiten-Objektive, bewegte Linsen mit diskreten oder kontinuierlichen Positionen oder aktive Elemente wie beispielsweise Flüssigkeitslinsen aufweisen oder daraus bestehen und kann besonders bevorzugt motorisiert sein. Bevorzugterweise kann das Zoomsystem dabei rotationssymmetrisch sein, besonders bevorzugt mittels sphärischer oder asphärischer Linsen. Es kann hierdurch in beide Raumrichtungen senkrecht zur optischen Achse gemeinsam skaliert werden. Alternativ kann das Zoomsystem beispielsweise durch zylindrische oder azylindrische Oberflächen so ausgeführt sein, dass die Skalierung in jeder Richtung senkrecht zur optischen Achse getrennt verändert werden kann. Darüber hinaus kann vorteilhaft die Zoomfunktion auch durch Verwendung anamorphotischer Prismen realisiert werden.

[0061] Der mögliche Zoombereich kann auch einen größeren Bereich umfassen, der auch mehrere zehn Prozent betragen kann.

[0062] Es ist darüber hinaus auch möglich, das Zoomsystem an einer beliebigen Position zwischen der Divergenzeinheit und der Fokussiereinheit zu positionieren. Es kann darüber hinaus auch integraler Bestandteil einer Linsengruppe in diesem Bereich sein.

[0063] In einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung kann das Zoomsystem eine Mehrzahl von mit zur optischen Achse koaxialen Linsenachsen angeordneten rotationssymmetrischen Linsen aufweisen, die besonders bevorzugt entlang der optischen Achse gegeneinander verschiebbar sind. Durch Einstellen der Abstände der Linsen zueinander kann der Abstand der Teilstrahlbündel zueinander eingestellt werden. Bevorzugterweise wird eine gerade Anzahl, besonders bevorzugt vier, dieser Linsen verwendet, da hierdurch parallel zueinander einfallende Teilstrahlbündel das Zoomsystem parallel zueinander verlassen.

[0064] In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung kann das Zoomsystem eine erste Gruppe von anamorphotischen Prismen bzw. Keilplatten und vorzugsweise außerdem eine zur ersten Gruppe um die optische Achse um 90° gedrehte zweite Gruppe von anamorphotischen Prismen bzw. Keilplatten aufweisen. Dass die erste Gruppe gegenüber der zweiten Gruppe um die optische Achse um 90° gedreht ist, bedeutet dabei, dass die Drehung angegeben ist unter der Annahme, dass die optische Achse von der ersten Gruppe zur zweiten Gruppe als Gerade verläuft. Wird zwischen der ersten Gruppe und der zweiten Gruppe die optische Achse, beispielsweise durch einen Ablenkspiegel, geknickt, so sind die Gruppen so gegeneinander gedreht, dass sie im Falle der Abwesenheit des Knickes zueinander um 90° um die optische Achse gedreht wären.

[0065] In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung kann das Zoomsystem eine erste Gruppe von Zylinderlinsen und vorzugsweise außerdem eine zur ersten Gruppe um die optische Achse um 90° gedrehte zweite Gruppe von Zylinderlinsen aufweisen. Dass die erste Gruppe gegenüber der zweiten Gruppe um die optische Achse um 90° gedreht ist, bedeutet wiederum, dass die Drehung angegeben ist unter der Annahme, dass die optische Achse von der ersten Gruppe zur zweiten Gruppe als Gerade verläuft. Wird zwischen der ersten Gruppe und der zweiten Gruppe die optische Achse, beispielsweise durch einen Ablenkspiegel, geknickt, so sind die Gruppen so gegeneinander gedreht, dass sie im Falle der Abwesenheit des Knickes zueinander um 90° um die optische Achse gedreht wären.

[0066] In dieser Ausgestaltung sind die Prismen bzw. Zylinderlinsen des ersten Paars und die Prismen bzw. Zylinderlinsen des zweiten Paars jeweils gegeneinander um Achsen drehbar, die senkrecht zur optischen Achse stehen und parallel liegen zu nicht parallelen Flächen des Prismas bzw. der Keilplatte bzw. Parallel zur gekrümmten Fläche der Zylinderlinse. Es wird dabei angenommen, dass die Teilstrahlbündel durch eine der nicht parallelen Flächen des Prismas bzw. der Keilplatte in dieses einfallen und das Prisma bzw. die Keilplatte über eine andere der nicht parallelen Flächen verlassen, da hierdurch die Strahlrichtung veränderbar ist. Entsprechendes gilt für die gekrümmte Fläche der Zylinderlinse.

[0067] Die Prismen der Gruppen sind dabei jeweils so angeordnet, dass die Achsen, um welche die Prismen drehbar sind, in der jeweiligen Gruppe parallel zueinander stehen. Diese Achsen sind bei der zweiten Gruppe gegenüber den Achsen des ersten Paars wie oben beschrieben um die optische Achse um 90° gedreht.

[0068] In einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung enthält jede Gruppe genau zwei Prismen, oder zwei Keilplatten oder vier Zylinderlinsen.

[0069] In einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung weist die Bearbeitungsvorrichtung außerdem ein Lasersystem auf, mit dem ein kollimiertes Laserstrahlbündel erzeugbar ist, das in der Strahlrichtung auf der optischen Achse am Laserstrahleingang einstrahlbar ist. Bevorzugterweise weist das Lasersystem einen un gepulsten Laser, einen Mikrosekundenlaser, einen Nanosekundenlaser, einen Pikosekundenlaser oder einen Femtosekundenlaser zur Erzeugung des Laserstrahls auf. Die Wellenlänge des Laserstrahls kann im infraroten Bereich, z. B. 1.064 nm oder 1.030 nm, im sichtbaren, z. B. 532 nm oder 515 nm, oder auch im ultravioletten Bereich, z. B. 355 nm oder 348 nm, liegen.

[0070] In einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung kann die Rotationseinheit als ebene Planparallelplatte, beispielsweise als Glasplatte, ausgestaltet sein, die bevorzugt gegenüber der optischen Achse um einen Winkel $\neq 0^\circ$ und $\neq 90^\circ$ gekippt angeordnet ist und die um die optische Achse drehbar ist. Tritt das Laserstrahlbündel auf der optischen Achse in eine solche Planparallelplatte ein, verlässt es diese mit einem parallelen Versatz gegenüber der optischen Achse.

[0071] In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung kann die Rotationseinheit zumindest zwei entlang der optischen Achse hintereinander angeordnete Keilplatten aufweisen oder daraus bestehen, die um die optische Achse drehbar sind. Die Keilplatten sind dabei so angeordnet, dass ein entlang der optischen Achse auf die Keilplatten einfallendes Laserstrahlbündel beim Durchlaufen der Keilplatten parallel versetzt wird, diese also mit einem Abstand größer als null von der optischen Achse, aber zur optischen Achse parallel, verlässt.

[0072] Vorteilhafterweise haben die Keilplatten einen identischen Keiwinkel und Brechungsindex. Besonders bevorzugt ist ein Abstand der Keilplatten jeder Gruppe jeweils zueinander veränderbar, so dass der durch die jeweilige Gruppe bewirkte Versatz veränderbar ist.

[0073] Vorzugsweise sind die Keilplatten um eine Ebene senkrecht zur optischen Achse gespiegelt angeordnet.

[0074] In einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung kann die Rotationseinheit zwei entlang der optischen Achse hintereinander angeordnete Planparallelplatten aufweisen, die unabhängig voneinander gegenüber der optischen Achse verkippbar sind.

[0075] In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung kann die Rotationseinheit eine zwischen zwei Spiegeln angeordnete Planparallelplatte aufweisen. Dabei sind die Spiegel und die Planparallelplatte so angeordnet, dass ein auf einem der Spiegel entlang der optischen Achse einfallendes Laserstrahlbündel durch diesen Spiegel zur Planparallelplatte reflektiert wird, und die Planparallelplatte durchläuft und auf den anderen Spiegel einfällt, von dem er in Richtung parallel zur optischen Achse und um einen Abstand von größer als null zur optischen Achse beabstandet reflektiert wird, wobei die Planparallelplatte drehbar ist. Vorzugsweise sind die Spiegel in Richtung parallel zur optischen Achse verschiebbar. Bevorzugterweise sind außerdem die Spiegel um eine Achse senkrecht zur optischen Achse und parallel zur Spiegelfläche drehbar. Durch diese Ausgestaltung kann der Abstand eingestellt werden, um den das auslaufende Laserstrahlbündel gegenüber der optischen Achse versetzt ist.

[0076] Durch Verfahren der beiden Spiegel und Anpassen des Kippwinkels kann der Auftreffwinkel des Laserstrahlbündels auf die Planparallelplatte eingestellt werden. Dabei stellt sich durch die Planparallelplatte ein Strahlversatz und damit ein Kreisbahnradius ein, der durch die Änderung des Auftreffwinkels variiert ist. Vorzugsweise werden die beiden Spiegel dabei immer entsprechend symmetrisch so verstellt, dass der Auf treppunkt des Laserstrahlbündels auf die Planparallelplatte der Drehachse der Rotationseinheit entspricht und dass die Drehachse des rotierenden Strahls nach der Reflektion am zweiten Spiegel für alle Winkeleinstellungen identisch ist.

[0077] Die Rotationseinheit kann außerdem ein Schmidt-Pechan Prisma, einen rotierenden K-Spiegel oder ein Dove-Prisma aufweisen oder daraus bestehen, die um die optische Achse drehbar sind.

[0078] In einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung vorzugsweise kann die Bearbeitungsvorrichtung außerdem eine Polarisierungseinheit aufweisen, mit der ein Polarisationszustand des Laserstrahlbündels veränderbar ist. Dabei ist vorzugsweise mit der Polarisierungseinheit eine Polarisationsrichtung des Laserstrahlbündels

dels um die optische Achse drehbar. Besonders bevorzugt ist die Polarisationseinheit in Strahlrichtung vor der Rotationseinheit angeordnet.

[0079] Erfindungsgemäß ist in dieser Ausgestaltung der Erfindung die Polarisationseinheit um die optische Achse drehbar. Dabei werden mit der Drehung der Polarisationsvorrichtung auch die Polarisationsrichtungen der Polarisationsvorrichtung um die optische Achse gedreht.

[0080] Vorzugsweise ist eine Rotationsfrequenz, mit der die Polarisationsseinheit um die optische Achse drehbar ist, halb so groß wie eine Rotationsfrequenz, mit der die Versatzrichtung der Rotationseinheit um die optische Achse umläuft. Hierdurch kann eine definierte Ausrichtung des Polarisationsvektors relativ zur Bewegungsrichtung und zur Anstellung des Laserstrahls erzielt werden.

[0081] Besonders bevorzugt ist die Polarisationsseinrichtung hier eine Halbwellenplatte. Alternativ kann die Polarisationsseinheit auch eine Viertelwellenplatte zur Herstellung zirkularer Polarisierung oder eine Kombination aus Verzögerungsplatten zur Herstellung anderer Polarisationsarten aufweisen oder sein. Insbesondere kann hierbei radiale Polarisierung hergestellt werden, bei der die Polarisationsvektoren radial zum Zentrum der Intensitätsverteilung des Laserstrahls ausgerichtet sind. Es ist auch möglich, tangentiale Polarisierung zu erzeugen, bei der die Polarisationsvektoren tangential zum Zentrum der Intensitätsverteilung ausgerichtet sind. Dies ist durch Verwendung segmentierter Viertelwellen- oder Halbwellenplatten möglich. Die Polarisationsseinrichtung kann außerdem ein Tangentialpolarisator, ein Radialpolarisator oder eine Kombination aus Verzögerungsplatten sein.

[0082] Die genannte Umlenkeinheit kann vorzugsweise ein Galvanometerscanner, ein Polygonscanner, ein Resonanzscanner, ein Piezoscanner, ein Mikrospiegelscanner, ein MEM-Spiegel sein und/oder akustooptische Deflektoren oder elektrooptische Deflektoren oder eine Kombination von um die optische Achse drehbar gelagerten Keilplatten oder Planparallelplatten aufweisen. Die als Umlenkeinheiten genannten Vorrichtungen können einzeln oder auch in Kombination realisiert werden, wobei eine oder mehrere der genannten Vorrichtungen zum Einsatz kommen können.

[0083] Vorzugsweise wird die Umlenkeinheit so positioniert, dass ein effektiver Drehpunkt der Umlenkeinheit in einer Ebene liegt, in der ein durch das erste und das zweite Modul erzeugtes Bild der Divergenzeinheit liegt. Als effektiver Drehpunkt kann vorteilhafterweise der räumliche Mittelpunkt (Schwerpunkt) zwischen den beiden Umlenkachsen der Umlenkeinheit angesehen werden.

[0084] In einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung kann die Bearbeitungsvorrichtung eine Prozessgasdüse aufweisen, mit der zumindest ein Gasstrahl auf jene Bereiche der Oberfläche strahlbar ist, die durch einen oder mehrere Teilstrahlbündel bearbeitet werden. Vorteilhafterweise ist die Prozessgasdüse zwischen der Fokussiereinheit und der zu bearbeitenden Oberfläche angeordnet. Die Prozessgasdüse kann einen Gasstrahl auf die Punkte der Bearbeitung lenken und dort eine gezielte Abführung von flüssigem oder gasförmigem Material bewirken. Vorteilhafterweise kann die Prozessgasdüse mehrere Teildüsen aufweisen, mit denen jeweils der Arbeitsbereich eines Teilstrahlbündels bestrahltbar ist.

[0085] Die erfindungsgemäße Bearbeitungsvorrichtung kann vorteilhaft zur Herstellung großflächiger periodischer Strukturen durch Laserablation, zur Herstellung von beliebigen Intensitätsverteilungen durch Laserablation, zum parallelen Laserbohren, Laserschneiden mit mehreren Bearbeitungspunkten und zum parallelen Wendelbohren eingesetzt werden. Generell kann die erfindungsgemäße Bearbeitungsvorrichtung vorteilhaft zur Laserbearbeitung mit einem festen Muster an Bearbeitungsspots oder einer beliebigen Intensitätsverteilung oder zur Parallelbearbeitung mit mehreren Teilstrahlbündeln eingesetzt werden, wobei in jeder Ebene des Abtrags eine andere Strahlverteilung eingestellt werden kann und dadurch auch bei größeren und nicht periodischen Abtragsgeometrien eine entsprechend der Anzahl der Teilstrahlbündel multiplizierte Abtragsleistung erzielt werden. Darüber hinaus ist die erfindungsgemäße Vorrichtung zur großflächigen Herstellung von periodischen Strukturen in dünnen Folien verwendbar. Es zeigt sich je nach Anzahl der erzeugten Strahlbündel hier eine deutliche Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit um einen Faktor von mindestens 100 im Vergleich zur klassischen Einzelstrahlbearbeitung. Insbesondere im Bereich der Ultrakurzpulsbearbeitung können bisher nicht erreichte Produktionsraten erzielt werden.

[0086] In einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung kann die Bearbeitungsvorrichtung außerdem eine Fokusshift-Einheit aufweisen, die entlang der optischen Achse in Strahlrichtung hinter dem Laserstrahleingang und vor der Rotationseinheit angeordnet ist, und mit der Winkel zwischen Strahlen des Laserstrahlbündels so einstellbar sind, dass die Strahlen auf einen Punkt auf der optischen Achse hinter der Fokusshift-Einheit zu-

laufen oder in einer Projektion der Strahlen auf der optischen Achse von einem Punkt vor oder in der Fokusshift-Einheit wegläufen, wobei der Abstand des entsprechenden Punktes von der Fokusshift-Einheit entlang der optischen Achse veränderbar ist. Der Abstand ist vorzugsweise dynamisch veränderbar. Die Fokusshift-Einheit weist also vorzugsweise eine Einstellvorrichtung auf, die eine Veränderung des Abstandes ermöglicht. Der Begriff Fokusshift-Einheit wurde gewählt, da die betreffende Einheit den Fokus des ersten Moduls vor dem ersten Modul verschiebt. Das erste Modul hat also mit der Fokusshift-Einheit zusammen einen gegenüber dem ersten Modul alleine verschobenen Fokus vor dem ersten Modul.

[0087] Die Erfindung betrifft außerdem ein Verfahren zur Laserbearbeitung einer Oberfläche, wobei ein Laserstrahlbündel in einer Strahlrichtung auf einer optischen Achse eingestrahlt wird, das Laserstrahlbündel gegenüber der optischen Achse in einer Versatzrichtung um einen Abstand parallel versetzt wird, wobei die Versatzrichtung zeitlich um die optische Achse umläuft, das Laserstrahlbündel in eine Mehrzahl von Teilstrahlbündeln aufgefächert wird, die in Richtung radial zur optischen Achse eine kontinuierliche oder diskontinuierliche Intensitätsverteilung bilden, wobei die Mehrzahl der Teilstrahlbündel ein Gesamtstrahlenbündel darstellt, die Teilstrahlbündel jeweils fokussiert werden, ein Teil der Teilstrahlbündel aus dem Gesamtstrahlenbündel entfernt wird, ein Winkel zwischen Strahlen der verbleibenden Teilstrahlbündel jeweils verkleinert wird, die Teilstrahlbündel mit jeweils verkleinerten Winkeln zwischen ihren Strahlen zeitabhängig abgelenkt werden, und die verbleibenden Teilstrahlbündel des Gesamtstrahlenbündels jeweils fokussiert werden.

[0088] Vorzugsweise führt die Umlenkeinheit eine Bewegung aus, die zu einer kreisförmigen Ablenkung der Teilstrahlbündel führt. Die Teilstrahlbündel führen also vorteilhaft eine Wendelbohrbewegung durch.

[0089] Im Sprachgebrauch der Lasertechnik kann das Verfahren als synchrones Wendelbohren mit einer Vielzahl von Teilstrahlen betrachtet werden.

[0090] Bevorzugterweise kann die Rotation der Rotationseinheit mit der Ablenkung der Umlenkeinheit synchronisiert sein. Die Umlenkeinheit kann sich also mit der gleichen Frequenz und der gleichen Phase phi wie die Rotationseinheit bewegen und so eine Kreisbahn beschreiben. Auf diese Weise können senkrechte Löcher in der Oberfläche erzeugt werden.

[0091] Die Teilstrahlbündel können vorteilhaft eine periodische Anordnung von Fokuspunkten mit einer Periode auf der zu bearbeitenden Oberfläche bilden, wobei in einem ersten Bearbeitungsschritt eine Laserbearbeitung an den Fokuspunkten durchgeführt wird und danach in einem weiteren Bearbeitungsschritt die Oberfläche relativ zu den Fokuspunkten um eine Distanz in der Ebene der Oberfläche in Richtung der periodischen Anordnung der Fokuspunkte verschoben wird und nach der Verschiebung eine weitere Laserbearbeitung der Oberfläche durchgeführt wird, wobei die Periode ein ganzzahliges Vielfaches der Distanz ist. Auf diese Weise ist eine äquidistant gerasterte Bearbeitung der Oberfläche möglich.

[0092] In einer vorteilhaften Ausgestaltung kann sich der Strahlteiler während der Bearbeitung um die optische Achse drehen und es kann das Werkstück relativ zur Bearbeitungsvorrichtung bewegt werden, so dass im Werkstück eine Schneidfuge erzeugt wird.

[0093] Im Folgenden soll die Erfindung anhand einiger Figuren beispielhaft erläutert werden. Gleiche Bezugszeichen kennzeichnen dabei gleiche oder entsprechende Merkmale. Die in den Beispielen beschriebenen Merkmale können auch zwischen den Beispielen kombiniert werden und unabhängig vom konkreten Beispiel realisiert sein.

