

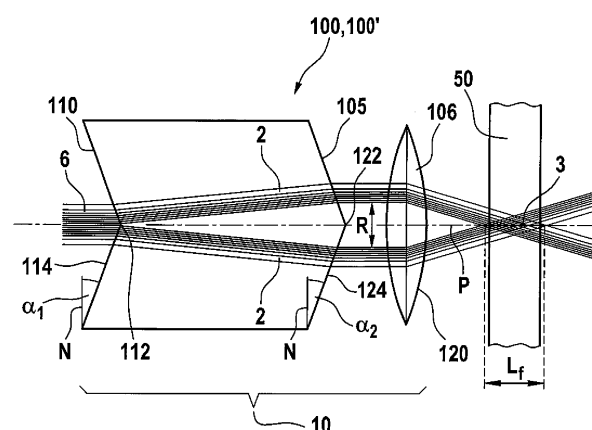
(51) Int Cl.: **B23K 26/064** (2014.01)
B23K 26/50 (2014.01)
G02B 27/09 (2006.01)
G02B 5/00 (2006.01)

(72) Erfinder:
Thomas, Jens Ulrich, 55128 Mainz, DE; Lentjes,
Frank-Thomas, 55411 Bingen, DE; Ortner,
Andreas, 55435 Gau-Algesheim, DE

(56) Ermittelter Stand der Technik:
siehe Folgeseiten

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(57) Zusammenfassung: Die vorliegende Erfindung betrifft eine Vorrichtung (1) und ein Verfahren zum laserbasierten Trennen eines transparenten, sprödbrechenden Werkstücks (50) mit einem Laser (5), der einen Laserstrahl (6) mit einer Intensität I_L entlang einer optischen Achse (P) emittiert, und einer optischen Einrichtung (10), wobei die optische Einrichtung (10) mindestens ein einteiliges Doppelaxikon (100) aufweist, wobei das Doppelaxikon (100) eine Eintrittsfläche (110) und die optische Einrichtung (10) eine Austrittsfläche (120) aufweist, wobei die Eintrittsfläche (110) derart ausgebildet ist, dass im Doppelaxikon (100) ein Ringstrahl (2) gebildet wird und wobei die Intensität I_L im Doppelaxikon (100) kleiner ist als die Schwellintensität I_S des Materials des Doppelaxikons (100), und wobei die Austrittsfläche (120) derart ausgebildet ist, dass in Richtung des Laserstrahls hinter der Austrittsfläche (120) ein Linienfokus (3) mit einer maximalen Intensität $I_{\max}$ und einer Länge L_r entsteht.



(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE 10 2014 213 775 A1
EP 2 754 524 A1

BRZOBOHATÝ, Oto; CIZMÁR, Tomas;
ZEMANEK, Pavel: High quality quasi-bessel
beam generated by round-tip axicon. In: Optics
Express. 2008, Bd. 16, H. 17, S. 12688-12700. ISSN
1094-4087 (E). DOI: 10.1364/OE.16.012688. URL:
<https://www.osapublishing.org/oe/viewmedia.cfm?uri=oe-16-17-12688&seq=0> [abgerufen am
28.06.2017]. Bibliographieinformationen ermittelt
über: <https://www.osapublishing.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-16-17-12688#Abstract> [abgerufen am
28.06.2017].

DURNIN, J. ; MICELI, J. J. ; EBERLY, J. H.:
Comparison of Bessel and Gaussian beams.
In: Optics Letters (OL). 1988, Bd. 13, H. 2,
S. 79-80. ISSN 1539-4794 (e); 0146-9592 (p).
DOI: 10.1364/OL.13.000079. URL: <https://www.osapublishing.org/ol/viewmedia.cfm?uri=ol-13-2-79&seq=0> [abgerufen am 06.07.2017].
Bibliographieinformationen ermittelt über: <https://www.osapublishing.org/ol/abstract.cfm?uri=ol-13-2-79> [abgerufen am 06.07.2017].

JARUTIS, V. ; PASKAUSKAS, R. ; STABINIS,
A.: Focusing of Laguerre–Gaussian beams
by axicon. In: Optics Communications. 2000,
Bd. 184, H. 1-4, S. 105-112. ISSN 1873-0310
(e); 0030-4018 (p). DOI: 10.1016/S0030-4018
(00)00961-5. URL: http://ac.els-cdn.com/S0030401800009615/1-s2.0-S0030401800009615-main.pdf?_tid=3b1a626e-6211-11e7-8a4e-00000aacb35d&acdnat=1499321360_1a20fe0207b217b71c280d82b6bf363d [abgerufen am
06.07.2017]. Bibliographieinformationen ermittelt
über: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401800009615> [abgerufen am
06.07.2017].

KAMPMANN, R. [u.a.]: Optical system for
trapping particles in air. In: Applied Optics.
2014, Bd. 53, H. 4, S. 777-784. ISSN 1539-
5422; 1540-8981 (e); 0003-6935 (p). DOI:
10.1364/AO.53.000777. URL: <https://www.osapublishing.org/ao/viewmedia.cfm?uri=ao-53-4-777&seq=0> [abgerufen am 05.07.2017].
Bibliographieinformationen ermittelt über: <https://www.osapublishing.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-53-4-777> [abgerufen am 05.07.2017].

MCLEOD, John H.: The Axicon: A New
Type of Optical Element. In: Journal of the
Optical Society of America (JOSA). 1954, Bd.
44, H. 8, S. 592-597. ISSN 0030-3941 (p). DOI:
10.1364/JOSA.44.000592. URL: <https://www.osapublishing.org/josa/viewmedia.cfm?uri=josa-44-8-592&seq=0> [abgerufen am 05.07.2017].
Bibliographieinformationen ermittelt über: <https://www.osapublishing.org/josa/abstract.cfm?uri=josa-44-8-592> [abgerufen am 05.07.2017].

WEBER, Niklas [u.a.]: Highly compact
imaging using Bessel beams generated by
ultraminiaturized multi-micro-axicon systems.
In: Journal of the Optical Society of America
A (JOSA A): Optics, Image Science, and
Vision. 2012, Bd. 29, H. 5, S. 808-816. ISSN
1520-8532 (e); 0740-3232; 1084-7529 (p). DOI:
10.1364/JOSA.29.000808. URL: <https://www.osapublishing.org/josaa/viewmedia.cfm?uri=josaa-29-5-808&seq=0> [abgerufen am 05.07.2017].
Bibliographieinformationen ermittelt über: <https://www.osapublishing.org/josaa/abstract.cfm?uri=josaa-29-5-808> [abgerufen am 05.07.2017].