[0094] Es zeigt:

[0095] Fig. 1 einen beispielhaften Aufbau einer erfindungsgemäßen Bearbeitungsvorrichtung,

[0096] Fig. 2 einen beispielhaften Aufbau einer erfindungsgemäßen Bearbeitungsvorrichtung mit einem Zoomsystem mit Rotationssymmetrischen Linsen,

[0097] Fig. 3 einen beispielhaften Aufbau einer erfindungsgemäßen Bearbeitungsvorrichtung mit Anordnungen von Keilplatten als Zoomsystem,

[0098] Fig. 4 einen beispielhaften Aufbau einer erfindungsgemäßen Bearbeitungsvorrichtung mit einer rotierenden Planparallelplatte als Rotationseinheit,

[0099] **Fig.** 5 einen beispielhaften Aufbau einer erfindungsgemäßen Bearbeitungsvorrichtung mit einer verkippablen Divergenzeinheit,

[0100] **Fig.** 6 einen beispielhaften Aufbau einer erfindungsgemäßen Bearbeitungsvorrichtung mit einer zusätzlichen Polarisationseinheit,

[0101] **Fig.** 7 ein Ausführungsbeispiel einer Rotationseinheit mit zwei Spiegeln und einer Planparallelplatte,

[0102] **Fig.** 8 den Aufbau einer Zoomeinheit mit zwei Gruppen von Zylinderlinsen,

[0103] **Fig.** 9 eine Illustration des optischen Wirkprinzips von anamorphotischen Prismen auf eine diskontinuierliche Strahlverteilung,

[0104] **Fig.** 10 den Verlauf der Strahlen dreier verschiedener Teilstrahlbündel durch das Zoomsystem in einer Ausführung mit rotationssymmetrischen Linsen in verschiedenen Konfigurationen der einzelnen Linsenpositionen,

[0105] **Fig.** 11 einen vereinfachten Verlauf dreier Teilstrahlbündel von der Divergenzeinheit über das erste Modul bis hinter das zweite Modul in einem Aufbau ohne Zoomsystem für eine telezentrische Ausführung des ersten und zweiten Moduls,

[0106] **Fig.** 12 einen vereinfachten Verlauf dreier Teilstrahlbündel von der Divergenzeinheit über das erste Modul bis hinter das zweite Modul mit einer Divergenzeinheit zwischen dem ersten und dem zweiten Modul,

[0107] **Fig.** 13 eine Illustration der vorzugsweisen Positionierung der Ablenkeinheit im Bereich hinter dem zweiten Modul, in dem die Teilstrahlbündel den geringsten Abstand voneinander haben,

[0108] **Fig.** 14 eine beispielhafte Definition der Winkel zwischen den Strahlen in einem Teilstrahlbündel bezogen auf den Hauptstrahl und Wirkung des zweiten Moduls auf die Strahlen in einem Teilstrahlbündel und auf den Winkel des Hauptstrahles relativ zur optischen Achse,

[0109] **Fig.** 15 eine Illustration der Wirkung des zweiten Moduls auf die Winkel der Strahlen eines Teilstrahlbündels untereinander sowie auf die Winkel zwischen den Hauptstrahlen,

[0110] **Fig.** 16 ein beispielhafter Scanverlauf zur Herstellung periodischer Muster mit der erfindungsgemäßen Bearbeitungsvorrichtung,

[0111] **Fig.** 17 Schematische Darstellung der Abbildung einer kontinuierlichen Intensitätsverteilung

[0112] **Fig.** 18 Schematische Darstellung der Abbildung einer diskontinuierlichen Intensitätsverteilung

[0113] **Fig.** 1 zeigt eine beispielhafte Ausführung einer erfindungsgemäßen Bearbeitungsvorrichtung zur Laserbearbeitung einer Oberfläche **23**. Die Bearbeitungsvorrichtung weist hier ein Lasersystem **1** auf, das ein kollimiertes Laserstrahlbündel **2** emittiert. Der Laser kann dabei je nach Anwendungsbereich beispielsweise ein ungepulster (cw-Laser), ein kurz gepulster, beispielsweise ein Nanosekundenlaser, oder vorzugsweise ein ultrakurz gepulster Laser, beispielsweise ein Pikosekundenlaser und/oder ein Femtosekundenlaser sein, der Licht hoher Kohärenz emittiert. Die Wellenlänge des Lasers kann beispielsweise im infraroten Bereich, z. B. bei 1.064 nm oder 1.030 nm, im sichtbaren Bereich, beispielsweise bei 532 nm oder 515 nm, oder auch im ultravioletten Bereich, beispielsweise bei 355 nm oder 348 nm, liegen. Im Folgenden soll der Durchmesser des emittierten Strahlbündels **2** mit d_0 bezeichnet werden.

[0114] Die beispielhafte Bearbeitungsvorrichtung der **Fig.** 1 weist eine in Strahlrichtung hinter dem Lasersystem angeordnete Rotationseinheit **28** auf, durch welche das Laserstrahlbündel gegenüber der optischen Achse in einer Versatzrichtung um einen Abstand größer als null parallel versetzbare ist, wobei die Versatzrichtung zeitlich um die optische Achse umläuft.

[0115] Jener Bereich zwischen dem Lasersystem **1** und der Rotationseinheit **28** wird hier als Laserstrahleinang bezeichnet, an welchem das Laserstrahlbündel in einer Strahlrichtung auf einer optischen Achse in die Rotationseinheit bzw. die Bearbeitungsvorrichtung einstrahlbar ist.

[0116] Die Rotationseinheit **28** erzeugt im ruhenden Zustand einen parallelen Strahlversatz relativ zur optischen Achse. Dabei soll der Abstand zwischen dem versetzten Strahlbündel (bzw. dessen Hauptstrahl) und der optischen Achse mit r bezeichnet werden. In einem Koordinatensystem, in dem die optische Achse auf der x-Achse liegt, hat die optische Achse die Koordinaten ($z = 0, y = 0$). Das kollimierte Laserstrahlbündel habe beim Auftreffen auf die Rotationseinheit einen Durchmesser von d_1 . Durch Rotation der Rotationseinheit **28** bewegt sich das versetzte Strahlbündel zeitlich um die optische Achse, beispielsweise auf einer Kreisbahn mit dem Radius r , wobei das Zentrum der Kreisbahn auf der optischen Achse liegt. Das Strahlbündel **29** verlässt die Rotationseinheit **28** kollimiert und bewegt sich also in diesem Beispiel auf einer Kreisbahn parallel zur optischen Achse, wie dies in Teilfigur A der **Fig. 1** gezeigt ist, die einen Schnitt senkrecht zur optischen Achse abbildet. Die Rotationseinheit kann vorteilhaft eine rotierende Planparallelplatte der Dicke t sein, die durch einen Hohlwellenmotor antreibbar ist. Eine Flächennormale relativ zur Rotationsachse ist dabei um einen Winkel α verkippt, der vorzugsweise ungleich 0° und ungleich 90° ist.

[0117] In diesem Beispiel legen die Plattendicke t und der Winkel α den Strahlversatz r des aus der Rotationseinheit **28** austretenden Strahlbündels **29** gemäß der Gleichung

$$r = t \sin(\alpha) \left(1 - \frac{\cos(\alpha)}{\sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - \sin^2(\alpha)}} \right)$$

fest, wobei n_2 der optische Brechungsindex der Platte und n_1 der Brechungsindex des Umgebungsmediums ist. Der Motor erlaubt eine Rotation der Planparallelplatte mit hoher Drehzahl im Bereich von beispielsweise 50–100 Hz oder höher.

[0118] Alternativ kann der Strahlversatz beispielsweise auch durch eine Kombination von zumindest zwei synchron rotierenden und in ihrer Lage zueinander justierbaren Keilplatten (anamorphotischen Prismen) realisiert werden. Weitere Möglichkeiten zur Induzierung des rotierenden optischen Strahlversatzes sind beispielsweise die Verwendung eines rotierenden Schmidt-Pechan-Prismas, eines rotierenden K-Spiegels oder eines rotierenden Dove-Prismas. Es ist auch möglich, den Radius r um den das Laserstrahlbündel **29** gegenüber der optischen Achse versetzt ist, variabel zu realisieren. Dies ist mit komplexeren Aufbauten möglich.

[0119] Die Bearbeitungsvorrichtung der **Fig. 1** weist außerdem eine in Strahlrichtung hinter der Rotationseinheit angeordnete Divergenzeinheit **3** auf, mit welcher das Laserstrahlbündel in eine Mehrzahl von Teilstrahlbündel **4** auffächerbar ist, die in Richtung radial zur optischen Achse eine kontinuierliche oder diskrete Intensitätsverteilung haben können.

[0120] Durch die Divergenzeinheit kann der Hauptstrahl in eine endliche oder unendliche Anzahl von neuen Hauptstrahlen aufgeteilt werden, die sich jeweils in ihrer Richtung relativ zur optischen Achse unterscheiden. Zu jedem neuen Hauptstrahl gibt es eine Menge von Strahlen, die, bezogen auf den neuen Hauptstrahl, die gleiche Winkelverteilung aufweist, wie die des in die Divergenzeinheit einfallenden Laserstrahlbündels. Ein neuer Hauptstrahl bildet zusammen mit dieser Menge von Strahlen ein Teilstrahlbündel. Die Divergenzeinheit führt damit zu einer Änderung der Intensitätsverteilung des einfallenden Laserstrahlbündels im Winkelraum.

Beispiel 1: Kontinuierliche Intensitätsverteilung

[0121] Eine kontinuierliche Intensitätsverteilung ist vorteilhaft eine in sich zusammenhängende Intensitätsverteilung, die durch die Divergenzeinheit gebildet wird. Durch das erste Modul kann jedes Teilstrahlbündel im Sinne der paraxialen geometrischen Optik in einen Punkt auf einer gemeinsamen Fokusebene mit Ausrichtung senkrecht zur optischen Achse fokussiert werden. Im kontinuierlichen Fall gibt es vorteilhaft in der Fokusebene unendlich viele Punkte und somit unendlich viele Teilstrahlbündel. Als Beispiel dazu kann die Erzeugung des Buchstabens „F“ genannt werden. Die zusammenhängende Intensitätsverteilung des „F“ wird durch die Divergenzeinheit gebildet. Durch die Fokussierung mit dem ersten Modul wird in der Fokusebene des ersten Moduls eine Intensitätsverteilung mit der Form des Buchstabens „F“ erzeugt. Jeder Punkt in der Intensitätsverteilung wird durch ein einzelnes Teilstrahlbündel geformt.

Beispiel 2: Diskontinuierliche Intensitätsverteilung

[0122] Ein Beispiel für eine diskontinuierliche Intensitätsverteilung ist ein Strahlteiler (z. B. eine Aufteilung in ein Raster aus 4 mal 4 Teilstrahlbündeln), der das Laserstrahlbündel in eine endliche Anzahl von Teilstrahlbündeln aufteilt. In der Fokusebene des ersten Moduls entstehen durch die Fokussierung in einem Bild der paraxialen Optik somit örtlich separierte Fokuspunkte. In einem Bild der beugungsbegrenzten Optik entstehen in der Fokusebene Fokusbereiche.

Beispiel 3: Kombination zwischen diskontinuierlich und kontinuierlich

[0123] Eine Kombination aus kontinuierlicher Intensitätsverteilung und diskontinuierlicher Intensitätsverteilung durch die Divergenzeinheit kann auch erfolgen. Als Beispiel dafür kann die Bildung eines Raster aus 4 mal 4 Bereichen genannt werden, die jeweils ein „F“ bilden.

[0124] Die Divergenzeinheit **3** kann beispielsweise ein Strahlteiler **3** sein. Der versetzte Laserstrahlbündel **29** trifft nach der Rotationseinheit **28** auf einen oder mehrere dieser Divergenzeinheiten, die er durchläuft oder an denen er reflektiert wird. Optional können der oder die Divergenzeinheiten **3** drehbar gelagert sein, vorzugsweise in drei Dimensionen. Die Divergenzeinheit kann beispielsweise ein diffraktives optisches Element mit einem Muster von Mikrostrukturen sein.

[0125] Die Divergenzeinheit **3** teilt das Laserstrahlbündel **29** in ein Gesamtstrahlenbündel **4** aus Teilstrahlbündeln. Die Verteilung dieser Teilstrahlenbündel wird durch den Aufbau der Divergenzeinheit **3** bestimmt. Alternativ kann die Divergenzeinheit auch eine beliebige Intensitätsverteilung erzeugen.

[0126] Im einfachsten Fall kann der Strahlteiler das Strahlbündel nach der Gittergleichung

$$\sin(\theta_n) = n \cdot \frac{\lambda}{g}$$

teilen, wobei n die ganzzahlige Ordnung des Gitters, λ die Wellenlänge des Laserstrahlbündels, g die Gitterkonstante und θ_n den Winkel des Teilstrahlbündels zur optischen Achse beschreiben.

[0127] Je nach Aufbau des Strahlteilers sind zweidimensionale Raster der Intensitätsverteilung oder komplexe Intensitätsverteilungen herstellbar.

[0128] Bevorzugterweise ist der Strahlteiler ein diffraktives optisches Element (DOE), das eine zweidimensionale Strahlverteilung nach den zwei Gittergleichungen

$$\sin(\theta_{xn}) = n \cdot \frac{\lambda}{g_x}$$

und

$$\sin(\theta_{ym}) = m \cdot \frac{\lambda}{g_y}$$

mit n und m ganzzahlig und

$$|n| \leq N, |m| \leq M$$

erzeugt. Die Laserleistung wird vorzugsweise auf die Teilstrahlbündel nahezu homogen verteilt, so dass

$$P_n = P_0 / (4NM) \eta + \delta P_n$$

gilt, wobei P_n die Leistung des Teilstrahlbündels n , η die Effizienz des Strahlteilers P_0 die Leistung des eingehenden Laserstrahlbündels **29**, N und M die höchsten Ordnungen des Strahlteilers und δP_n individuelle Schwankungen der Leistung der Teilstrahlbündel aufgrund von produktionsbedingten Inhomogenitäten des Strahlteilers beschreibt. Die Differenz der Leistung P_{\max} des Teilstrahlbündels mit der höchsten Leistung und der Leistung P_{\min} des Teilstrahlbündels mit der niedrigsten Leistung,

$$U = P_{\max} - P_{\min} = \delta P_{\max} - \delta P_{\min}$$

ist maßgeblich für die Qualität des Strahlteilers.

[0129] Die sogenannte Uniformität, definiert als

$$2 P_{\max} - \frac{P_{\min}}{P_{\min} + P_{\max}}$$

gibt die maximale relative Abweichung der Laserleistung der Teilstrahlbündel an.

[0130] Neben den gewünschten Teilstrahlbündeln können bei einem Strahlteiler **3** auch unerwünschte höhere Beugungsordnungen auftreten. Diese können ebenfalls Teil des Gesamtstrahlenbündels **4** sein.

[0131] Das Gesamtstrahlenbündel **4** aus kollimierten Teilstrahlbündeln oder die durch den Strahlteiler eingestellte Intensitätsverteilung führt durch die Rotation des Laserstrahlbündels **29** ebenfalls eine Rotationsbewegung aus, wie dies in Teilfigur B gezeigt ist, das eine Ebene senkrecht zur optischen Achse abbildet. Diese Rotationsbewegung kann in diesem Beispiel im Weiteren optischen Strahlverlauf übertragen.

[0132] Die in **Fig. 1** gezeigte Bearbeitungsvorrichtung weist in Strahlrichtung hinter der Divergenzeinheit **3** ein erstes Modul **5**, das als Relaismodul **5** bezeichnet werden kann, auf, mit dem die Mehrzahl an Teilstrahlbündel **4** zueinander in ein zur Strahlrichtung parallel verlaufendes Gesamtstrahlenbündel parallelisierbar ist. Es wird hierbei als Gesamtstrahlenbündel die Gesamtheit der das Modul **5** verlassenden Teilstrahlbündel bezeichnet. Die Strahlrichtungen dieser Teilstrahlbündel liegen hinter dem ersten Modul **5** parallel zueinander.

[0133] Das Relaismodul **5** kann außerdem eine Fokussierung der Teilstrahlbündel bewirken, so dass jedes Teilstrahlbündel in einer Ebene **10** fokussiert wird, wobei die Ebene **10** vorzugsweise für alle Teilstrahlbündel die gleiche ist und senkrecht zur optischen Achse steht.

[0134] Die in **Fig. 1** gezeigte Bearbeitungsvorrichtung weist in Strahlrichtung hinter dem ersten Modul **5** einen Strahlumlenker **6** auf, der hier ein einfacher Spiegel sein kann. Der Strahlumlenker **6** ist mit seiner Flächennormalen in einem Winkel von 45° zur optischen Achse angeordnet und bewirkt daher eine Ablenkung der Teilstrahlbündel um einen Winkel von 90° . Es soll hier stets angenommen werden, dass durch einen solchen Strahlumlenker auch die optische Achse und die Strahlrichtung um den entsprechenden Winkel abgelenkt wird, so dass die optische Achse im gezeigten Beispiel hinter dem Strahlumlenker **6** in einem Winkel von 90° zur optischen Achse vor dem Strahlumlenker **6** steht.

[0135] Die in **Fig. 1** gezeigte Bearbeitungsvorrichtung weist in Strahlrichtung hinter dem Strahlumlenker **6** eine Selektionseinheit auf, die zum einen einen Spiegel **24** aufweist und zum anderen eine Maske **8**. Durch die Selektionseinheit ist ein Teil der Teilstrahlbündel des Gesamtstrahlenbündels entfernbare. Im gezeigten Beispiel ist der Spiegel **24** so orientiert, dass er einen Teil der entlang der Strahlrichtung einfallenden Teilstrahlbündel in einen Absorber **24*** reflektiert. Der Spiegel **24** ist hier beweglich ausgestaltet und dadurch in den Strahlengang einiger Teilstrahlbündel einfahrbar.

[0136] Die restlichen Teilstrahlbündel **7*** des Gesamtstrahlenbündels treffen dann auf die Maske **8**, die aus dem verbleibenden Gesamtstrahlenbündel **7*** weitere Teilstrahlbündel entfernt. Beispielsweise können mit der Maske **8** nullte und höhere Beugungsordnungen aus dem Gesamtstrahlenbündel **7*** entfernt werden, wenn die Divergenzeinheit **3** auf einem Gitter basiert.

[0137] Beispielsweise kann die Maske **8** ein Metallblech, ein beschichtetes transparentes Substrat, bei dem eine nicht transparente Beschichtung geeignete Öffnungen aufweist, oder ein Spiegel mit einem definierten Raster aus Bohrungen sein, welche die gewünschten Hauptordnungen unbeeinflusst propagieren lassen. Die zu selektierenden nullten und höheren Ordnungen können durch die Maske **8** absorbiert werden oder in einen Absorber, beispielsweise den Strahlabsorber **24***, umgelenkt werden.

[0138] Die Selektionseinheit ist im gezeigten Beispiel in einem Bereich entlang der optischen Achse angeordnet, in dem sich die Teilstrahlbündel des Gesamtstrahlenbündels nicht überlappen. Dies kann insbesondere dadurch erzielt werden, dass das erste Modul **5** die Teilstrahlbündel jeweils auf die Ebene **10** fokussiert. Da-

durch überlappen sich die Teilstrahlbündel in einem Bereich vor und hinter der Ebene **10** nicht. Entsprechend kann in diesem Bereich die Selektionseinheit mit dem Spiegel **24** und der Maske **8** angeordnet sein.

[0139] Teilfigur C in **Fig. 1** zeigt, dass auch die Drehung der einzelnen Teilstrahlbündel in die Ebene **10** übertragen wird.

[0140] In Strahlrichtung hinter der Maske **8** und der Ebene **10** ist ein weiterer Strahlumlenker **11** angeordnet, der wiederum mit seiner Flächennormalen in einem Winkel von 45° zur optischen Achse steht und damit die Teilstrahlbündel wie auch die optische Achse und die Strahlrichtung um 90° ablenkt.

[0141] In Strahlrichtung hinter dem Strahlumlenker **11** weist die in **Fig. 1** gezeigte Bearbeitungsvorrichtung ein optionales Zoomsystem **12** auf, mit welchem der Abstand zwischen den Teilstrahlbündel des Gesamtstrahlenbündels veränderbar ist. Das Zoomsystem **12** skaliert also das Gesamtstrahlenbündel **9** der durch die Maske **8** durchtretenden Teilstrahlbündel durch eine feste, diskrete oder kontinuierliche Einstellung und ermöglicht damit eine Änderung der Spotabstände, im Falle einer beliebigen Intensitätsverteilung einer Skalierung dieser Intensitätsverteilung. Das Zoomsystem kann beispielsweise auswechselbare Festbrennweiten-Objektive, bewegte Linsen mit diskreten oder kontinuierlichen Positionen oder aktive Elemente wie beispielsweise Flüssigkeitslinsen aufweisen und bevorzugt motorisiert sein.

[0142] Die Wirkung einer veränderbaren Skalierung ist in Teilfigur D der **Fig. 1** gezeigt. Es deuten hier Doppelpfeile an, dass der Abstand zwischen den rotierenden Strahlen veränderbar ist.

[0143] Es sei darauf hingewiesen, dass das Zoomsystem alternativ an einer beliebigen Position zwischen der Divergenzeinheit **3** und der Fokussiereinheit **20** positioniert sein kann oder auch integraler Bestandteil einer der Vorrichtungen und Linsengruppen in diesem Bereich sein kann.

[0144] Die Bearbeitungsvorrichtung der **Fig. 1** weist in Strahlrichtung hinter dem Zoomsystem **12** ein weiteres Modul **14** auf, das als zweites Relaismodul **14** bezeichnet werden kann. Mit diesem zweiten Modul sind die Teilstrahlbündel **9**, die aus dem Zoomsystem **12** mit parallelen Richtungen austreten, konvergierbar, so dass sie in einer Strahlebene **25** einen minimalen Abstand zueinander haben. Werden die Teilstrahlbündel jeweils durch das erste Modul **5** auf die Ebene **10** fokussiert, so können sie jeweils divergent auf das zweite Relaismodul **14** treffen. Dies ist dann vorteilhaft, wenn das Modul **14** die Teilstrahlbündel jeweils kollimiert.

[0145] Das zweite Modul **14** kann in seiner Orientierung bezüglich der optischen Achse genau umgekehrt zum ersten Modul **5** angeordnet sein, so dass beide zusammen den Strahlteiler **3** in die Strahlebene **25** abbilden.

[0146] In der Strahlebene **25** können sich die Strahlachsen der Teilstrahlbündel des aus dem zweiten Modul **14** austretenden Gesamtstrahlenbündels **15** kreuzen.

[0147] Die Bearbeitungsvorrichtung der **Fig. 1** weist außerdem eine in Strahlrichtung hinter dem zweiten Modul angeordnete Umlenkeinheit auf, die hier die Strahlumlenker **16** und **18** aufweist. Vorzugsweise ist die Umlenkeinheit so angeordnet, dass der effektive Punkt, um den die Strahlen abgelenkt werden, in der Strahlebene **25** liegt. Die Strahlumlenker **16** und **18** erlauben eine einstellbare Ablenkung des Laserstrahls mit hoher Dynamik in der Bearbeitungsebene des Werkstücks **23**. Die Strahlumlenker sind hier senkrecht zueinander angeordnet, so dass sie eine Strahlumlenkung in zwei Raumrichtungen ermöglichen. Bevorzugterweise kann der Strahlablenker hier ein Galvanometerscanner sein. Alternativ können andere dynamische Strahlablenker wie Polygonscanner, Resonanzscanner, Piezoscaner, MEM-Spiegel, akusto- oder elektrooptische Deflektoren eingesetzt werden.

[0148] Die in **Fig. 1** gezeigte Bearbeitungsvorrichtung weist in Strahlrichtung hinter der Strahlumlenkeinheit eine Fokussiereinheit **20** auf, mit der die verbleibenden Teilstrahlbündel **19** des Gesamtstrahlenbündels zu einander parallelisierbar sind. Sofern das zweite Modul **14** die Teilstrahlbündel jeweils kollimiert, kann die Fokussiereinheit **20** die Teilstrahlbündel außerdem jeweils in die zu bearbeitende Ebene **23** fokussieren, so dass die Fokussiereinheit eine Fokussieroptik **20** ist. Die Fokussieroptik kann beispielsweise eine F-Theta korrigierte Linse mit telezentrischen Eigenschaften sein. Zusammen mit den Strahlumlenkern **16** und **18** lassen sich dann die entstehenden Foki auf beliebigen zweidimensionalen Bahnen auf dem Werkstück **23** ablenken. Der durch die Rotationseinheit **28** bedingte rotierende Strahlversatz führt in der Strahlebene **25** zu einer Bewegung der Teilstrahlbündel auf einer Kreisbahn mit dem Radius r' . Der Strahlversatz führt zu einer Anstellung des Laserstrahls relativ zur optischen Achse der Fokussieroptik, so dass das Laserstrahlbündel in einem Winkel β relativ zur optischen Achse auf das Werkstück trifft, wie dies in Teilfigur F der **Fig. 1** gezeigt ist.

[0149] Das fokussierte und eingestellte Gesamtstrahlenbündel **21** bildet auf dem Werkstück **23** eine durch den Strahlteiler und die restliche Bearbeitungsoptik bestimmte Intensitätsverteilung. Im beispielhaften Falle des zweidimensionalen Gitters kann in der Bearbeitungsebene **23** ein Raster aus Foki in Form von Gitterpunkten mit äquidistanten Gitterpunktabständen in der jeweiligen Raumrichtung entstehen. Die Skalierung des Gesamtstrahlenbündels **13** durch die Zoomeinheit **12** erlaubt eine Änderung der Gitterpunktabstände in der Bearbeitungsebene **23** mit hoher Genauigkeit.

[0150] Optional ist zwischen der Fokussiereinheit **20** und dem Werkstück **23** eine Prozessgasdüse eingebracht, die einen Gasstrahl auf die Bearbeitungspunkte lenkt und zu einer gezielten Abführung von flüssigem oder gasförmigem Material führen kann. Die Prozessgasdüse kann dabei so ausgeführt sein, dass sie mehrere Teildüsen aufweist, die jeweils den Arbeitsbereich eines Teilstrahls abdecken.

[0151] Zusammenfassend kann also das Beispiel der **Fig. 1** wie folgt realisiert sein.

[0152] Ein kollimiertes Laserstrahlbündel **2** wird aus dem Lasersystem **1** emittiert und trifft im Anschluss auf eine Rotationseinheit **28**, die einen Strahlversatz r induziert so dass das Laserstrahlbündel eine Kreisbahn um die optische Systemachse beschreibt (vgl. **Fig. 1 – Bild A**). Im Anschluss durchläuft das kollimierte Laserstrahlbündel ein diffraktiv optisches Element (DOE). Der Strahlteiler teilt das Laserstrahlbündel **29** in ein Bündel **4** aus beispielsweise $n \times n$ (z. B. $n = 14$) jeweils kollimierten Teilstrahlbündeln. Die Drehung des diffraktiv optischen Elements relativ zur optischen Achse ist dabei vorzugsweise so eingestellt, dass die Kanten des Rechteckes, welches die Strahlverteilung des DOE umfasst jeweils parallel zu einer der Scannerachsen der Strahlumlenkeinheiten **16** oder **18** ausgerichtet sind. Das Bündel **4** trifft auf ein Relaymodul **5**, das den Strahl auf der Ebene **10** fokussiert. Nach der Umlenkung des Strahls durch einen Strahlumlenker **6** durchläuft das fokussierte Gesamtstrahlenbündel **7** einen Bereich, in dem die Teilstrahlbündel räumlich separiert sind. Das Strahlselektionsmodul weist dabei vorzugsweise zwei verfahrbaren Achsen und einem rechteckigen Spiegel der durch Bewegung der Achsen Teilbereiche des Gesamtstrahlenbündels **7** in den Strahlabsorber **24*** umlenkt. Das Strahlbündel **7*** trifft hinter dem Strahlselektionsmodul **24** auf eine Maske **8**. Die Maske **8** selektiert aus dem Gesamtstrahlenbündel **7*** weitere Teilstrahlbündel und filtert somit beispielsweise für den Prozess unerwünschte höhere Ordnungen. Hinter der Maske **8** tritt das bereinigte Gesamtstrahlenbündel **9** aus, dessen Teilstrahlbündel durch die Fokussierung im Relaymodul **5** in der Strahlebene **10** fokussiert werden. Nach der Umlenkung durch den Strahlumlenker **11** wird das Strahlbündel **9** in das Zoomsystem **12** eingekoppelt. Das Zoomsystem **12** skaliert das Gesamtstrahlenbündel **9** mit dem Ziel die Abstände der einzelnen Teilstrahlbündel auf dem Werkstück **23** räumlich zu manipulieren. Nach der Skalierung durch das Zoom-Linsensystem **12** tritt das Gesamtstrahlenbündel **13** in das zweite Relaymodul **14** ein, sodass eine skalierte Abbildung des Strahlteilers **3** in der effektiven Drehachse **25** des dynamischen Strahlumlenkers bestehend aus den Elementen **16** und **18** erfolgt. Das durch die Strahlumlenker **16** und **18** umgelenkte Gesamtstrahlenbündel **19** wird durch die Fokussieroptik **20** auf das Werkstück **23** fokussiert. Das fokussierte Gesamtstrahlenbündel **21** bildet auf dem Werkstück **23** eine durch den Strahlteiler und die restliche Bearbeitungsoptik determinierte Intensitätsverteilung. Die Rotation des kompletten Teilstrahlbündels auf dem Werkstück **23** (x, y Ebene) wird dabei über die Rotation des Strahlteilers **3** um die Achse der Strahlausbreitungsrichtung (optische Achse) manipuliert. Die Anstellung des Laserstrahls relativ zur optischen Achse der Fokussiereinheit erfolgt durch den Strahlversatz r der Rotationseinheit **28**. Vorzugsweise werden die dynamischen Strahlumlenker **16** und **18** so bewegt, dass eine Kreisbahn mit fester Rotationsfrequenz auf dem Werkstück **23** abgefahren wird (vgl. **Fig. 1 – Bild E**). Diese Kreisbahn wird dabei von jedem Teilstrahl durchgeführt. Die Rotationseinheit **28** wird dabei vorzugsweise synchron mit den Strahlumlenkern **16** und **18** so bewegt, dass die Rotationsfrequenz der Rotationseinheit **28** und der Kreisbahn übereinstimmen. Dies führt dazu, dass das Laserstrahlbündel mit jeder Tangente der Kreisbahn einen konstanten Anstellwinkel bildet.

[0153] **Fig. 2** zeigt eine weitere beispielhafte Ausführung einer erfindungsgemäßen Bearbeitungsvorrichtung zur Laserbearbeitung einer Oberfläche **23**.

[0154] Die gezeigten Bestandteile stimmen mit jenen in **Fig. 1** gezeigten und beschriebenen überein. In **Fig. 2** ist das Zoomsystem **12** beispielhaft mittels 4 rotationssymmetrischen Linsen realisiert, die entlang der optischen Achse gegeneinander verschiebbar sind.

[0155] Ein kollimiertes Laserstrahlbündel **2** wird aus dem Lasersystem **1** emittiert und trifft im Anschluss auf eine Rotationseinheit **28**, die einen Strahlversatz r induziert sodass das Laserstrahlbündel eine Kreisbahn um die optische Systemachse beschreibt. Im Anschluss durchläuft das kollimierte Laserstrahlbündel einen Strahlteiler **3**. Der Strahlteiler teilt das Laserstrahlbündel **29** in ein Bündel **4** aus jeweils kollimierten Teilstrahlbündeln. Das Bündel **4** trifft auf ein Relaymodul **5**, das den Strahl auf der Ebene **10** fokussiert. Nach der Umlen-

kung des Strahlbündels durch einen Strahlumlenker **6** durchläuft das fokussierte Gesamtstrahlenbündel **7** einen Bereich in dem die Teilstrahlbündel räumlich separiert sind. Dabei werden mittels dynamisch positionierbarem Strahlselektionsmodul **24** ausgewählte Strahlen gefiltert und auf einen Strahlabsorber **24*** umgelenkt. Das Strahlbündel **7*** trifft hinter dem Strahlselektionsmodul **24** auf eine Maske **8**. Die Maske **8** selektiert aus dem Gesamtstrahlenbündel **7*** weitere Teilstrahlbündel und filtert somit beispielsweise für den Prozess unerwünschte höhere Ordnungen. Hinter der Maske **8** tritt das bereinigte Gesamtstrahlenbündel **9** aus, dessen Teilstrahlbündel durch die Fokussierung im Relaymodul **5** in der Strahlebene **10** fokussiert werden. Nach der Umlenkung durch den Strahlumlenker **11** wird das Strahlbündel **9** in ein 4-Linsen-Zoomsystem **12** eingekoppelt. Das Zoomsystem **12** beeinflusst die räumliche Winkelverteilung der Einzelstrahlen und skaliert damit das Gesamtstrahlenbündel **9** zu Gesamtstrahlenbündel **13** mit dem Ziel die Abstände der einzelnen Teilstrahlbündel auf dem Werkstück **23** räumlich zu manipulieren. Dabei werden im Zoom **12** definierte Linsen dynamisch auf modellbasiert vordefinierte Positionen bewegt, um die notwendige Vergrößerung zu erzielen. Nach der Skalierung durch das Zoom-Linsensystem **12** tritt das skalierte Gesamtstrahlenbündel **13** in das zweite Relaymodul **14** ein, sodass eine skalierte Abbildung des Strahlteilers **3** in der effektiven Drehachse **25** des dynamischen Strahlumlenkers bestehend aus den Elementen **16** und **18** erfolgt. Das durch die Strahlumlenker **16** und **18** umgelenkte Gesamtstrahlenbündel **19** wird durch die Fokussieroptik **20** auf das Werkstück **23** fokussiert. Das fokussierte Gesamtstrahlenbündel **21** bildet auf dem Werkstück **23** eine durch den Strahlteiler und die restliche Bearbeitungsoptik determinierte Intensitätsverteilung

[0156] Fig. 3 zeigt eine weitere beispielhafte Ausgestaltung einer erfindungsgemäßen Bearbeitungsvorrichtung. Wiederum entsprechen die gezeigten Elemente jenen in Fig. 1 gezeigten, so dass die dort gemachten Ausführungen auch hier übertragbar sind. Es ist in Fig. 3 jedoch das Zoomsystem mittels zweier anamorphotischer Prismenpaare **26** und **27**, also mit Keilplattenpaaren **26** und **27**, realisiert.

[0157] Ein kollimiertes Laserstrahlbündel **2** wird aus dem Lasersystem **1** emittiert und trifft im Anschluss auf eine Rotationseinheit **28**, die einen Strahlversatz r induziert sodass das Laserstrahlbündel eine Kreisbahn beschreibt. Im Anschluss durchläuft das kollimierte Laserstrahlbündel einen Strahlteiler **3**. Der Strahlteiler teilt das Laserstrahlbündel **29** in ein Bündel **4** aus jeweils kollimierten Teilstrahlbündeln. Das Bündel **4** trifft auf ein anamorphotisches Prismenpaar **26**, welches als Zoom-System dient. Über eine relative Rotation der Prismen **26** zueinander kann die Winkelverteilung in einer Achse manipuliert und damit eine Änderung der Strahlseparation auf dem Werkstück **23** in der betroffenen Achse erreicht werden. Das manipulierte Bündel trifft auf das Relaymodul **5**, das den Strahl auf der Ebene **10** fokussiert. Nach der Umlenkung des Strahlbündels durch einen Strahlumlenker **6** durchläuft das fokussierte Gesamtstrahlenbündel **7** einen Bereich in dem die Teilstrahlbündel räumlich separiert sind. Dabei werden mittels dynamisch positionierbarem Strahlselektionsmodul **24** ausgewählte Strahlbündel gefiltert und auf einen Strahlabsorber **24*** umgelenkt. Das Strahlbündel **7*** trifft hinter dem Strahlselektionsmodul **24** auf eine Maske **8**. Die Maske **8** selektiert aus dem Gesamtstrahlenbündel **7*** weitere Teilstrahlbündel und filtert somit beispielsweise für den Prozess unerwünschte höhere Ordnungen. Hinter der Maske **8** tritt das bereinigte Gesamtstrahlenbündel **9** aus, dessen Teilstrahlbündel durch die Fokussierung im Relaymodul **5** in der Strahlebene **10** fokussiert werden. Nach der Umlenkung durch den Strahlumlenker **11** wird das Strahlbündel **9** in ein zweites anamorphotisches Prismenpaar **27** eingekoppelt, welches senkrecht zum ersten Prismenpaar **26** angeordnet ist und damit die zweite räumliche Achse der Strahlabstände auf dem Werkstück **23** manipuliert. Nach der Skalierung durch das Prismen-Zoom-System **27** tritt das Gesamtstrahlenbündel **13** in das zweite Relaymodul **14** ein, so dass eine skalierte Abbildung des Strahlteilers **3** in der effektiven Drehachse **25** des dynamischen Strahlumlenkers bestehend aus den Elementen **16** und **18** erfolgt. Das durch die Strahlumlenker **16** und **18** umgelenkte Gesamtstrahlenbündel **19** wird durch die Fokussieroptik **20** auf das Werkstück **23** fokussiert. Das fokussierte Gesamtstrahlenbündel **21** bildet auf dem Werkstück **23** eine durch den Strahlteiler und die restliche Bearbeitungsoptik determinierte Intensitätsverteilung. Die Rotation der Teilstrahlbündel in der Bearbeitungsebene auf dem Werkstück **23** wird dabei über die Rotation des Strahlteilers **3** orthogonal zur Strahlausbreitungsrichtung manipuliert.

[0158] Fig. 4 zeigt ein weiteres Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Bearbeitungsvorrichtung. Die gezeigten Elemente entsprechen im Wesentlichen jenen in Fig. 1 gezeigten. Die Beschreibung zu Fig. 1 kann daher auf Fig. 4 übertragen werden. In Fig. 4 ist die Rotationseinheit **28** als gekippte Planparallelplatte ausgestaltet und die Zoomvorrichtung **12** mittels vier entlang der optischen Achse gegeneinander verschiebbaren Linsen. Durch Brechung an der angestellten Planparallelplatte wird gemäß dem Brechungsgesetz ein Strahlversatz induziert. Das Strahlbündel **29** verlässt die Platte parallel und kollimiert zur optischen Achse. Die Rotation der Planparallelplatte führt dazu, dass das versetzte Strahlbündel um die optische Achse rotiert und somit eine Kreisbewegung ausführt. Alternativ kann der Anstellwinkel der Planparallelplatte relativ zur optischen Achse auch null sein. In diesem Fall wäre jedoch der Versatz Null.