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zum laserbasierten Trennen eines transparenten, sprödbrechenden Werkstücks gemäß dem Oberbegriff des Anspruch 1. Die Erfindung betrifft außerdem ein Verfahren zum laserbasierten Trennen eines vorgegebenen Glas- oder Glaskeramikelements gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 16.

[0002] Die Laserbearbeitung von transparentem, sprödbrechendem Material, insbesondere Glas, oder auch Saphir, erfolgt üblicherweise mittels geeignet geformter Ultrakurzpuls-Laserstrahlung mit entsprechender Wellenlänge, Pulsdauer, Frequenz und Leistung. Üblicherweise wird der Laserstrahl hierbei mit einer geeigneten Optik nicht auf einen einzelnen Fokuspunkt sondern auf einen möglichst lang ausgehenden Linienfokus fokussiert, der ganz oder wenigstens teilweise im zu bearbeiteten Werkstück liegt. Bei entsprechenden Eigenschaften der Laserstrahlung hinsichtlich Pulslänge, Pulsenergie und Wellenlänge führt die Energie des Laserlichts zu einer linienförmigen Wechselwirkung mit dem Werkstück im Bereich der Fokuslinie.

[0003] Werden viele solcher linienförmigen Schädigungszonen nebeneinander angeordnet, beispielsweise durch eine Relativbewegung des zu bearbeitenden Werkstücks zum Linienfokus, so entsteht im Werkstück eine Aneinanderreihung von Wechselwirkungslinien mit einem jeweiligen Abstand, der von der Repetitionsrate des Lasers und der Geschwindigkeit der Relativbewegung abhängt. Die Wechselwirkung kann zur Ausbildung eines Mikrokanals im Werkstück führen, so dass man im Fall einer Aneinanderreihung solcher Kanäle auch von einer Mikroperforation spricht, entlang welcher ein nachfolgendes Trennen des Werkstücks erfolgen kann.

[0004] Das Trennen kann entweder durch die im Material vorhandenen Eigenspannungen von selbst („selfcleaving“) erfolgen oder durch einen selbständigen Prozess. Solche Prozesse sind beispielsweise das Biegen des Werkstücks oder das Thermoschocktrennen. Beim Thermoschocktrennen werden durch gezielte lokale Erwärmung der Perforationszone, zum Beispiel durch eine Flamme oder einen CO₂-Laserstrahl, oder auch durch gezielte Erwärmung bzw. gezieltes Abkühlen der äußeren bzw. inneren Bereiche einer geschlossenen Perforation, Spannungen im Werkstück erzeugt, so dass die relative Dehnung und/oder das relative Schrumpfen zu einem Trennen des Werkstücks führen.

[0005] Um über die gesamte Länge des Linienfokus eine ähnliche räumliche Begrenzung der Laserstrahlung zu erreichen, werden idealerweise so genannte Besselstrahlen verwendet. Diese bestehen aus einem von schwächeren Ringen umgebenen, zentra-

len, hellen Maximum und haben gegenüber den vom Laser emittierten Gaußstrahlen den großen Vorteil, dass sich ihr Radius in Ausbreitungsrichtung konstant bleibt. Sie ermöglichen sowohl die Bearbeitung eines größeren Tiefenbereichs als auch eine größere Toleranz bei der Werkstückausrichtung. Zudem sind sie quasi beugungsfrei und besitzen Selbstheilungseigenschaften.

[0006] Die Erzeugung von Besselstrahlen und eines lang ausgedehnten Linienfokus wird unter anderem mit sogenannten Axikons als strahlformende Linsen erreicht. Das Axikon als optisches Element wurde 1954 von McLeod beschrieben (John H. McLeod: The Axicon: A New Type of Optical Element. J. Opt. Soc. Am. / Vol. 44, No. 8, August 1954). Demnach ist ein Axikon ein optisches Element welches das Licht von kleinen Punktquellen auf eine gerade, kontinuierliche Brennpunktlinie abbildet. McLeod beschreibt verschiedene Formen von Axikons, stellt jedoch den Glaskegel als wichtigstes Axikon heraus.

[0007] Kegelförmige Axikons finden in weiten Bereichen der Technik und der Medizin Anwendung.

[0008] Beispielsweise beschreiben Weber et al. die Verwendung von Axikons und Multi-Axikon-Systemen in der Optical Coherence Tomography (OCT), bei der unter anderem die selbstheilenden Eigenschaften der durch das Axikon erzeugten Besselstrahlung eine große Rolle spielen (Niklas Weber et al.: Highly compact imaging using Bessel beams generated by ultraminiaturized multi-microaxicon systems. J. Opt. Soc. Am. / Vol. 29, No. 5, May 2012).

[0009] R. Kampmann et al. beschreiben eine Vorrichtung zum Einfangen von Partikeln in Luft, bei der ein System aus zwei Axikons verwendet wird, welche monolithisch, d.h. aus einem Stück, aus PMMA gefertigt sind und wobei beide Axikons denselben Kegelwinkel besitzen (R. Kampmann et al.: Optical systems for trapping particles in air. Applied Optics / Vol. 53, No. 4, February 2014).

[0010] Die EP 2 754 524 A1 beschreibt ein Verfahren zum laserbasierten Bearbeiten eines flächigen Substrats, um das Substrat in mehrere Teile zu trennen. Bei diesem Verfahren wird ein Laserstrahl eines Lasers zum Bearbeiten auf das Substrat gerichtet. Im Strahlengang des Lasers ist eine optische Anordnung positioniert, die aus dem eingestrahnten Laserstrahl strahlaustrittsseitig der optischen Anordnung eine längs der Strahlrichtung gesehen ausgedehnte Laserstrahlbrennlinie, einen Linienfokus formt. Das Substrat wird relativ zum Linienfokus so positioniert, dass im Innern des Substrats längs eines in Strahlrichtung gesehen ausgedehnten Abschnitts des Linienfokus im Material des Substrats eine induzierte Absorption erzeugt wird, durch die längs dieses aus-

gedehnten Abschnitts eine induzierte Rissbildung im Material des Substrats erfolgt.

[0011] Die optische Anordnung weist als strahlformendes optisches Element eine sphärisch geschliffene bikonvexe Linse oder ein Axikon auf.

[0012] Der Linienfokus zur Bearbeitung des Werkstücks liegt hier nicht nur im zu bearbeitenden Werkstück sondern ebenfalls im Axikon. Soll nun ein Werkstück bearbeitet werden, welches wie das Axikon aus Glas besteht, so würde die Energie des Laserstrahls nicht nur im Glaswerkstück sondern ebenfalls im Axikon selbst absorbiert werden und dieses zerstören.

[0013] Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht daher darin, eine Vorrichtung und ein Verfahren zum Trennen eines transparenten, sprödbrechenden Werkstücks mittels eines Lasers zur Verfügung zu stellen, wobei die Vorrichtung so eingerichtet ist, dass sie nicht durch den Laserstrahl selbst zerstört wird und der Justieraufwand der strahlformenden Komponenten minimiert wird.

[0014] Diese Aufgabe wird mit einer Vorrichtung zum Trennen eines transparenten, sprödbrechenden Werkstücks mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst.

[0015] Demnach weist die Vorrichtung einen Laser, der einen Laserstrahl mit einer Intensität I_L entlang einer optischen Achse (P) emittiert, und eine strahlformende optische Einrichtung mit einem einteiligen Doppelaxikon auf.

[0016] Das Doppelaxikon weist eine Eintrittsfläche auf, die derart ausgebildet ist, dass der Laserstrahl im Doppelaxikon in einen Ringstrahl geformt wird. Der Vorteil des Doppelaxikons besteht darin, dass durch die Wahl der Energie des Lasers, der Brechzahl des Doppelaxikons sowie des Axikonwinkels der Eintrittsfläche die Intensität des Laserstrahls I_L innerhalb des Doppelaxikons geringer als die Schwellintensität des Materials des Doppelaxikons eingestellt werden kann, so dass das Material des Doppelaxikons beim Strahldurchgang nicht zerstört wird.

[0017] Die Austrittsfläche der optischen Einrichtung, welche im einfachsten Fall der Austrittsfläche des Doppelaxikons entspricht, ist so ausgebildet, dass der Ringstrahl wieder zusammengeführt wird und in Richtung des Laserstrahls hinter der Austrittsfläche ein Linienfokus mit einer maximalen Intensität $I_{\max}$ und einer Länge L_f entsteht.

[0018] Die Intensität $I_{\max}$ ist vorzugsweise größer als die Schwellintensität I_S des Materials des Werkstücks. Bei der Schwellintensität I_S handelt es sich um eine Materialgröße, die angibt, wann nichtlineare Volumenprozesse in einem transparenten Medium statt-

finden und dieses zerstören. Solche nichtlinearen Volumenprozesse sind beispielsweise die Multiphotonenionisation und die Entstehung von Avalanche-Ionen. Die Schwellintensität I_S von Gläsern liegt beispielsweise bei etwa $5 \times 10^{16} \text{ W/m}^2$. Die Länge L_f des Linienfokus entspricht der Breite der Intensitätsverteilung in Strahlausbreitungsrichtung bei halber maximaler Intensität $I_{\max}$.

[0019] Die optische Einrichtung soll den Laserstrahl, bei dem es sich um einen Gauß-Strahl handelt, vorzugsweise in einen Bessel-Strahl umwandeln. Die Erzeugung eines perfekten Bessel-Strahls ist jedoch nur in der Theorie möglich. In der Praxis liegt immer ein Laserstrahl vor, welcher sowohl einen Gauß- und einen Bessel-Anteil aufweist. Dies ist insbesondere in den Schriften

Brzobohatý, Oto; Čižmár, Tomáš; Zemánek, Pavel (2008): High quality quasi-Bessel beam generated by round-tip axicon. In: Opt. Express 16 (17), S. 12688.

J. Durnin, J. J. Miceli Jr., J. H. Eberly (1988): Comparison of Bessel and Gaussian beams. In: Opt. Lett. 13 (2), S. 79-80.

Jarutis, V.; Paškauskas, R.; Stabinis, A. (2000): Focusing of Laguerre-Gaussian beams by axicon. In: Optics Communications 184 (1-4), S. 105-112.

dargelegt.

[0020] Unter einem Doppelaxikon wird ein optisches, strahlformendes Bauteil verstanden, welches zwei einander gegenüberliegende und zueinander zentrierte, konisch geschliffene Oberflächen aufweist.

[0021] Der Begriff 'einteilig' schließt im Rahmen der Erfindung sowohl eine monolithische Ausführung des Doppelaxikons als auch eine Ausführung ein, bei der zwei Plan-Axikons unmittelbar oder mittelbar über einen Zwischenkörper miteinander verbunden, z.B. verklebt, verkittet oder angesprengt sind. Die Einteiligkeit hat den Vorteil, dass der Justieraufwand geringer ist als bei einer optischen strahlformenden Einrichtung, bei der alle optisch aktiven Flächen separaten Bauteilen zugeordnet sind.

[0022] Unter einem Plan-Axikon versteht der Fachmann ein Axikon, welches gegenüber seiner konischen Fläche eine Planfläche aufweist.

[0023] In der vorliegenden Erfindung verläuft die optische Achse entlang der Austrittsrichtung des Laserstrahls aus dem Laser und durchquert die Spitzen von Ein- und Austrittsfläche des Doppelaxikons.

[0024] Der Vorteil eines Doppelaxikons zur Erzeugung des Linienfokus besteht darin, dass der Linien-

fokus zur Bearbeitung des Werkstücks erst von der Spitze der Austrittsfläche des Axikons entfernt entsteht und nicht wie bei einem einfachen Axikon im Axikon selbst.

[0025] In einer bevorzugten Ausführungsform ist das Doppelaxikon als Galilei-Axikon ausgebildet.

[0026] Unter einem Galilei-Axikon wird ein Doppelaxikon verstanden, welches eine nach innen gerichtete konische Eintrittsfläche und eine nach außen gerichtete konische Austrittsfläche besitzt. Folglich zeigen die Spitzen beider konischer Flächen in die Strahlaustrittsrichtung des Lasers.