[0159] Fig. 5 zeigt eine weitere beispielhafte Ausgestaltung der erfindungsgemäßen Bearbeitungsvorrichtung. Dabei entsprechen die gezeigten Elemente jenen in Fig. 1 gezeigten, so dass die Beschreibung zu Fig. 1 auf Fig. 5 übertragbar ist. In Fig. 5 ist die Divergenzeinheit 3 relativ zur optischen Achse verkippbar. Bevorzugtweise kann sie ein diffraktives optisches Element sein. Durch Verkippung der Divergenzeinheit 3 kann die Periode der Teilstrahlbündelanordnung in der Werkstückebene 23 beeinflusst werden. Dies kann beispielsweise für eine Feineinstellung der Spotperiode im Auflösungsbereich von wenigen Mikrometern bis in den Bereich einiger Nanometer genutzt werden.

[0160] Fig. 6 zeigt ein weiteres Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Bearbeitungsvorrichtung. Der Aufbau entspricht jenem in Fig. 1 gezeigten, so dass die Beschreibung zu Fig. 1 auf Fig. 6 übertragbar ist. Zusätzlich zur Fig. 1 weist jedoch der in Fig. 6 gezeigte Aufbau eine Lichtpolarisationseinheit 30 auf, die den Polarisationszustand des Laserstrahls räumlich dynamisch verändert. Im gezeigten Beispiel ist die Lichtpolarisationseinheit 30 zwischen dem Lasersystem 1 und der Rotationseinheit 28 angeordnet.

[0161] Ein linear polarisierter kollimiertes Laserstrahlbündel 2 wird aus dem Lasersystem 1 emittiert und trifft im Anschluss auf die Lichtpolarisationseinheit 30, die den Polarisationszustand des Laserstrahls räumlich, dynamisch verändert. Die Lichtpolarisationseinheit 30 kann dabei verschiedene Ausführungen haben. Im Vorzugsfall besteht sie aus einer drehbar gelagerten Halbwellenplatte die eine Drehung der Polarisationsrichtung um die optische Achse durchführen kann. Die Halbwellenplatte kann mit hoher Frequenz um die optische Achse gedreht werden, sodass eine schnelle Drehung der Polarisationsrichtung des linear polarisierten Lasers ermöglicht wird. Vorzugsweise ist die Rotationsfrequenz der Halbwellenplatte dabei genau halb so groß wie die der Rotationseinheit 28. Das in der Polarisation modifizierte Laserstrahlbündel 31 verlässt die Polarisationsseinheit 30 und trifft im Anschluss auf die Rotationseinheit 28, die einen Strahlversatz r induziert sodass das Laserstrahlbündel eine Kreisbahn beschreibt. Im Anschluss durchläuft das kollimierte Laserstrahlbündel einen Strahlteiler 3. Der Strahlteiler teilt das Laserstrahlbündel 29 in ein Bündel 4 aus jeweils kollinierten Teilstrahlen. Das Bündel 4 trifft auf ein Relaymodul 5, das den Strahl auf der Ebene 10 fokussiert. Nach der Umlenkung des Strahls durch einen Strahlumlenker 6 durchläuft das fokussierte Gesamtstrahlenbündel 7 einen Bereich in dem die Teilstrahlbündel räumlich separiert sind. Dabei werden mittels dynamisch positionierbarem Strahlselektionsmodul 24 ausgewählte Strahlen gefiltert und auf einen Strahlabsorber 24* umgelenkt. Das Strahlbündel 7* trifft hinter dem Strahlselektionsmodul 24 auf eine Maske 8. Die Maske 8 selektiert aus dem Gesamtstrahlenbündel 7* weitere Teilstrahlbündel und filtert somit beispielsweise für den Prozess unerwünschte höhere Ordnungen. Hinter der Maske 8 tritt das bereinigte Gesamtstrahlenbündel 9 aus, dessen Teilstrahlbündel durch die Fokussierung im Relaymodul 5 in der Strahlebene 10 fokussiert werden. Nach der Umlenkung durch den Strahlumlenker 11 wird das Strahlbündel 9 in das Zoomsystem 12 eingekoppelt. Das Zoomsystem 12 skaliert das Gesamtstrahlenbündel 9 mit dem Ziel die Abstände der einzelnen Teilstrahlbündel auf dem Werkstück 23 räumlich zu manipulieren. Nach der Skalierung durch das Zoom-Linsensystem 12 tritt das Gesamtstrahlenbündel 13 in das zweite Relaymodul 14 ein, so dass eine skalierte Abbildung des Strahlteilers 3 in der effektiven Drehachse 25 des dynamischen Strahlumlenkers bestehend aus den Elementen 16 und 18 erfolgt. Das durch die dynamischen Strahlumlenker 16 und 18 umgelenkte Gesamtstrahlenbündel 19 wird durch die Fokussieroptik 20 auf das Werkstück 23 fokussiert. Das fokussierte Gesamtstrahlenbündel 21 bildet auf dem Werkstück 23 eine durch den Strahlteiler und die restliche Bearbeitungsoptik determinierte Intensitätsverteilung. Die Rotation der Teilstrahlbündel auf dem Werkstück 23 wird dabei über die Rotation des Strahlteilers 3 orthogonal zur Strahlausbreitungsrichtung manipuliert. Durch die vorzugsweise synchrone Bewegung von Polarisationsseinheit 30, der Rotationseinheit 28 und der dynamischen Strahlumlenker 16 und 18 wird eine definierte Ausrichtung des Polarisationsvektors zur Bewegungsrichtung und zur Anstellung des Laserstrahls erzielt.

[0162] Alternativ kann die Polarisationsseinheit auch aus einer Viertelwellenplatte zur Herstellung zirkularer Polarisierung oder eine Kombination aus Verzögerungsplatten zur Herstellung anderer Polarisationsarten ausgeführt sein. Hierzu zählen vorzugsweise die Herstellung von radialer Polarisierung, bei der die Polarisationsvektoren radial zum Zentrum der Intensitätsverteilung des Laserstrahls ausgerichtet sind oder tangentialer Polarisierung, bei der die Polarisationsvektoren tangential zum Zentrum der Intensitätsverteilung ausgerichtet sind durch Verwendung segmentierter Viertelwellen- oder Halbwellenplatten.

[0163] Fig. 7 zeigt eine beispielhafte Realisierung einer Rotationseinheit 28, mit welcher ein einfallendes Laserstrahlbündel 2 um einen Betrag r parallel versetzbare ist, wobei die gezeigte Ausführungsform erlaubt, den Abstand r variabel einzustellen. Der Aufbau weist einen ersten Spiegel 28a auf, der das einfallende Laserstrahlbündel 2 auf eine Planparallelplatte 28b reflektiert. Das Laserstrahlbündel durchläuft die Planparallelplatte 28b und wird dabei gegenüber seiner Einfallsrichtung parallel versetzt. Das austretende Laserstrahlbündel trifft auf einen zweiten Spiegel 28c, das so orientiert ist, dass das auslaufende Laserstrahlbündel 29 parallel

zum einfallenden Laserstrahlbündel **2** verläuft, jedoch um den Betrag r versetzt. Die Planparallelplatte **28b** ist rotierend ausgestaltet. Vorzugsweise rotiert dabei die Planparallelplatte **28b** um eine Achse, die durch den Auftreffpunkt des Laserstrahls auf die Planparallelplatte verläuft. Durch Verfahren der beiden Spiegel **28a** und **28c** und Anpassen des Kippwinkels kann der Auftreffwinkel α des Laserstrahls auf die Planparallelplatte **28b** eingestellt werden. Dabei stellt sich durch die Planparallelplatte ein wie in **Fig.** 1 beschrieben definierter Strahlversatz ein und damit ein Kreisbahnradius r , der durch die Änderung des Auftreffwinkels variierbar ist. Die beiden Spiegel werden dabei immer entsprechend symmetrisch so verstellt, dass der Auftreffpunkt des Laserstrahls auf die Planparallelplatte der Drehachse der Rotationseinheit entspricht und dass die Drehachse des rotierenden Strahls nach der Reflektion am zweiten Spiegel **28c** für alle Winkeleinstellungen identisch ist.

[0164] **Fig.** 8 zeigt beispielhaft einen Aufbau einer Zoomeinheit mit einer ersten Gruppe von Zylinderlinsen **12a** und einer zweiten Gruppe von Zylinderlinsen **12b**, die zwischen dem ersten Modul **5** und dem zweiten Modul **14** angeordnet sind. Die Zylinderachsen der Zylinderlinsen sind in den Linsen der zweiten Gruppe **12b** gegenüber den Linsen der ersten Gruppe **12a** um 90° um die optische Achse gedreht. Durch die Zylinderlinsen der ersten Gruppe **12a** wird der Abstand zwischen den Teilstrahlbündeln in einer ersten Richtung senkrecht zur optischen Achse skaliert und durch die Zylinderlinsen der zweiten Gruppen **12b** wird ein Abstand der Teilstrahlbündel in einer zur ersten Richtung senkrechten Richtung skaliert.

[0165] **Fig.** 9 illustriert das optische Wirkprinzip von anamorphotischen Prismen auf eine diskontinuierliche Strahlverteilung. Durch Verkippung der Prismen **91** und **92** zueinander kann eine Skalierung der Abstände der Teilstrahlbündel **93**, **93'** zueinander bewirkt werden. Die Verkippung der Zylinderlinsen **91** und **92** gegeneinander erfolgt dabei um eine Kippachse, die senkrecht zur optischen Achse liegt. Die Teilstrahlbündel **93**, **93'** werden durch das Verkippen der Prismen **91** und **92** um Winkel abgelenkt, die in einer Ebene senkrecht zur Kippachse der Prismen **91** und **92** liegen und parallel zur optischen Achse liegen. Werden die Prismen **91** und **92** um einen bestimmten Winkel zueinander gekippt, so wird das Teilstrahlbündel **93** um einen Winkel θ_1 abgelenkt, so dass es als Teilstrahlbündel **93'** verläuft. Nach Durchlaufen des ersten Moduls **5** ergibt sich in der Fokusebene **10** des ersten Moduls **5** dadurch eine Verschiebung des Teilstrahlbündels **93** um einen Abstand d_1 . **Fig.** 9 zeigt diese Verschiebung des Teilstrahlbündels **93** für drei verschiedene beispielhafte Stellungen der Prismen **91** und **92**, die zu unterschiedlichen Winkeln θ_2 und θ_3 führen und damit zu unterschiedlichen Verschiebungen in der Fokusebene **10** um Abstände d_2 und d_3 .

[0166] Im unteren Bereich der **Fig.** 9 sind die Fokuspunkte in der Fokusebene **10**. Es ist zu erkennen, dass durch die Verkippung der Prismen **91** und **92** unterschiedliche Abstände zwischen den Fokuspunkten in einer Dimension bewirkt werden.

[0167] **Fig.** 10 zeigt den Verlauf der Strahlen drei verschiedener Teilstrahlbündel durch ein Zoomsystem **12**, das mit vier rotationssymmetrischen Linsen L4, L5, L6 und L7 ausgebildet ist, in verschiedenen Konfigurationen der einzelnen Linsenpositionen. Es ist zu erkennen, dass der Abstand der Teilstrahlbündeln **7a**, **7b** und **7c** am Ausgang der vier Linsen **14**, **15**, **16** und **17** von der Positionierung dieser Linsen zueinander abhängig ist. In der oberen Teilfigur der **Fig.** 10 haben die Teilstrahlbündel **7a**, **7b** und **7c** am Ausgang den geringsten Abstand zueinander. In der untersten Teilfigur haben sie den größten Abstand zueinander.

[0168] In **Fig.** 10 sind die Teilstrahlbündel **7a**, **7b** und **7c** als Bündel einer Vielzahl von Strahlen dargestellt. Einer dieser Strahlen kann als Hauptstrahl angesehen werden. Das Zoomsystem skaliert dann die Abstände der Hauptstrahlen zueinander.

[0169] **Fig.** 11 zeigt vereinfacht den Strahlverlauf drei verschiedener Teilstrahlbündel von der Divergenzeinheit **3** über das erste Modul **5** bis hinter das zweite Modul **14** in einem Aufbau ohne Zoomsystem.

[0170] Die Divergenzeinheit **3** fächer ein nicht eingezeichnetes Laserstrahlbündel im gezeigten Beispiel in drei Teilstrahlbündel **7a**, **7b** und **7c** auf. Jedes Teilstrahlbündel weist eine Vielzahl von Strahlen auf, von denen in **Fig.** 11 jeweils ein Hauptstrahl **71a**, **71b** und **71c** sowie zwei weitere Strahlen exemplarisch gezeigt sind.

[0171] In **Fig.** 11 verlassen die Teilstrahlbündel **7a**, **7b** und **7c** die Divergenzeinheit **3** kollimiert, so dass alle Strahlen der Teilstrahlbündel jeweils parallel zum entsprechenden Hauptstrahl **71a**, **71b** bzw. **71c** verlaufen. Im Teilstrahlbündel **7a** verlaufen also die Strahlen parallel zum Hauptstrahl **71a**, während sie im Teilstrahlbündel **7b** parallel zum Hauptstrahl **71b** verlaufen.

[0172] Das erste Modul **5** verkleinert im gezeigten Beispiel die Winkel der Hauptstrahlen **71a**, **71b**, und **71c** zueinander. In **Fig.** 11 führt dies zu einer Parallelisierung der Hauptstrahlen **71a**, **71b** und **71c**. Gleichzeitig

fokussiert das erste Modul **5** die Teilstrahlbündel **7a**, **7b** und **7c** jeweils. Nach Durchlaufen einer Fokusebene **10** laufen die Teilstrahlbündel jeweils wieder auseinander und treffen divergent auf das zweite Modul **14**. Dieses kollimiert im gezeigten Beispiel die Teilstrahlbündel jeweils, so dass jedes Teilstrahlbündel kollimiert verläuft. Gleichzeitig lenkt das zweite Modul **14** die Teilstrahlbündel so ab, dass die Hauptstrahlen **71a**, **71b** und **71c** der Teilstrahlbündel aufeinander zulaufen und sich am rechten Ende des in **Fig. 11** gezeigten Aufbaus schneiden.

[0173] Die anderen Elemente des erfindungsgemäßen Aufbaus wurden hier der Übersichtlichkeit halber weggelassen.

[0174] **Fig. 12** zeigt einen Aufbau, der jenem in **Fig. 11** gezeigten entspricht, jedoch zusätzlich ein Zoomsystem **12** aufweist. Es ist zu erkennen, dass das Zoomsystem **12** den Abstand der Hauptstrahlen **71a**, **71b** und **71c** zueinander verändert, im gezeigten Beispiel verkleinert. Die anderen Elemente der erfindungsgemäßen Vorrichtung wurden in **Fig. 12** der Übersichtlichkeit halber weggelassen.

[0175] **Fig. 13** zeigt eine Illustration der vorzugsweisen Positionierung der Ablenkeinheit **16** und **18** in einer vorzugsweisen Konfiguration mit einem Galvanometer-Scanner mit zwei dynamisch bewegbaren Spiegeln **16** und **18** im Bereich hinter dem zweiten Modul **14**. Vorzugsweise sind die Spiegel **16** und **18** der Ablenkeinheit so positioniert, dass sich jener Punkt, in dem sich die Hauptstrahlen aufgrund der Ablenkung durch das zweite Modul **14** schneiden, gerade in der Mitte zwischen den Spiegeln **16** und **18** befindet.

[0176] Wie bereits vorstehend beschrieben, durchlaufen die Teilstrahlbündel **7a**, **7b** und **7c** nach Ablenkung durch die Spiegel **16** und **18** die Fokuseinheit **20**, die hier eine F-θ-Linse ist. Die Fokuseinheit **20** fokussiert die Teilstrahlbündel jeweils auf die zu bearbeitende Oberfläche **23**.

[0177] **Fig. 14** zeigt eine Definition der Winkel zwischen den Strahlen **72a**, **72b**, **72c** und **72d** bezogen auf einen Hauptstrahl **71** sowie die Wirkung des zweiten Moduls **14** auf die Winkel der Strahlen **72a**, **72b**, **72c** und **72d** in dem Teilstrahlbündel und auf den Winkel des Hauptstrahls **71** relativ zur optischen Achse.

[0178] Das Teilstrahlbündel **7** tritt mit einem Winkel θ_{HA} seines Hauptstrahls **71** gegenüber der optischen Achse OA auf das zweite Modul **14**. Das zweite Modul **14** verändert den Winkel des Hauptstrahls zur optischen Achse in den Winkel Δ_{HB} der im gezeigten Beispiel kleiner als der Winkel θ_{HA} ist.

[0179] Der Winkel des Strahls **72a** zum Hauptstrahl **71** wird mit θ_{3a} bezeichnet, der Winkel des Strahls **72b** zum Hauptstrahl **71** mit θ_{2a} und der Winkel des Strahls **72c** zum Hauptstrahl **71** mit θ_{1a} . Das erste Modul **14** verkleinert die Winkel der Strahlen **72a**, **72b**, **72c** und **72d** zum Hauptstrahl **71** jeweils, so dass die Winkel der austretenden Strahlen θ_{1b} , θ_{2b} und θ_{3b} jeweils kleiner sind als der Winkel des eintreffenden Strahls zum eintreffenden Hauptstrahl θ_{1a} , θ_{2a} und θ_{3a} .

[0180] **Fig. 15** zeigt die in **Fig. 14** dargestellte Wirkung des zweiten Moduls auf die Strahlen und zusätzlich auf die Winkel zwischen Hauptstrahlen unterschiedlicher Teilstrahlbündel. Bezüglich der Wirkung auf die Winkel der Strahlen zum entsprechenden Hauptstrahl werde auf **Fig. 14** verwiesen.

[0181] Der Hauptstrahl des oberen Teilstrahlbündels **7a** werde als **71a** bezeichnet und der Hauptstrahl des unteren Teilstrahlbündels **7b** als **71b**.

[0182] Die Hauptstrahlen **71a** und **71b** treffen einen Winkel $\theta_{H1-H2-A}$ leicht aufeinander zulaufend auf das zweite Modul **14** ein. Durch das zweite Modul **14** werden sie aufeinander zu abgelenkt, so dass sie hinter dem zweiten Modul **14** mit einem Winkel $\theta_{H1-H2-B}$ stärker aufeinander zulaufen.

[0183] Die Winkel der einzelnen Strahlen zum jeweiligen Hauptstrahl **71a** bzw. **71b** werden durch das zweite Modul **14** verkleinert wie dies bereits in **Fig. 14** gezeigt worden war.

[0184] **Fig. 16** zeigt eine Scannstrategie zur Herstellung periodischer Muster mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung. Es werden hierbei die Zwischenräume benachbarter Teilstrahlbündel mit Strukturen aufgefüllt. Die Periode der Strukturen ist dabei ein ganzzahliger Teiler der Spotperiode, also der Periode der Teilstrahlbündel auf der Bearbeitungsoberfläche **23**.