[0027] Der auf die Mitte der Eintrittsfläche des Galilei-Axikons auftreffende Laserstrahl wird beim Passieren der Eintrittsfläche aufgrund des Brechungsgesetzes aufgefächert und in einen Ringstrahl umgeformt, dessen Radius abhängig ist vom Axikonwinkel der Eintrittsfläche, von der Brechzahl des Doppelaxikons und von dem im Axikon zurückgelegten Weg des Laserstrahls. Der Axikonwinkel ist dabei der Winkel zwischen Kegelfläche und Normale zur Kegelachse der durch die Eintrittsfläche des Doppelaxikons gebildeten Kegelform.

[0028] Beim Passieren der Austrittsfläche des Galilei-Axikons wird der Ringstrahl abhängig vom Axikonwinkel der Austrittsfläche vom Lot der Austrittsfläche weggebrochen.

[0029] Da es sich bei dem vom Laser emittierten Strahl um einen Gaußstrahl handelt, fällt dessen Intensität radial nach außen ab und das Intensitätsmaximum liegt in der Mitte des Strahls. Bei der Auffächerung des Strahls nach Passieren der Eintrittsfläche des Galilei-Axikons liegt das Intensitätsmaximum daher auf der Innenseite des Ringstrahls. Dies führt dazu, dass der Linienfokus des zusammengeführten Ringstrahls sein Intensitätsmaximum im vorderen Abschnitt seiner Intensitätsverteilung entlang der optischen Achse aufweist. Dies hat den Vorteil, dass für eine weitere Strahlformung beugende Strahlformungselemente genutzt werden können, um z.B. von der Gauß-Bessel-Intensitätsverteilung abweichende Intensitätsverteilungen zu realisieren.

[0030] In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform ist das Doppelaxikon als Kepler-Axikon ausgebildet.

[0031] Unter einem Kepler-Axikon wird ein Doppelaxikon verstanden, das zwei nach außen gerichtete konische Oberflächen besitzt.

[0032] Anders als beim Galilei-Axikon, wird der Laserstrahl beim Passieren der Eintrittsfläche nicht aufgefächert, sondern zusammengeführt. Dabei kommt es zur Ausbildung eines Zwischenfokus innerhalb

des Kepler-Axikons. Damit dieser Zwischenfokus das Kepler-Axikon nicht zerstört, muss dessen maximale Intensität $I_{\max}$ geringer sein als die Schwellintensität für permanente Schädigung des Materials des Kepler-Axikons. Die maximale Intensität $I_{\max}$ des Zwischenfokus kann vorzugsweise mittels des Axikonwinkels der Eintrittsfläche und der Brechzahl des Kepler-Axikons eingestellt werden. Hierbei lässt sich folgender Zusammenhang aus der oben genannten Publikationsschrift von Jarutis et al, 2000 ableiten:

$$I_{\max} = \frac{2 \cdot P \cdot 1,9 \cdot A''}{\pi \cdot W}, \text{ mit } A'' = 2 \cdot \sin(\arcsin(n_a \sin \alpha_1) - \alpha_1).$$

[0033] Hierbei ist n_a die Brechzahl des Kepler-Axikons und P die Pulsspitzenleistung des Laserstrahls, welche unter der Annahme eines zeitlich rechteckigen Laserpulses der Dauer t aus der Pulsenergie E_{Puls} mit $P = E_{\text{Puls}}/t$ abgeschätzt werden kann. W ist die durch den $1/e^2$ -Intensitätsabfall gekennzeichnete halbe radiale Breite des Gaußstrahls unmittelbar vor Eintritt in das Doppelaxikon. Bei der Variablen A'' handelt es sich um eine willkürliche Größe, welche lediglich die Axikonparameter, Axikonwinkel α_1 und Brechzahl n_a , zusammenfasst.

[0034] Vorzugsweise ist das einteilige Doppelaxikon monolithisch.

[0035] Unter ‚monolithisch‘ wird verstanden, dass das Doppelaxikon aus einem Stück gefertigt ist und nicht aus verschiedenen Teilen zusammengesetzt ist.

[0036] Die monolithische Bauweise des Axikons hat den Vorteil, dass sich im Axikon keine brechenden oder reflektierenden Grenzflächen befinden, die den Strahlengang stören und den Bessel-Anteil des Laserstrahls nach Passieren der Eintrittsfläche des Doppelaxikons reduzieren. Zudem besitzt es weniger Freiheitsgrade und erlaubt daher eine einfachere Justage und ist robuster gegen Erschütterungen.

[0037] Vorteilhafterweise besitzt das monolithische Doppelaxikon eine Brechzahl n_a zwischen 1,35 und 1,9.

[0038] In einer vorteilhaften Ausführungsform ist das Doppel-Axikon aus einem ersten Plan-Axikon und einem zweiten Plan-Axikon zusammengesetzt.

[0039] Axikons werden üblicherweise mittels CNC-Maschinen aus einem Rohling gefräst und anschließend nachpoliert. Aufgrund ihrer einfacheren Geometrie sind Plan-Axikons daher einfacher herzustellen.

[0040] Die Zusammensetzung des Doppelaxikons aus einem ersten und einem zweiten Plan-Axikon erlaubt die Verwendung verschiedener Plan-Axikon-

Kombinationen hinsichtlich Brechzahlen und Axikonwinkel und folglich eine effektivere Strahlführung.

[0041] In einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform sind das erste und das zweite Plan-Axikon mittelbar über einen Zwischenkörper oder unmittelbar miteinander verbunden. Der Zwischenkörper weist vorzugsweise die Gestalt einer Platte auf.

[0042] Der Zwischenkörper kann weitere strahlformende Aufgaben übernehmen. Beispielsweise kann das Intensitätsprofil des Laserstrahls entlang des Linienfokus mittels eines vom Radius r abhängenden Brechungsindex $n(r)$ vorgegeben werden.

[0043] Vorzugsweise besitzt das erste Plan-Axikon eine Brechzahl n_1 und das zweite Plan-Axikon eine Brechzahl n_2 , wobei gilt: $n_1 = n_2$.

[0044] In einer weiteren Ausführungsform besitzt das erste Plan-Axikon eine Brechzahl n_1 und das zweite Plan-Axikon eine Brechzahl n_2 , wobei gilt: $n_1 \neq n_2$.