[0185] Das Muster aus den Bearbeitungspunkten (Laserfoki) mit Abstand der Spotperiode wird dabei durch die Ablenkeinheit entlang einer Scankontur bewegt und somit eine Struktur erzeugt. Im Anschluss wird das Muster um eine erste Periode der Strukturen entlang einer ersten Achsrichtung versetzt und das Muster erneut

mit der Ablenkeinheit entlang der gleichen Scankontur bewegt. Dies wird so lange ausgeführt bis der Bereich entlang der ersten Achsrichtung mit der Länge der Spotperiode mit Strukturen gefüllt wurde. Es entsteht somit eine geschlossene Zeile an periodischen Strukturen. Im Anschluss wird das Muster entlang einer zweiten Achsrichtung, die senkrecht zur ersten Achsrichtung steht, durch die Ablenkeinheit um eine zweite Periode der Strukturen versetzt. Erneut wird das Muster mit der Ablenkeinheit entlang der Scankontur bewegt und durch das bereits beschriebene Prozedere die nächste Zeile von Strukturen erstellt. Diese Strategie wird gemäß Fig. 16 so lange durchgeführt bis ein geschlossener Bereich an periodischen Strukturen entstanden ist.

[0186] Fig. 17 zeigt einen möglichen Strahlverlauf für die Abbildung einer kontinuierlichen Intensitätsverteilung. Dabei besteht die Abbildung aus unendlich vielen Bildpunkten wobei der Abstand benachbarter Punkte ΔX unendlich klein ist. Jedem Bildpunkt kann ein Teilstrahlbündel zugeordnet werden. Somit existieren in Strahlrichtung vor der Fokussiereinheit unendlich viele Teilstrahlbündel, deren Hauptstrahlen sich in ihrer Richtung nur durch einen infinitesimalen Winkel $\Delta\theta$ unterscheiden.

[0187] Fig. 18 zeigt einen möglichen Strahlverlauf für die Abbildung einer diskontinuierlichen Intensitätsverteilung. In diesem Fall besteht die Abbildung aus einer endlichen Anzahl von Bildpunkten mit einer räumlichen Separation $d > 0$. Zu jedem der Punkte im Bildraum existiert in Strahlrichtung vor der Fokussiereinheit ein Teilstrahlbündel. Die Hauptstrahlen der Teilstrahlbündel unterscheiden sich in ihrer Richtung durch Winkel, die von Null verschieden sind.

Patentansprüche

1. Bearbeitungsvorrichtung zur Laserbearbeitung einer Oberfläche (23), aufweisend einen Laserstrahleingang, an welchem ein Laserstrahlbündel (2) in einer Strahlrichtung auf einer optischen Achse einstrahlbar ist, eine in Strahlrichtung hinter dem Laserstrahleingang angeordnete Rotationseinheit (28), durch welche das Laserstrahlbündel (2) gegenüber der optischen Achse in einer Versatzrichtung um einen Abstand parallel versetzbare ist, wobei die Versatzrichtung zeitlich die optische Achse umläuft, zumindest eine in Strahlrichtung hinter der Rotationseinheit (28) angeordnete Divergenzeinheit (3), mit welcher das Laserstrahlbündel (2) in eine Mehrzahl von Teilstrahlbündeln (4) auffächerbar ist, die in Richtung radial zur optischen Achse eine kontinuierliche oder diskontinuierliche Intensitätsverteilung bilden, wobei die Mehrzahl der Teilstrahlbündel (4) ein Gesamtstrahlenbündel (7, 9, 13, 15, 19, 21) darstellt, ein in Strahlrichtung hinter der Divergenzeinheit (3) angeordnete erstes Modul (5), mit dem die Teilstrahlbündel (4) jeweils fokussierbar sind, eine in Strahlrichtung hinter dem ersten Modul (5) angeordnete Selektionseinheit (24), mit der ein Teil der Teilstrahlbündel (4) aus dem Gesamtstrahlenbündel (7, 9, 13, 15, 19, 21) entfernbare ist, ein in Strahlrichtung hinter dem ersten Modul (5) angeordnetes zweites Modul (14), mit dem Winkel von Strahlen der Teilstrahlbündeln (4) jeweils zueinander verkleinerbar sind, eine in Strahlrichtung hinter dem zweiten Modul (14) angeordnete Umlenkeinheit (16, 18), mit der die Teilstrahlbündel zeitabhängig ablenkbar sind, und eine in Strahlrichtung hinter dem zweiten Modul (14) angeordnete Fokussiereinheit (20), mit der die verbleibenden Teilstrahlbündel (7*) des Gesamtstrahlenbündels (7, 9, 13, 15, 19, 21) jeweils fokussierbar sind.

2. Bearbeitungsvorrichtung nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei das zweite Modul (14) in Strahlrichtung hinter der Selektionseinheit (24) angeordnet ist.

3. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, weiter aufweisend ein Zoomsystem (12), das in Strahlrichtung hinter der Divergenzeinheit (3) angeordnet ist, mit welchem ein Abstand zwischen den Teilstrahlbündeln (4) des Gesamtstrahlenbündels (7, 9, 13, 15, 19, 21) und/oder zwischen Hauptstrahlen (71a, b, c) der Teilstrahlbündel (4) skalierbar ist.

4. Bearbeitungsvorrichtung nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei das Zoomsystem (12) entlang der optischen Achse zwischen der Selektionseinheit (24) und dem zweiten Modul (14) angeordnet ist.

5. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei durch die Divergenzeinheit (3) das Laserstrahlbündel (2) in eine Mehrzahl von jeweils kollimierten Teilstrahlbündeln (4) auffächerbar ist, wobei das erste Modul (5) die Teilstrahlbündel (4) jeweils in eine gemeinsame Ebene fokussiert, so dass die Teilstrahlbündel in einem Bereich in Strahlrichtung vor und hinter der gemeinsamen Ebene nicht überlappen, und wobei die Selektionseinheit (24) in dem Bereich angeordnet ist, in dem die Teilstrahlbündel (4) nicht überlappen.

6. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei mit dem ersten Modul (5) Winkel zwischen Hauptstrahlen (71a, b, c) der Mehrzahl von Teilstrahlbündeln (4) veränderbar sind.

7. Bearbeitungsvorrichtung nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei mit dem ersten Modul (5) die Hauptstrahlen der Teilstrahlbündel zueinander parallelisierbar sind.

8. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Divergenzeinheit (3) um die optische Achse und/oder eine zur optischen Achse senkrechte Achse drehbar gelagert ist.

9. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Divergenzeinheit (3) zumindest ein diffraktives optisches Element, oder zumindest einen dichroitischen Strahlteiler, oder zumindest ein refraktives optisches Element, oder zumindest ein Mikrolinsenarray, oder zumindest einen Spatial Light Modulator aufweist oder ist.

10. Bearbeitungsvorrichtung nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei das zumindest eine diffraktive optische Element zumindest ein festes oder dynamisches Beugungsgitter oder zumindest ein Hologramm ist.

11. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Selektionseinheit (24) einen Absorber (24*) aufweist, der in den Strahlengang der zu entfernenden Teilstrahlbündel einbringbar ist, oder wobei die Selektionseinheit (24) einen Spiegel aufweist, der in den Strahlengang der zu entfernenden Teilstrahlbündel einbringbar ist, und mit dem die zu entfernenden Teilstrahlbündelauf einen Absorber (24*) umlenkbar sind.

12. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 10, wobei die Selektionseinheit (24) ein statisches oder dynamisches Mikrospiegelarray mit einer Vielzahl von Mikrospiegeln aufweist oder daraus besteht, wobei jeweils einer oder mehrere der zu entfernenden Teilstrahlbündel durch einen Mikrospiegel auf einen Absorber (24*) umlenkbar sind.

13. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 10, wobei die Selektionseinheit (24) eine Maske (8) aufweist, die zu entfernende Teilstrahlbündel ausblendet und/oder absorbiert.

14. Bearbeitungsvorrichtung nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei die Maske (8) beweglich ist, so dass sie in den Strahlengang der zu entfernenden Teilstrahlbündel bewegbar ist.

15. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, mit einer weiteren Selektionseinheit (24), die in Strahlrichtung vor dem ersten Modul (5) angeordnet ist, mit der ein Teil der Teilstrahlbündel (4) ausblendbar sind.

16. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 9 und 10, wobei die Divergenzeinheit (3) ein diffraktives optisches Element ist, und mit der Selektionseinheit (24) alle Ordnungen eines durch das diffraktive optische Element erzeugten Beugungsmusters aus dem Strahlenbündel entfernbare sind, die nicht eine Hauptordnung sind oder die eine Nullte Ordnung sind.

17. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 9 und 10, wobei die Divergenzeinheit (3) ein diffraktives optisches Element ist, und mit der Selektionseinheit (24) zumindest ein Teilstrahlbündel entfernbare ist, das eine Hauptordnung eines durch das diffraktive optische Element erzeugten Beugungsmusters ist.

18. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Divergenzeinheit (3) in einer Eintrittspupille des ersten Moduls (5) angeordnet ist.

19. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das zweite Modul (14) die Hauptstrahlen (71a, b, c) der verbleibenden Teilstrahlbündel (7*) so zueinander konvergiert, dass sie in einer Ebene (25) entlang der optischen Achse zwischen dem zweiten Modul (14) und der Fokussiereinheit (20) einen minimalen Abstand zueinander annehmen und hinter dieser Ebene (25) bis zur Fokussiereinheit (20) auseinanderlaufen.

20. Bearbeitungsvorrichtung nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei mit dem zweiten Modul (14) Winkel der Strahlen der Teilstrahlbündel zueinander jeweils auf jene Winkel verkleinerbar sind, die gleich den entsprechenden Winkeln an der optischen Achse punktgespiegelt sind, welche die Strahlen der entsprechenden Teilstrahlbündel bei Eintreten in das erste Modul (5) zueinander haben.

21. Bearbeitungsvorrichtung nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei die Teilstrahlbündel jeweils kollimierbar sind.

22. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Fokussiereinheit (20) die Hauptstrahlen (71a, b, c) der verbleibenden Teilstrahlbündel (7*) zueinander parallelisiert.

23. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Fokussiereinheit (20) die Hauptstrahlen (71a, b, c) der verbleibenden Teilstrahlbündel (7*) auf die zu bearbeitende Oberfläche (23) fokussiert.

24. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, weiter aufweisend ein Lasersystem (1), mit dem ein Laserstrahlbündel (2) in der Strahlrichtung auf der optischen Achse erzeugbar ist, das am Laserstrahleingang eintritt.

25. Bearbeitungsvorrichtung nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei das Lasersystem (1) einen ungepulsten Laser, einen Mikrosekundenlaser, einen Nanosekundenlaser, einen Pikosekundenlaser, oder einen Femtosekundenlaser zur Erzeugung des Laserstrahlbündels (2) aufweist.

26. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das erste (5) und/oder das zweite Modul (14) mindestens eine Positivlinse und mindestens eine Negativlinse mit einer definierten Petzvalsumme aufweist oder daraus besteht.

27. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, weiter aufweisend eine Fokusshift-Einheit, die entlang der optischen Achse in Strahlrichtung hinter dem Laserstrahleingang und vor der Rotationseinheit (28) angeordnet ist, und mit der Winkel zwischen Strahlen des Laserstrahlbündels (2) so einstellbar sind, dass die Strahlen auf einen Punkt auf der optischen Achse hinter der Fokusshift-Einheit zulaufen oder in einer Projektion der Strahlen von einem Punkt auf der optischen Achse vor oder in der Fokusshift-Einheit wegläufen, wobei der Abstand des entsprechenden Punktes von der Fokusshift-Einheit entlang der optischen Achse veränderbar ist.

28. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 3 bis 27, wobei das Zoomsystem (12) eine Mehrzahl von mit zur optischen Achse koaxialen Linsenachsen angeordnete rotationssymmetrische Linsen aufweist, die entlang der optischen Achse gegeneinander verschiebbar sind.

29. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 3 bis 27, wobei das Zoomsystem (12) eine erste Gruppe von anamorphotischen Prismen (91) und eine zur ersten Gruppe um die optische Achse um 90° gedrehte zweite Gruppe von anamorphotischen Prismen (92) aufweist, wobei die Prismen der ersten Gruppe und (91) die Prismen der zweiten Gruppe (92) jeweils gegeneinander um Achsen drehbar sind, die senkrecht zur optischen Achse stehen und parallel liegen zu nicht parallelen Flächen des Prismas.

30. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 3 bis 27, wobei das Zoomsystem (12) eine erste Gruppe von Zylinderlinsen (12a) und eine zur ersten Gruppe um die optische Achse um 90° gedrehte zweite Gruppe von Zylinderlinsen (12b) aufweist, wobei die Zylinderlinsen der ersten Gruppe (12a) und die Zylinderlinsen der zweiten Gruppe (12b) jeweils gegeneinander entlang der optischen Achse verschiebbar sind.

31. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Rotationseinheit (28) eine ebene Planparallelplatte (28b) aufweist, die gegenüber der optischen Achse gekippt angeordnet ist, und um die optische Achse drehbar ist.

32. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 30, wobei die Rotationseinheit (28) eine Anordnung mit zumindest zwei Keilplatten aufweist oder daraus besteht, die um die optische Achse drehbar sind.

33. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 30, wobei die Rotationseinheit (28) ein Schmidt-Pechan Prisma, einen rotierenden K-Spiegel oder Dove-Prisma aufweist oder daraus besteht, das um die optische Achse drehbar ist.

34. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 30, wobei die Rotationseinheit (28) eine zwischen zwei Spiegeln (28a, c) angeordnete Planparallelplatte (28b) aufweist, wobei die Spiegel (28a, c) und die Planparallelplatte (28b) so angeordnet sind, dass ein auf einen der Spiegel entlang der optischen Achse einfallendes Laserstrahlbündel (2) durch diesen Spiegel zur Planparallelplatte (28b) reflektiert wird, die Plan-

parallelplatte (28b) durchläuft und auf den anderen Spiegel einfällt, von dem er in Richtung parallel zur optischen Achse und um einen Abstand von größer als Null zur optischen Achse beabstandet reflektiert wird, wobei die Planparallelplatte (28b) drehbar ist, und wobei die Spiegel in Richtung parallel zur optischen Achse verschiebbar sind.

35. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, weiter aufweisend eine um die optische Achse drehbare Polarisationsseinheit (30), mit der ein Polarisationszustand des Laserstrahlbündels veränderbar ist, wobei mit der Polarisationsseinheit eine Polarisationsrichtung des Laserstrahlbündels um die optische Achse drehbar ist.

36. Bearbeitungsvorrichtung nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei eine Rotationsfrequenz, mit der die Polarisationsseinheit (30) um die optische Achse drehbar ist, halb so groß ist wie eine Rotationsfrequenz, mit der die Versatzrichtung der Rotationseinheit (28) um die optische Achse umläuft.

37. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der beiden vorhergehenden Ansprüche, wobei die Polarisationseinrichtung eine Halbwellenplatte, eine Viertelwellenplatte ein Tangentialpolarisator, ein Radialpolarisator oder eine Kombination aus Verzögerungsplatten ist.

38. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Umlenkeinheit (16, 18) zumindest einen Galvanometerscanner, oder zumindest einen Polygonscanner, oder zumindest einen Resonanzscanner, oder zumindest einen Piezoscanner, oder zumindest einen MEM-Spiegel, oder zumindest einen Mikrospiegelscanner, oder zumindest einen akustooptischen Deflektor oder elektrooptischen Deflektor oder eine Kombination von um die optische Achse drehbar gelagerten Keilplatten oder Planparallelplatten aufweist.

39. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Umlenkeinheit (16, 18) so positioniert wird, dass ein effektiver Drehpunkt der Umlenkeinheit (16, 18) mit einem durch das erste (5) und das zweite Modul (14) erzeugten Bild der Divergenzeinheit (3) übereinstimmt.

40. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Fokussiereinheit (20) ein F-theta Objektiv aufweist oder ist.

41. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Umlenkeinheit (16, 18) entlang der optischen Achse vor der Fokussiereinheit (20) angeordnet ist.

42. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, weiter aufweisend zumindest eine Prozessgasdüse, mit der zumindest ein Gasstrahl auf jene Bereiche der Oberfläche (23) strahlbar ist, die durch einen oder mehrere der Teilstrahlbündel (21) bearbeitet werden.

43. Bearbeitungsvorrichtung nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei die Prozessgasdüse eine Mehrzahl von Teildüsen aufweist, die jeweils einen durch ein Teilstrahlbündel (21) bearbeiteten Bereich der Oberfläche (23) bestrahlen.

44. Verfahren zur Laserbearbeitung einer Oberfläche (23), wobei ein Laserstrahlbündel (2) in einer Strahlrichtung auf einer optischen Achse eingestrahlt wird,
das Laserstrahlbündel (2) gegenüber der optischen Achse in einer Versatzrichtung um einen Abstand parallel versetzt wird, wobei die Versatzrichtung zeitlich um die optische Achse umläuft,
das Laserstrahlbündel (2) in eine Mehrzahl von Teilstrahlbündeln (4) aufgefächert wird, die in Richtung radial zur optischen Achse eine kontinuierliche oder diskontinuierliche Intensitätsverteilung bilden,
wobei die Mehrzahl der Teilstrahlbündel (4) ein Gesamtstrahlenbündel (7, 9, 13, 15, 19, 21) darstellt,
die Teilstrahlbündel (4) jeweils fokussiert werden,
ein Teil der Teilstrahlbündel (4) aus dem Gesamtstrahlenbündel (7, 9, 13, 15, 19, 21) entfernt wird,
ein Winkel zwischen Strahlen der verbleibenden Teilstrahlbündel (7*) jeweils verkleinert wird,
die Teilstrahlbündel (4) mit jeweils verkleinerten Winkeln zwischen ihren Strahlen zeitabhängig abgelenkt werden, und
die verbleibenden Teilstrahlbündel (7*) des Gesamtstrahlenbündels (7, 9, 13, 15, 19, 21) jeweils fokussiert werden.

45. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei die Umlenkeinheit (16, 18) eine Bewegung ausführt die zu einer kreisförmigen Ablenkung des Strahlenbündels führt.

46. Verfahren nach einem der beiden vorhergehenden Ansprüche, wobei die Rotation der Rotationseinheit (28) mit der Ablenkung der Umlenkeinheit (16, 18) synchronisiert ist.

47. Verfahren nach einem der Ansprüche 44 bis 46, wobei die Teilstrahlbündel (4) eine periodische Anordnung von Fokuspunkten mit einer Periode auf der zu bearbeitenden Oberfläche (23) bilden, wobei in einem ersten Bearbeitungsschritt eine Laserbearbeitung an den Fokuspunkten durchgeführt wird und danach in einem weiteren Bearbeitungsschritt die Oberfläche (23) relativ zu den Fokuspunkten um eine Distanz in der Ebene der Oberfläche (23) in Richtung der periodischen Anordnung der Fokuspunkte verschoben wird und nach der Verschiebung eine weitere Laserbearbeitung der Oberfläche (23) durchgeführt wird, wobei die Periode ein ganzzahliges Vielfaches der Distanz ist.

48. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei das Verfahren mit einer Bearbeitungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 43 ausgeführt wird.

Es folgen 18 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

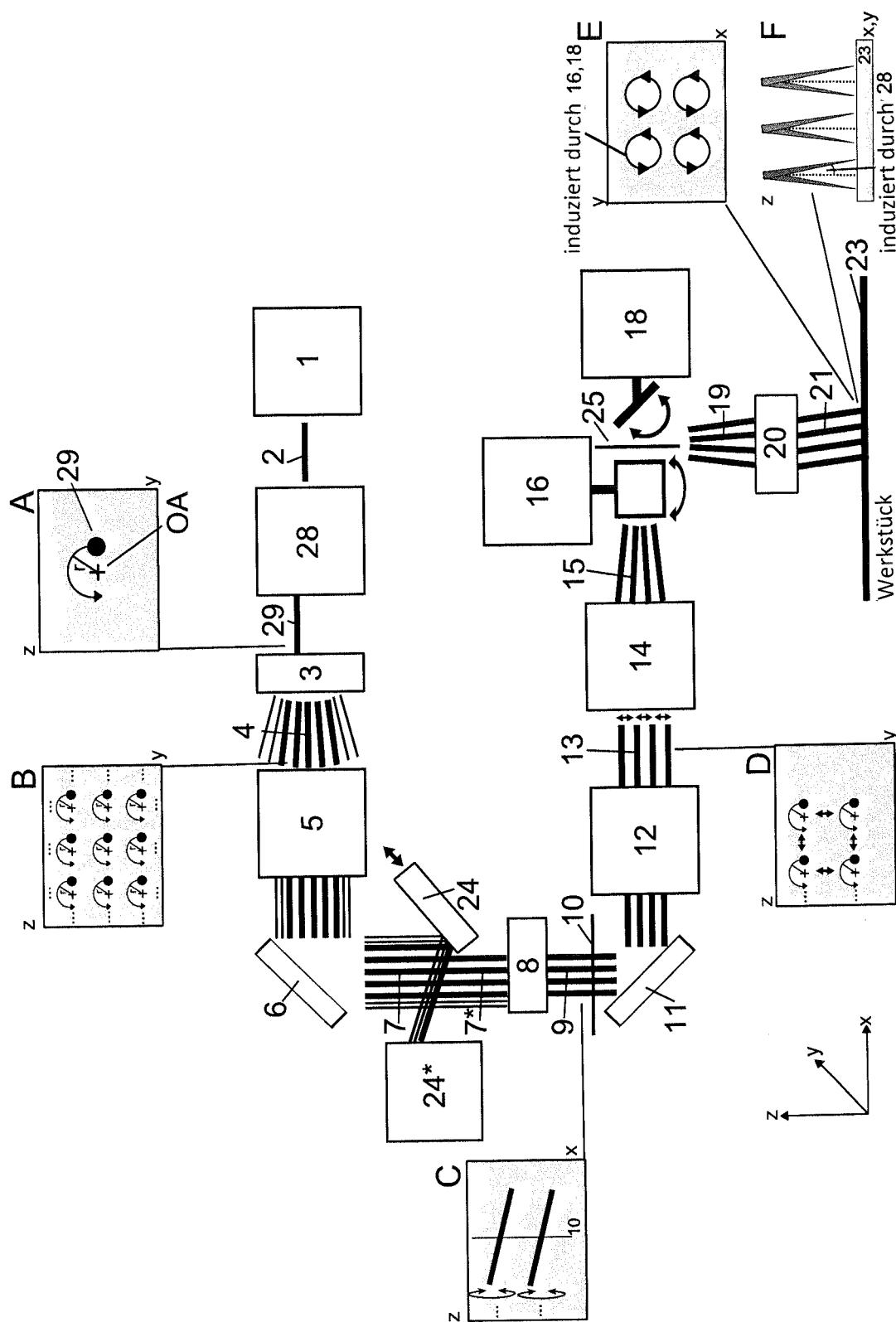
Fig. 1

Fig. 2

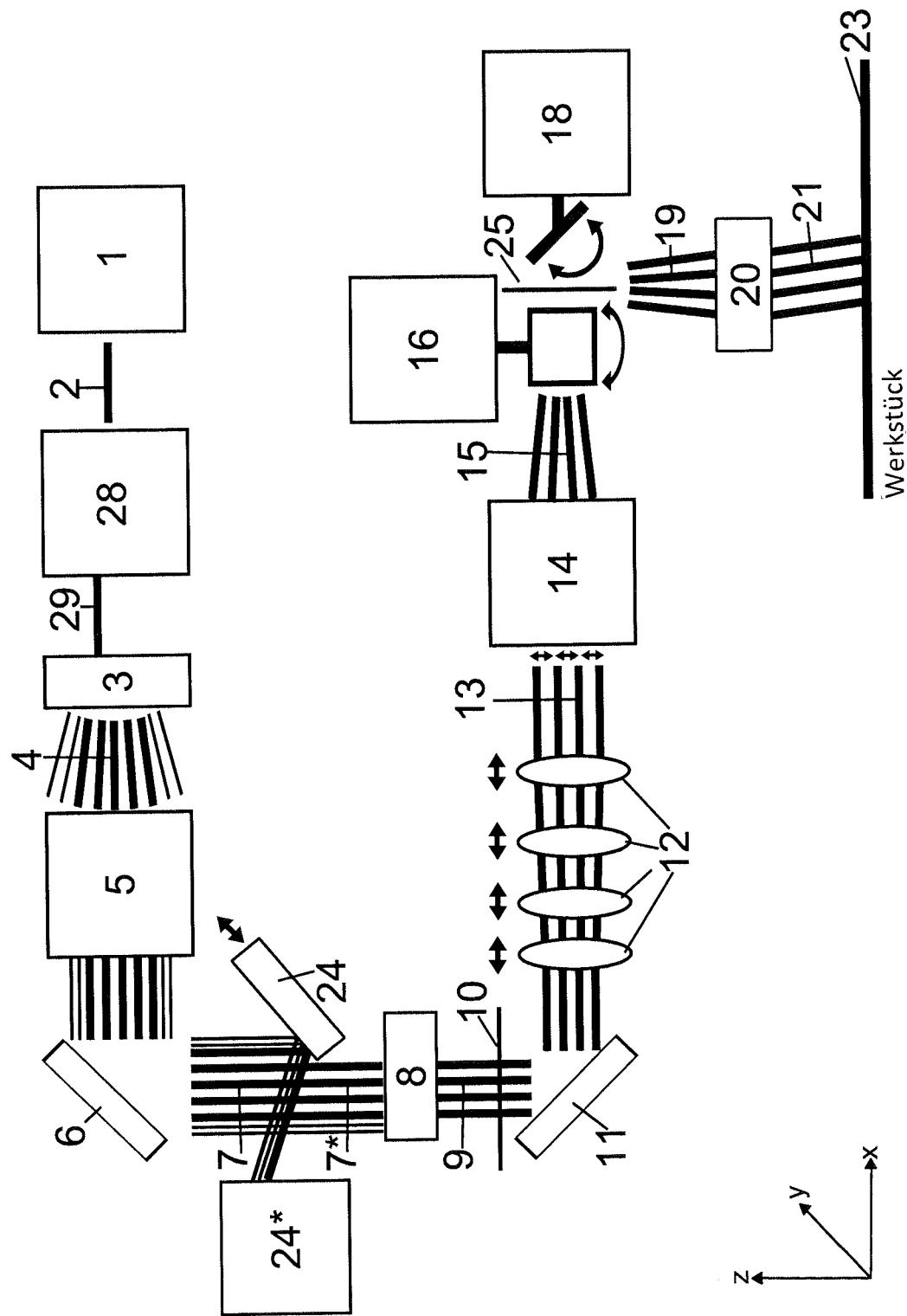


Fig. 3

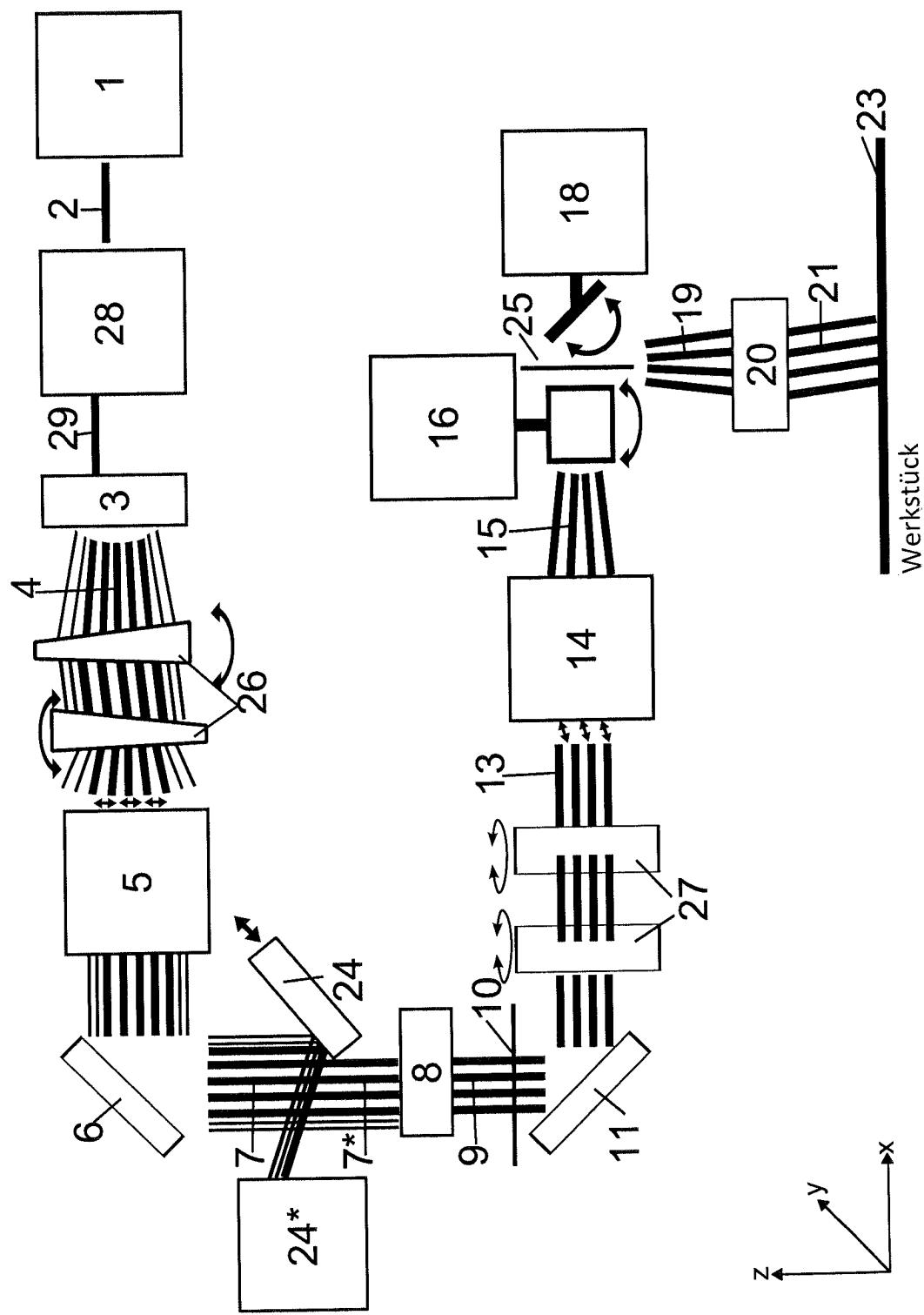


Fig. 4

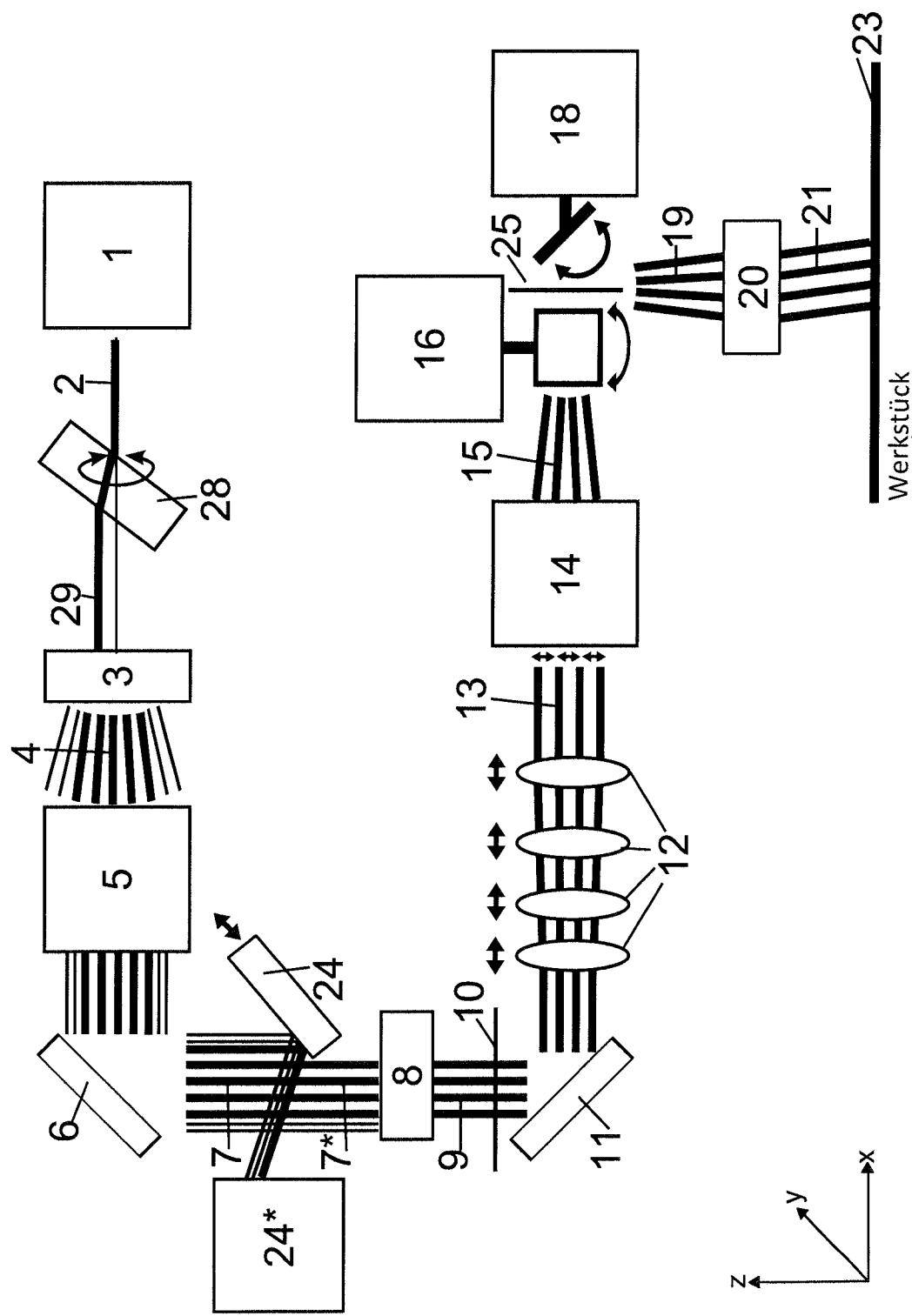


Fig. 5

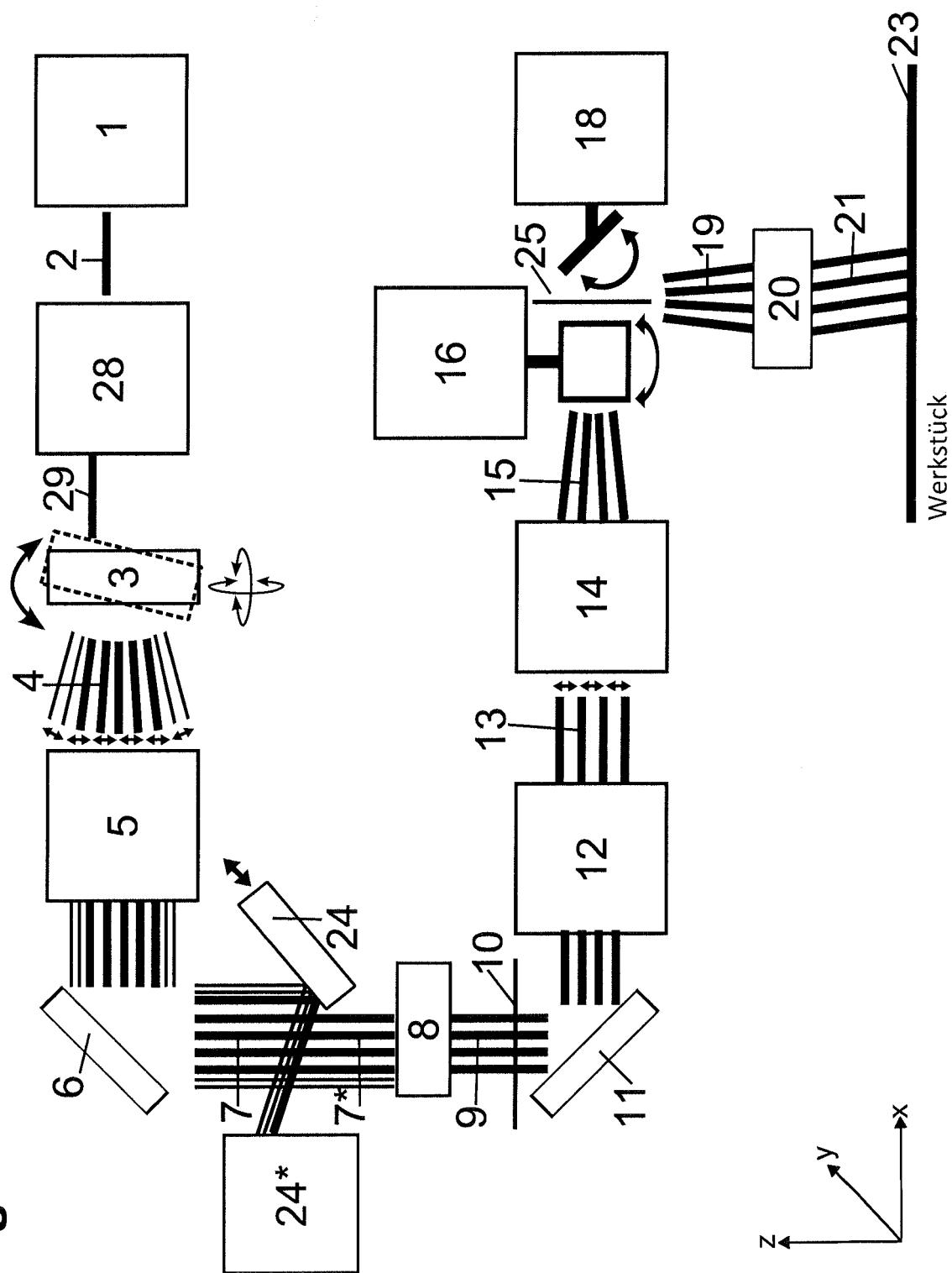
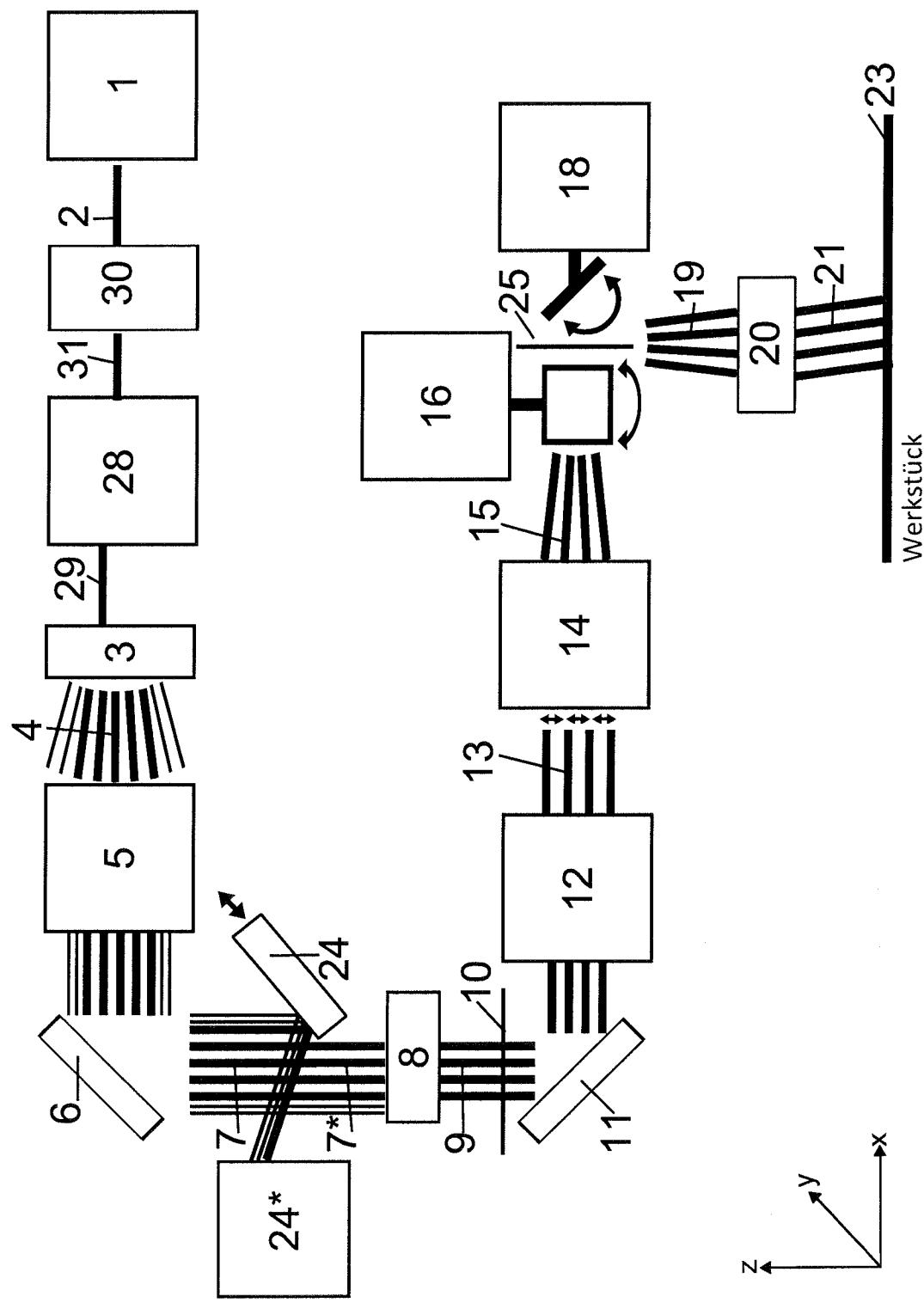