[0045] Durch die Verwendung zweier Materialien mit unterschiedlichen Brechungsindizes, insbesondere wenn $n_1 > n_2$ ist, können steilere Einfallswinkel auf die Austrittsfläche des Doppelaxikons erzielt werden. Dies führt dazu, dass die Energiedichte des Linienfokus abhängig vom Einfallswinkel des Ringstrahls auf die Austrittsfläche des Doppelaxikons erhöht wird. Zudem entsteht ein schmalerer Linienfokus für eine präzisere Werkstückbearbeitung.

[0046] In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform weist wenigstens eins der beiden Plan-Axikons eine Brechzahl auf, die eine radiale Abhängigkeit besitzt.

[0047] Mittels einer geeigneten radialen Abhängigkeit einer der Brechzahlen kann die Intensitätsverteilung des Linienfokus derart angepasst werden, dass sie von der Intensitätsverteilung eines Bessel-Gauß-Strahls abweicht.

[0048] Weiter bevorzugt besitzt der Zwischenkörper eine Brechzahl n_z zwischen 1,35 und 1,9.

[0049] In einer bevorzugten Ausführungsform weist die Brechzahl n_z des Zwischenkörpers eine radiale Abhängigkeit auf.

[0050] Wie bereits oben ausgeführt, kann mittels einer radial abhängigen Brechzahl die Intensitätsverteilung des Linienfokus derart angepasst werden, dass sie von der Intensitätsverteilung eines Bessel-Gauß-Strahls abweicht.

[0051] Vorteilhafterweise hat der Ringstrahl nach Passieren der optischen Einrichtung einen Öffnungswinkel β mit $5^\circ \leq \beta \leq 20^\circ$.

[0052] Der Öffnungswinkel β ist abhängig von der Brechzahl n_a des Doppelaxikons sowie den beiden Axikonwinkeln α_1 und α_2 .

[0053] Für ein Galilei-Axikon besteht folgender Zusammenhang:

$$\beta_G = \arcsin \left(n_a \sin \left\{ \arcsin \left(\frac{\sin \alpha_1}{n_a} \right) - \alpha_1 + \alpha_2 \right\} \right) - \alpha_2$$

[0054] Für ein Kepler-Axikon besteht folgender Zusammenhang:

$$\beta_K = \arcsin \left(n_a \sin \left\{ \arcsin \left(\frac{\sin \alpha_1}{n_a} \right) + \frac{\pi}{2} - \alpha_1 + \alpha_2 \right\} \right) - \alpha_2$$

[0055] Es wurde festgestellt, dass bei Öffnungswinkeln $\beta > 20^\circ$ zu viele Beugungsringe entstehen und es zu einer Verringerung der Leistung im zentralen Maximum des Linienfokus kommt, was zu einer erheblichen Verschlechterung der Effektivität der Energieabsorption im Werkstück führt.

[0056] In einer bevorzugten Ausführungsform ist die Austrittsfläche der optischen Einrichtung Teil einer Linse zur Fokussierung des Ringstrahls.

[0057] Insbesondere ist die Linse bevorzugt als Sammellinse oder als Axikon ausgebildet.

[0058] Linsen bieten insbesondere den Vorteil der weiteren Strahlformung und können dazu verwendet werden, den Linienfokus je nach Anwendungsfall entweder zu verlängern oder zu verkürzen oder zu einer von der Gauß-Bessel-Intensitätsverteilung abweichenden Intensitätsverteilung zu formen.

[0059] Die Aufgabe wird auch mit einem Verfahren zum laserbasierten Trennen eines transparenten, sprödbrechenden Werkstücks mit den Merkmalen des Anspruchs 16 gelöst.

[0060] Bei dem Verfahren wird ein Laserstrahl eines gepulsten Lasers mit einer Wellenlänge λ zum Bearbeiten auf das Werkstück gerichtet, wobei mittels einer im Strahlengang positionierten optischen Einrichtung der Laserstrahl einen Linienfokus mit einer Länge L_f hinter der optischen Einrichtung ausbildet und wobei das Werkstück so positioniert wird, dass der Linienfokus wenigstens teilweise im Werkstück liegt und wobei eine wie vorstehend beschriebene Vorrichtung verwendet wird.

[0061] Mit der Verwendung der zuvor beschriebenen Vorrichtung werden wesentlich längere Intensitätsprofile entlang des Linienfokus erzielt, welche eine höhere Kantenqualität des bearbeiteten Werkstücks bedingen.

[0062] Darüber hinaus ist die Bearbeitungsqualität weniger anfällig gegenüber Variationen des Abstandes zwischen Optik und Werkstück.

[0063] Transparente, sprödbrechende Materialien sind vorzugsweise Glas, Glaskeramik, Saphir und kristalline Werkstoffe wie beispielsweise aus Silizium. Aber auch die Bearbeitung transparenter Kunststoffe ist möglich.

[0064] Vorzugsweise wird das Werkstück derart bezüglich der Vorrichtung positioniert, dass die maximale Intensität $I_{\max}$ im Werkstück liegt.

[0065] Es ist weiterhin bevorzugt, dass die maximale Intensität $I_{\max}$ derart eingestellt wird, dass die maximale Intensität $I_{\max}$ größer ist als die Schwellintensität I_s des Materials des Werkstückes.

[0066] Vorzugsweise wird die Länge L_f des Linienfokus derart eingestellt, dass L_f kleiner ist als die Dicke des Werkstücks. Diese Ausführung kommt vorzugsweise dann zum Einsatz, wenn $I_{\max}/2$ größer als die Schwellintensität I_s des Materials des Werkstückes ist. Zudem hat sie den Vorteil, dass die Leistung des Lasers so eingestellt werden kann, dass keine Schädigungen an den Oberflächen des Werkstücks auftreten.

[0067] Vorzugsweise wird die Länge L_f des Linienfokus derart eingestellt, dass die Länge L_f größer ist als die Dicke des Werkstücks. Diese Ausführung kommt vorzugsweise dann zum Einsatz, wenn $I_{\max}/2$ kleiner als die Schwellintensität I_s des Materials des Werkstückes ist. Bei dieser Ausführungsform wird zudem sichergestellt, dass die Bearbeitungsqualität weniger anfällig gegenüber Variationen des Abstandes zwischen Optik und Werkstück ist.

[0068] Vorzugsweise wird der Linienfokus derart eingestellt und das Werkstück derart positioniert, dass wenigstens eine der beiden der gegenüberliegenden Oberflächen des Werkstücks vom Linienfokus durchquert wird. Diese Ausführung wird vorzugsweise eingesetzt, wenn $I_{\max}/2$ etwa gleich gross wie die Schwellintensität I_s ist und die entlang der Fokuslinie leicht asymmetrische Intensitätsverteilung des Gauß-Bessel-Fokus oder einer davon abweichenden Intensitätsverteilung Auswirkungen auf die Modifikation im Werkstück hat. Vorteilhaft kann hier zudem genutzt werden, dass die Leistung des Lasers so eingestellt werden kann, dass auf einer Seite des Werkstückes keine Schädigung auftritt, während auf der anderen Seite die Bearbeitungsqualität weniger anfällig ge-

genüber Variationen des Abstandes zwischen Optik und Werkstück ist. Vorteilhafterweise wird ein Laser verwendet, dessen Laserstrahl vor der Eintrittsfläche eine Pulsenergie E_p von 50 μJ bis 10 mJ aufweist. Besonders bevorzugt ist eine Energie E_p von 500 μJ bis 5 mJ. Dieser bevorzugte Wertebereich wird insbesondere dann gewählt, wenn die Länge L_f des Linienfokus größer als 3 mm ist.

[0069] Außerdem ist die Wellenlänge λ des Laserstrahls nach Verlassen des Lasers vorzugsweise 0,2 bis 20 μm . Besonders bevorzugt ist eine Wellenlänge λ von 0,4 bis 11 μm .

[0070] Die Pulsdauer D_p des Laserstrahls beträgt vorteilhafterweise 0,1 bis 100 ps. Besonders bevorzugt ist eine Pulsdauer D_p von 5 bis 15 ps.

[0071] Beispielhafte Ausführungsformen der Vorrichtung zum laserbasierten Trennen eines transparenten, sprödbrechenden Werkstücks werden nachfolgend anhand der Figuren erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 eine schematische Darstellung einer Vorrichtung zum Trennen eines transparenten, sprödbrechenden Werkstückes,

Fig. 2 eine optische Einrichtung mit Galilei-Axikon und Sammellinse,

Fig. 3 eine optische Einrichtung mit Kepler-Axikon und Sammellinse,

Fig. 4 eine optische Einrichtung mit einem Galilei-Axikon zusammengesetzt aus zwei Planaxikon mit unterschiedlichen Brechzahlen,

Fig. 5 eine optische Einrichtung mit einem Kepler-Axikon zusammengesetzt aus zwei Plan-Axikon mit unterschiedlichen Brechzahlen,

Fig. 6 eine optische Einrichtung mit einem Galilei-Axikon zusammengesetzt aus zwei Plan-Axikon und einem Zwischenkörper, und

Fig. 7 ein Linienfokus eines mittels eines Galilei-Axikon geformten Bessel-Gauß-Strahls.

[0072] In der **Fig. 1** ist eine Vorrichtung **1** zum Trennen eines transparenten, sprödbrechenden Werkstücks **50** schematisch abgebildet. Die Vorrichtung **1** umfasst einen Laser **5**, welcher entlang der optischen Achse **P** einen Laserstrahl **6** in Form eines Gaußstrahls emittiert. Im Strahlengang des Laserstrahls **6** befindet sich eine optische Einrichtung **10** mit einer Eintrittsfläche **110** und einer Austrittsfläche **120**. Die optische Einrichtung **10** wandelt den ursprünglichen Gaußstrahl **6** in einen Ringstrahl **2** um, welcher in einem Linienfokus **3** mit einer Länge L_f fokussiert wird. Für die Bearbeitung des Werkstücks **50** befindet sich der Linienfokus **3** vollständig im Werkstück **50**. In den folgenden Abbildungen wird auf die Ausgestaltung der optischen Einrichtung **10** im Detail eingegangen.

[0073] Fig. 2 zeigt die optische Einrichtung 10 mit dem Werkstück 50. In dieser Ausführungsform besteht die optische Einrichtung 10 aus einem monolithischen Doppelaxikon 100, welches als Galilei-Axikon 100' ausgebildet ist und einer Sammellinse 106. Die Austrittsfläche der Sammellinse 106 bildet die Austrittsfläche 120 der optischen Einrichtung 10.

[0074] Das Galilei-Axikon 100' besitzt eine konische Eintrittsfläche 110 und eine konische Austrittsfläche 105. Sowohl die Spitze 112 der Eintrittsfläche 110 als auch die Spitze 122 der Austrittsfläche 105 sind entlang der Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls 6 gerichtet und liegen auf der optischen Achse P. Das Galilei-Axikon 100' besitzt einen ersten Axikonwinkel α_1 und einen zweiten Axikonwinkel α_2 , wobei im vorliegenden Beispiel beide Winkel gleich groß sind. Der Axikonwinkel α_1 bzw. der Axikonwinkel α_2 ist der Winkel zwischen Kegelfläche 114 bzw. 124 und Normale N zur Kegelachse der durch die Eintrittsfläche 110 bzw. Austrittsfläche 105 des Doppelaxikons 100 gebildeten Kegelform, wobei die Normale N senkrecht zur optischen Achse P ausgerichtet ist.

[0075] Der Laserstrahl 6, welcher von einem Hochleistungslaser 5 (siehe Fig. 1) als Gaußstrahl 6 emittiert wird, breitet sich entlang der optischen Achse P aus und wird an der Eintrittsfläche 110 des Galilei-Axikons 100' gemäß dem Brechungsgesetz zum Lot der Eintrittsfläche 110 hin gebrochen, da ein Übergang von einem optischen dünneren in ein optisch dichteres Medium stattfindet. Aufgrund der Kegelform der Eintrittsfläche 110 wird der Laserstrahl 6 aufgefächert und es entsteht ein Ringstrahl 2 mit einem Innenradius R im Innern des Galilei-Axikons 100'. Der Innenradius R des Ringstrahls 2 ist abhängig vom Axikonwinkel α_1 , der Brechzahl n_a des Galilei-Axikons 100' und dem innerhalb des Galilei-Axikons 100' zurückgelegten Weg.