Fig. 6



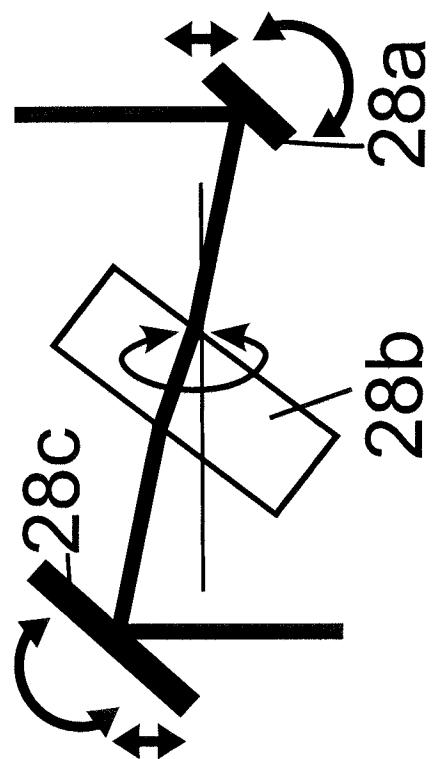


Fig. 7

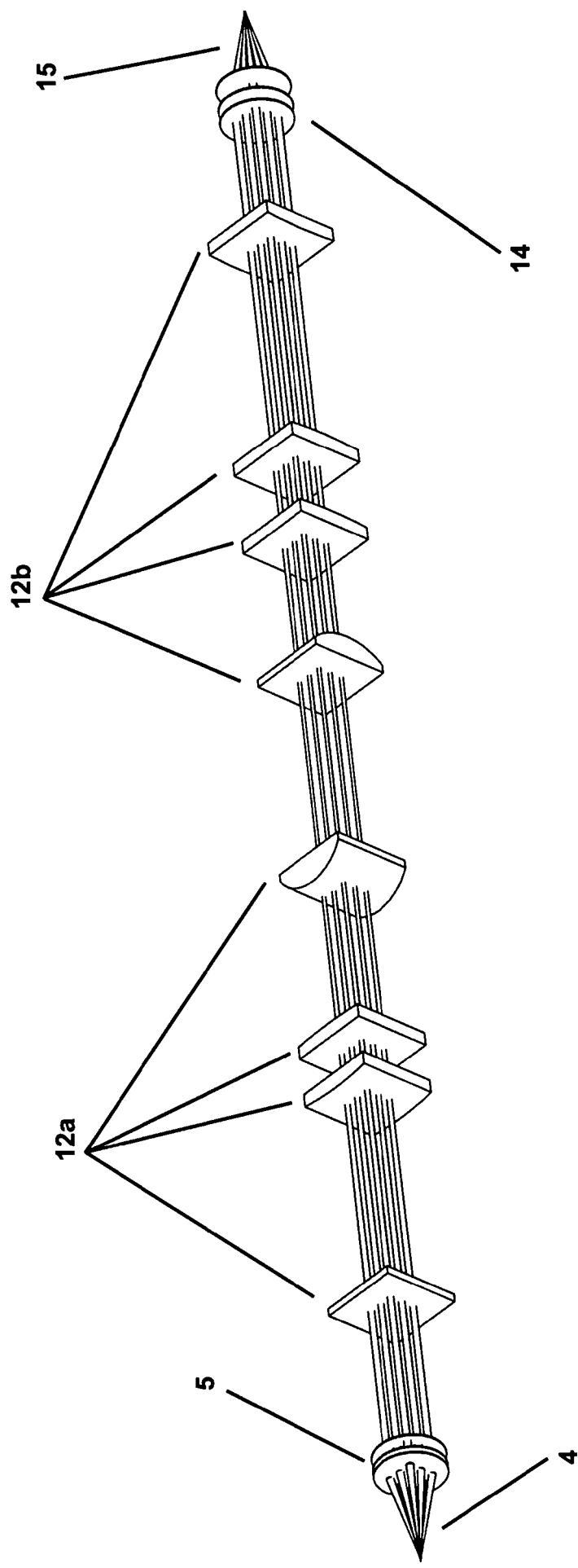


Fig. 8

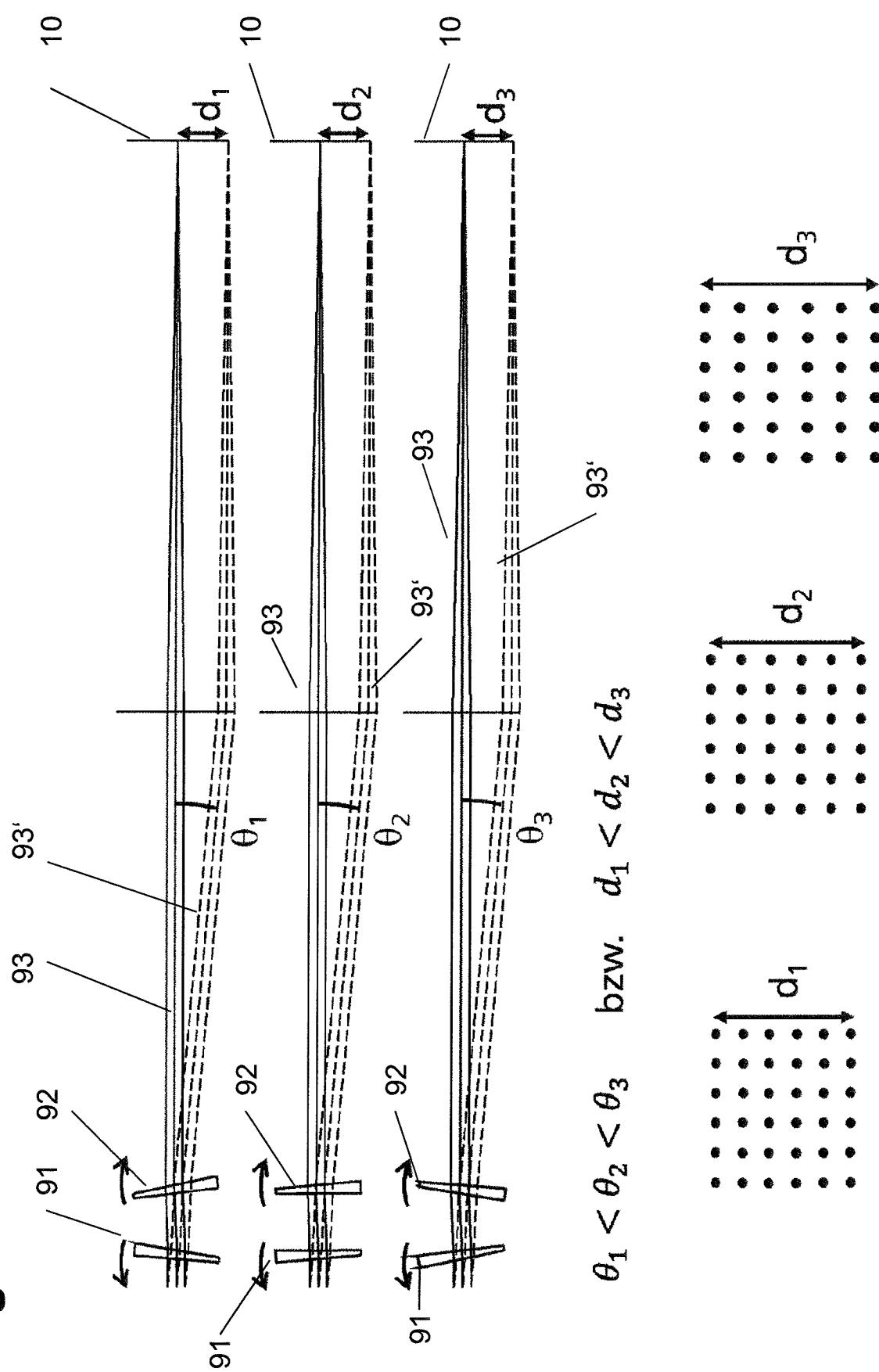
Fig. 9

Fig. 10

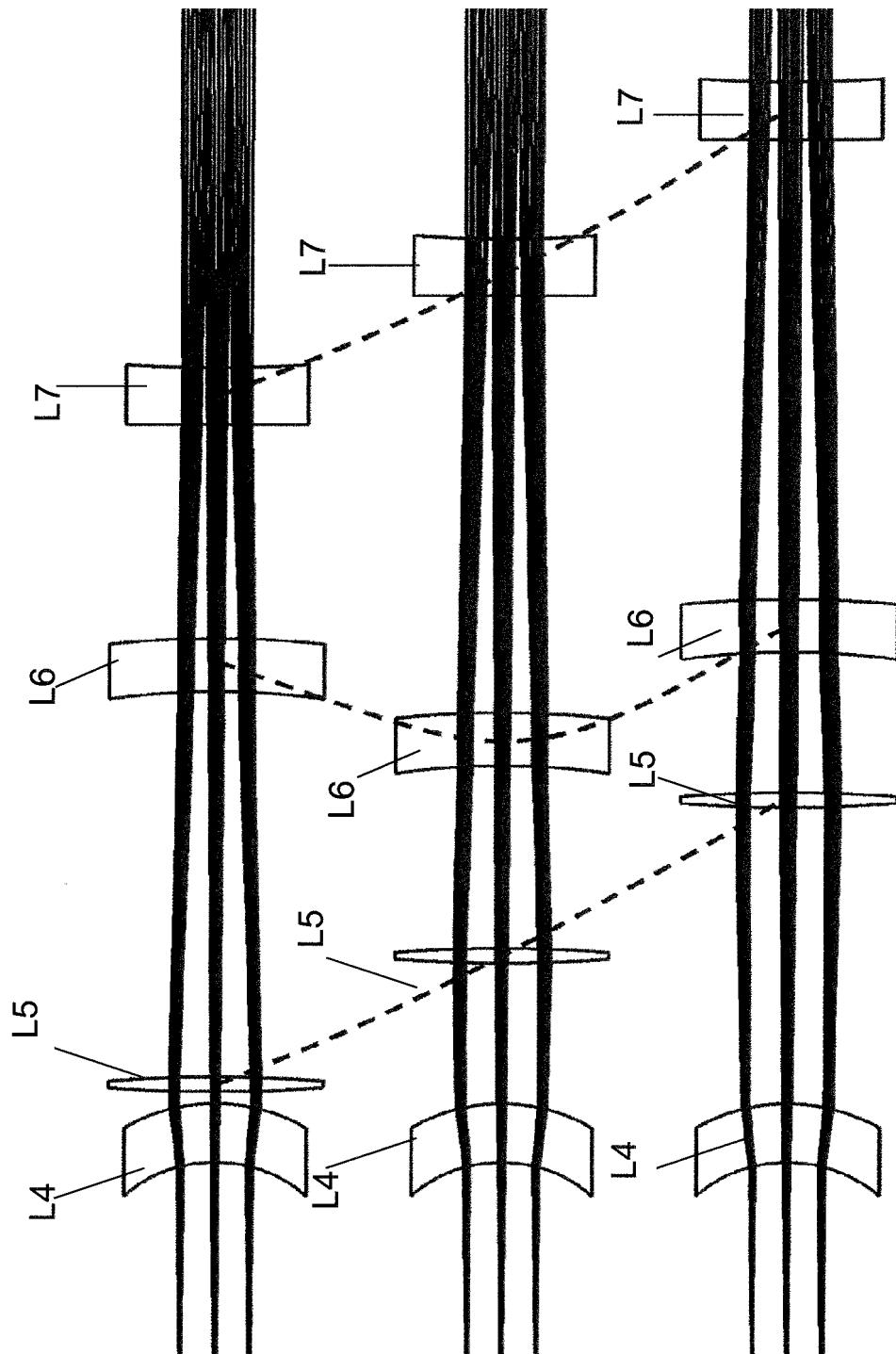


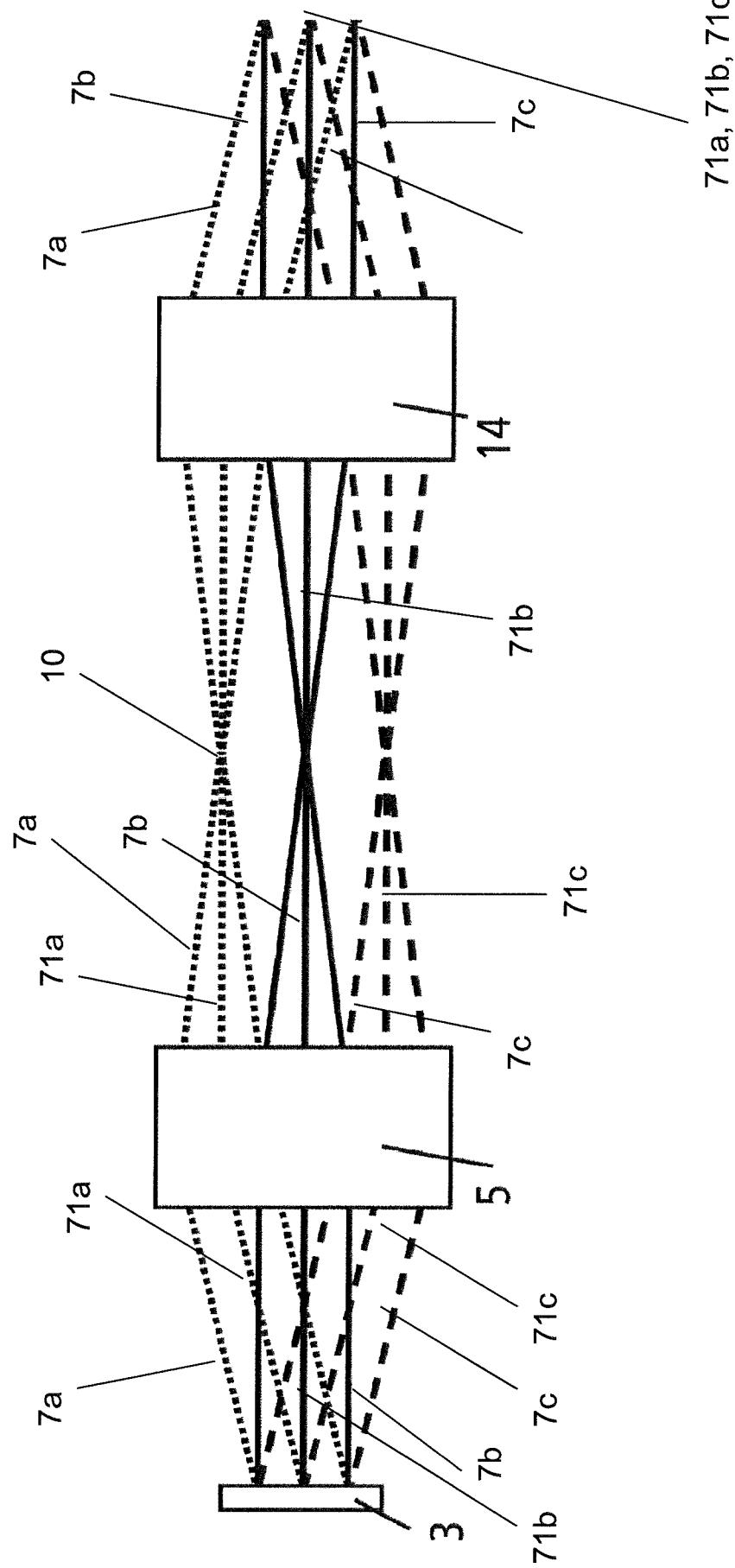
Fig. 11

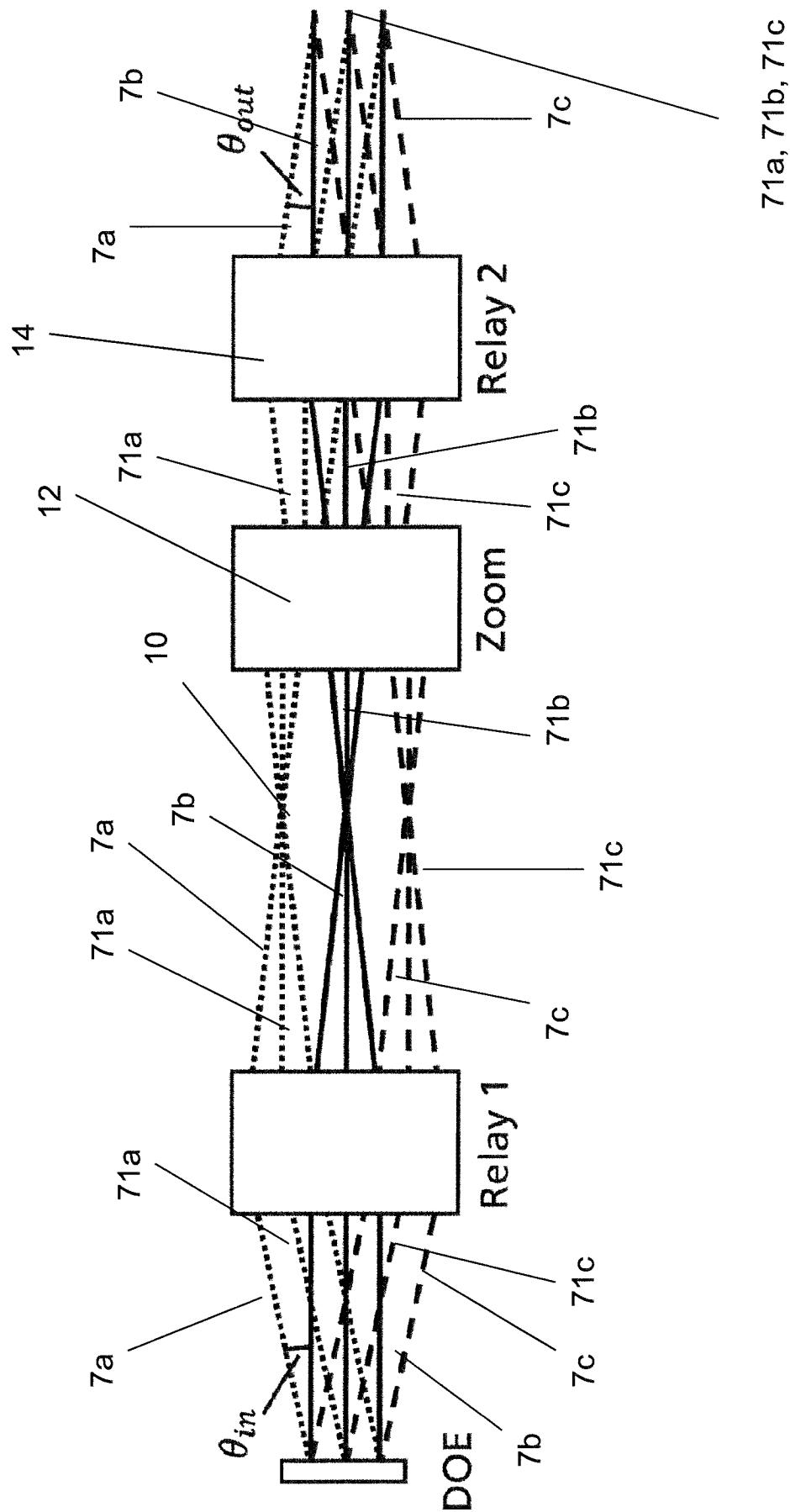