[0076] Beim Auftreffen auf die Austrittsfläche 105 des Galilei-Axikons 100' wird der Ringstrahl 2 gemäß dem Brechungsgesetz vom Lot der Austrittsfläche 105 weggebrochen, da der Ringstrahl 2 vom optisch dichteren Medium in das optisch dünnere Medium übergeht. Sind die Axikonwinkel α_1 und α_2 identisch wie im vorliegenden Beispiel, so wird der Ringstrahl 2 derart gebrochen, dass er nach Austritt aus dem Galilei-Axikon 100' einen konstanten Radius R besitzt.

[0077] Mittels einer Sammellinse 106 wird der Ringstrahl 2 hinter dem Galilei-Axikon 100' in einen Linienfokus 3 mit einer Länge L_f fokussiert. Der Linienfokus 3 durchdringt das Werkstück 50 vollständig.

[0078] Fig. 3 zeigt die optische Einrichtung 10 mit einem Werkstück 50. In dieser Ausführungsform besteht die optische Einrichtung 10 aus einem monolithischen Doppelaxikon 100, welches als Kepler-Axikon 100'' ausgebildet ist und einer Sammellinse 106.

Die Austrittsfläche der Sammellinse 106 bildet die Austrittsfläche 120 der optischen Einrichtung 10.

[0079] Das Kepler-Axikon 100'' besitzt eine konische Eintrittsfläche 110 und eine konische Austrittsfläche 105. Die Spitze 112 der Eintrittsfläche 110 ist der Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls 6 entgegen gerichtet und die Spitze 122 der Austrittsfläche 105 ist entlang der Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls 6 gerichtet. Beide liegen auf der optischen Achse P.

[0080] Das Kepler-Axikon 100'' besitzt einen ersten Axikonwinkel α_1 und einen zweiten Axikonwinkel α_2 , wobei im vorliegenden Beispiel beide Winkel gleich groß sind. Der Axikonwinkel α_1 bzw. der Axikonwinkel α_2 ist dabei der Winkel zwischen Kegelfläche 114 bzw. 124 und Normale N zur Kegelachse der durch die Eintrittsfläche 110 bzw. Austrittsfläche 105 des Doppelaxikons 100 gebildeten Kegelform, wobei die Normale N senkrecht zur optischen Achse P ausgerichtet ist.

[0081] Der Laserstrahl 6 aus dem Hochleistungslaser 5 (siehe Fig. 1), welcher als Gaußstrahl 6 emittiert wird, breitet sich entlang der optischen Achse P aus und wird an der Eintrittsfläche 110 des Kepler-Axikons 100'' gemäß dem Brechungsgesetz zum Lot der Eintrittsfläche 112 hin gebrochen, da ein Übergang von einem optischen dünneren in ein optisch dichteres Medium stattfindet. Aufgrund der Kegelform der Eintrittsfläche 110 wird der Laserstrahl 6 im Innern des Kepler-Axikons 100'' zusammengeführt und es kommt zur Strahlüberlagerung, wobei ein Zwischenfokus 4 mit einer Länge L_z im Innern des Kepler-Axikons 100'' entsteht. Hinter dem Zwischenfokus 4 entsteht, wie im Galilei-Axikon 100', ein Ringstrahl 2, dessen Innenradius R ebenfalls abhängig vom Axikonwinkel α_1 , dem Brechungsindex n_a des Kepler-Axikons 100'' und dem im Kepler-Axikon 100'' zurückgelegten Weg ist.

[0082] Beim Auftreffen auf die Austrittsfläche 105 des Kepler-Axikons 100'' wird der Ringstrahl 2 gemäß dem Brechungsgesetz vom Lot der Austrittsfläche 105 weggebrochen, da der Ringstrahl 2 vom optisch dichteren Medium in das optisch dünnere Medium übergeht. Sind die Axikonwinkel α_1 und α_2 identisch wie im vorliegenden Beispiel, so wird der Ringstrahl 2 derart gebrochen, dass er nach Austritt aus dem Kepler-Axikon 100'' einen konstanten Innenradius R besitzt.

[0083] Wie im Fall des oben beschriebenen Galilei-Axikons 100' (siehe auch Fig. 2) wird mittels einer Sammellinse 106 der Ringstrahl 2 hinter dem Kepler-Axikon 100'' in einen Linienfokus 3 mit einer Länge L_f fokussiert. Der Linienfokus 3 durchdringt das Werkstück 50 vollständig.

[0084] Die **Fig. 4** zeigt eine optische Einrichtung **10**, die als Galilei-Axikon **100'** ausgebildet ist, welches aus einem ersten Plan-Axikon **101** mit einer Brechzahl n_1 und einem zweiten Plan-Axikon **102** mit einer Brechzahl n_2 zusammengesetzt ist, wobei im hier vorliegenden Beispiel die Brechzahl n_1 größer ist als die Brechzahl n_2 . Beide Plan-Axikons **101**, **102** sind durch Verkittung miteinander verbunden. Das erste Plan-Axikon **101** besitzt einen Axikonwinkel α_1 und das zweite Plan-Axikon **102** einen Axikonwinkel α_2 , wobei α_1 kleiner ist als α_2 . Die Kegelfläche **114** des ersten Plan-Axikons **101** bildet die Eintrittsfläche **110** des Galilei-Axikons **100'**, während die Kegelfläche **124** des zweiten Plan-Axikons **102** sowohl die Austrittsfläche **105** des Galilei-Axikons **100'** als auch die Austrittsfläche **120** der optischen Einrichtung **10** bildet.

[0085] Der auf die Eintrittsfläche **110** des Galilei-Axikons **100'** treffende Gaußstrahl **6** wird an der Eintrittsfläche **110** in einen Ringstrahl **2** aufgefächert, dessen Innenradius **R** sich mit fortschreitender Wegstrecke im ersten Plan-Axikon **101** vergrößert. An einer Grenzfläche **104** zwischen dem ersten Plan-Axikon **101** und dem zweiten Plan-Axikon **102** wird der Ringstrahl **2** erneut gebrochen. Da die Brechzahl n_1 des ersten Plan-Axikons **101** größer ist als die Brechzahl n_2 des zweiten Plan-Axikons **102**, wird der Ringstrahl **2** weiter aufgeweitet.