Fig. 12

Fig. 13

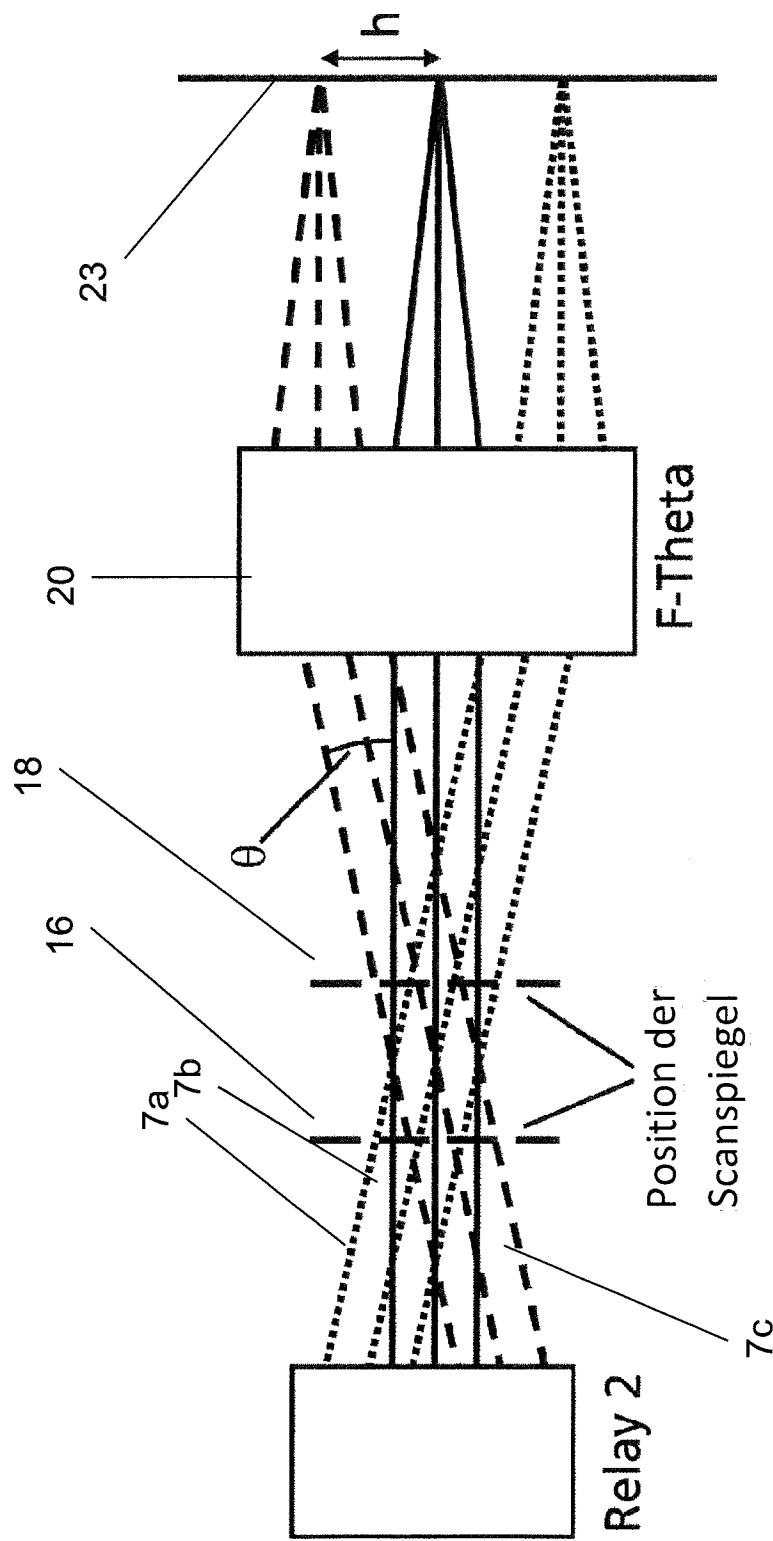


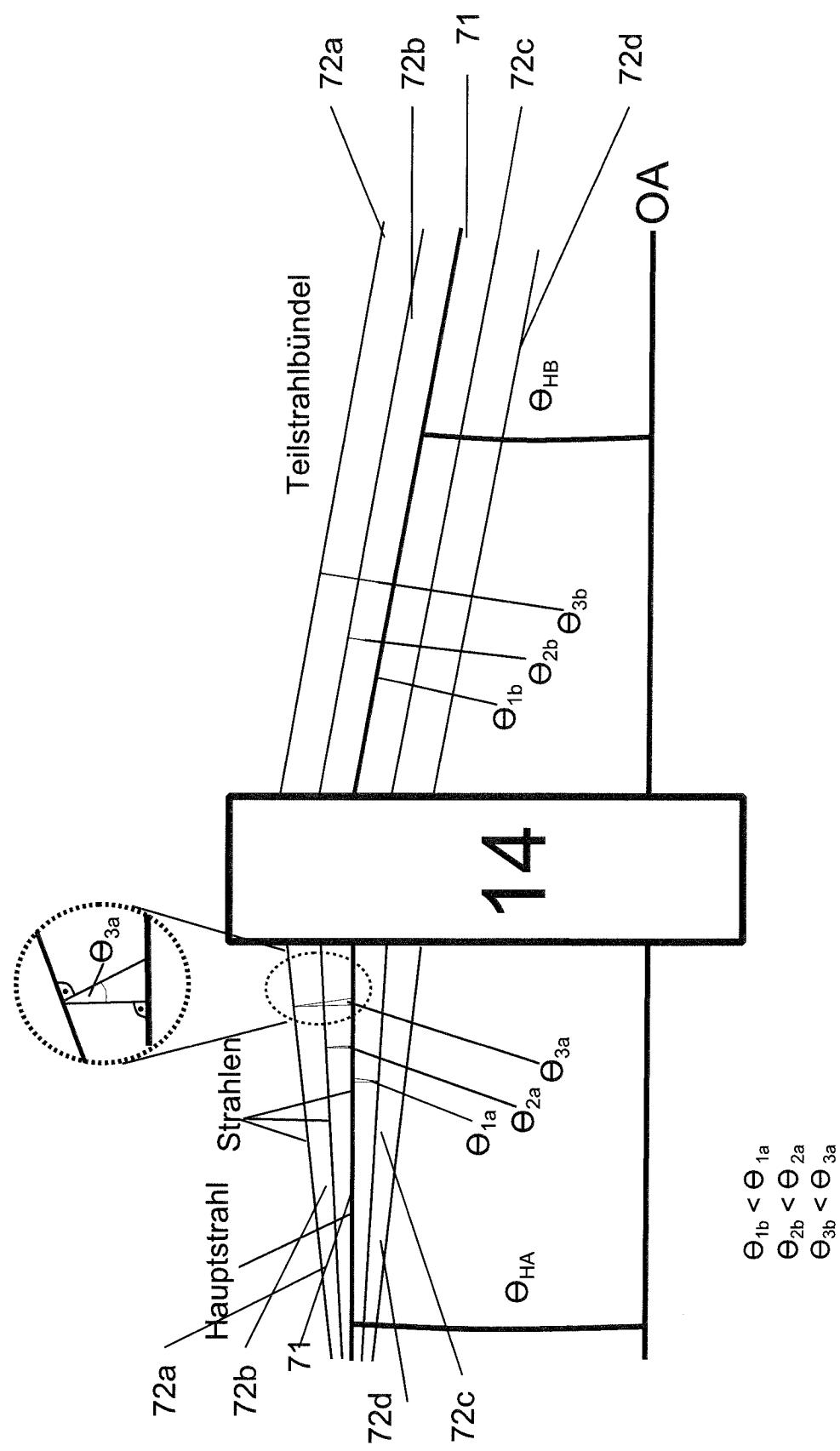
Fig. 14

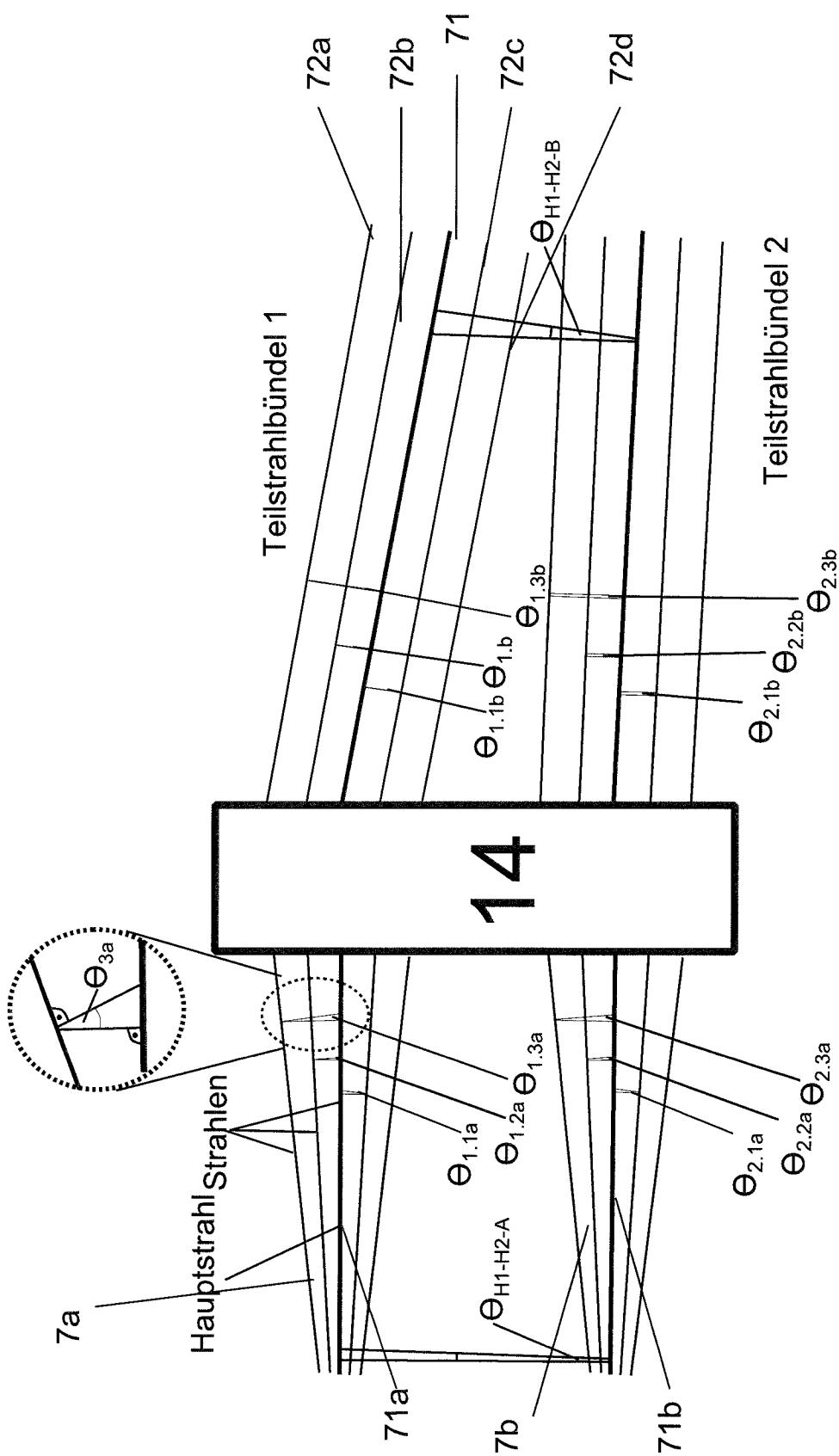
Fig. 15

Fig. 16

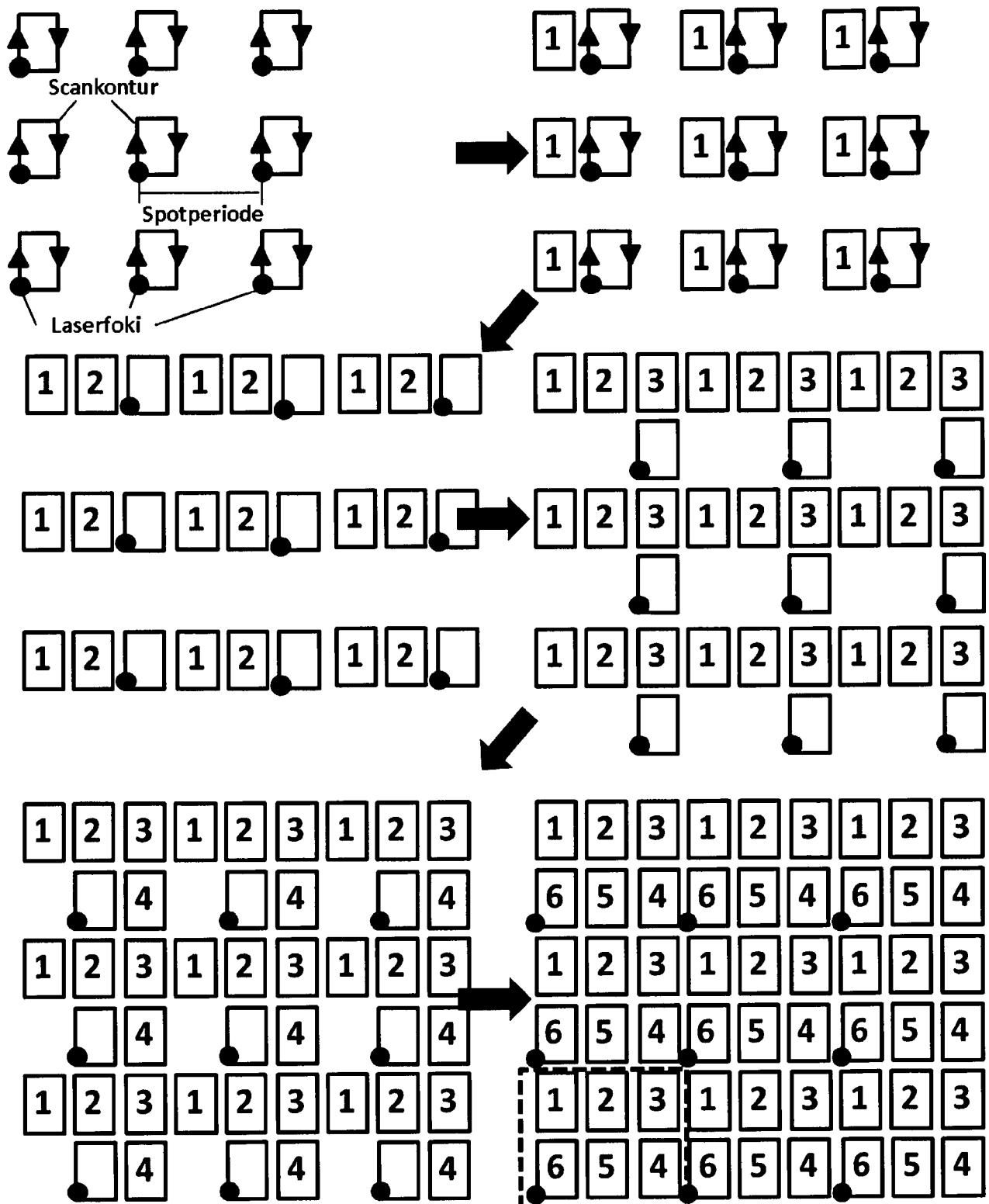


Fig. 17

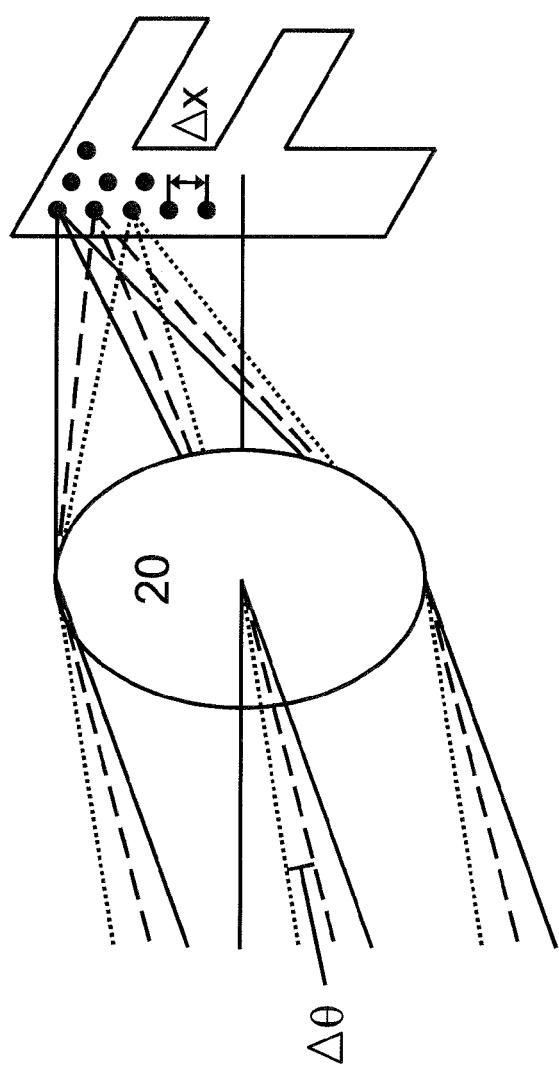


Fig. 18