[0086] Beim Auftreffen auf die Austrittsfläche **105** des Galilei-Axikons **100'** wird der Ringstrahl **2** unter einem Öffnungswinkel β wieder zusammengeführt und bildet am Ort der Überlagerung einen Linienfokus **3** mit einer Länge L_f aus. In diesem Linienfokus L_f ist das Werkstück **50** zur Bearbeitung angeordnet.

[0087] **Fig. 5** zeigt eine optischen Einrichtung **10**, die als Kepler-Axikon **100''** ausgebildet ist, welches aus einem ersten Plan-Axikon **101** mit einer Brechzahl n_1 und einem zweiten Plan-Axikon **102** mit einer Brechzahl n_2 zusammengesetzt ist, wobei im hier vorliegenden Beispiel die Brechzahl n_1 größer ist als die Brechzahl n_2 . Das erste Plan-Axikon **101** besitzt einen Axikonwinkel α_1 und das zweite Plan-Axikon einen Axikonwinkel α_2 , wobei α_1 kleiner ist als α_2 . Die Kegelfläche **114** des ersten Plan-Axikons **101** bildet die Eintrittsfläche **110** des Kepler-Axikons **100''**, während die Kegelfläche **124** des zweiten Plan-Axikons **102** sowohl die Austrittsfläche **105** des Kepler-Axikons **100''** als auch die Austrittsfläche **120** der optischen Einrichtung **10** bildet.

[0088] Der auf die Eintrittsfläche **110** des Kepler-Axikons **100''** treffende Gaußstrahl **6** wird an der Eintrittsfläche **110** gebrochen und aufgrund der der Ausbreitungsrichtung entgegen gerichteten Kegelspitze **112** des ersten Plan-Axikons **101** im Kepler-Axikon **100''** zusammengeführt, wobei es zur Strahlkreuzung

und der Entstehung eines Zwischenfokus **4** mit der Länge L_z kommt.

[0089] An der Grenzfläche **104** wird der Laserstrahl **6** erneut gebrochen und hinter dem Zwischenfokus **4** entsteht ein Ringstrahl **2** mit dem Innenradius **R**, der sich mit fortschreitender Wegstrecke im Kepler-Axikon **100''** vergrößert. Aufgrund der niedrigeren Brechzahl n_2 des zweiten Plan-Axikons **102** wird der Ringstrahl **2** hinter dem Zwischenfokus **4** stärker aufgeweitet. Auf diese Weise wird ein steilerer Einfallswinkel auf die Austrittsfläche **105** des Kepler-Axikons **100''** erzielt als beispielsweise bei einem monolithischen Kepler-Axikon **100''** mit denselben Abmessungen. Beim Passieren der Austrittsfläche **105** des Kepler-Axikons **100''** wird der Ringstrahl **2** unter einem Öffnungswinkel β' wieder zusammengeführt und bildet am Ort der Überlagerung einen Linienfokus **3** mit einer Länge L_f aus.

[0090] Ein steiler Einfallswinkel auf die Austrittsfläche **105** führt dazu, dass der Ringstrahl **2** hinter dem Kepler-Axikon **100''** eine geringere Ringdicke und folglich eine höhere Energiedichte besitzt. Bei der Überlagerung des Ringstrahls **2** im Linienfokus **3** führt dies dazu, dass der zur Bearbeitung des Werkstücks **50** verwendete Linienfokus **3** im Vergleich zu dem eines monolithischen Kepler-Axikons **100''** mit den selben Abmessungen kürzer ist, aber eine höhere Energiedichte besitzt.

[0091] Der im Kepler-Axikon **100''** entstandene Zwischenfokus **4** hat eine Länge L_z , die abhängig von den Brechzahlen n_1 und n_2 sowie dem Axikonwinkel α_1 des ersten Plan-Axikons **101** ist. Im vorliegenden Beispiel, ist der Zwischenfokus **4** etwa dreimal so lang wie der Linienfokus **3** und besitzt demnach eine deutlich geringere Energiedichte.

[0092] **Fig. 6** zeigt eine optischen Einrichtung **10**, die als Galilei-Axikon **100'** ausgebildet ist, welches aus einem ersten Plan-Axikon **101** mit einer Brechzahl n_1 und einem zweiten Plan-Axikon **102** mit einer Brechzahl n_2 zusammengesetzt ist, wobei im hier vorliegenden Beispiel die Brechzahl n_1 größer ist als die Brechzahl n_2 und sich zwischen den beiden Plan-Axikons **101**, **102** ein Zwischenkörper **103** mit einer Brechzahl n_z befindet. Der Zwischenkörper **103** ist an seinen Seitenflächen mit den Planflächen der beiden Plan-Axikons **101**, **102** verkittet.

[0093] Vorzugsweise besitzt der Zwischenkörper **103** eine Brechzahl n_z , die eine radiale Abhängigkeit aufweist, mit Hilfe derer die Intensitätsverteilung eines im Werkstück zu erzeugenden Linienfokus **3** derart angepasst werden kann, dass sie von der Intensitätsverteilung des Bessel-Gauß-Strahls abweicht. In der hier vorliegenden **Fig. 6** wurde die Brechzahl n_z des Zwischenkörpers **103** im Sinne der Übersichtlichkeit

keit der Strahlführung als konstant angenommen, wobei gilt: $n_1 > n_z > n_2$.

[0094] Das erste Plan-Axikon **101** besitzt einen Axikonwinkel α_1 und das zweite Plan-Axikon einen Axikonwinkel α_2 , wobei α_1 kleiner ist als α_2 . Die Kegelfläche **114** des ersten Plan-Axikons **101** bildet die Eintrittsfläche **110** des Galilei-Axikons **100'**, während die Kegelfläche **124** des zweiten Plan-Axikons **102** sowohl die Austrittsfläche **105** des Galilei-Axikons **100'** als auch die Austrittsfläche **120** der optischen Einrichtung **10** bildet.

[0095] Der auf die Eintrittsfläche **110** des Galilei-Axikons **100'** treffende Gaußstrahl **6** wird an der Eintrittsfläche **110** in einen Ringstrahl **2** aufgefächert, dessen Innenradius **R** sich mit fortschreitender Wegstrecke im ersten Plan-Axikon **101** vergrößert. An der Grenzfläche zum Zwischenkörper **103** wird der Ringstrahl **2** erneut gebrochen. Da die Brechzahl n_1 des ersten Plan-Axikons **101** größer ist als die Brechzahl n_z des Zwischenkörpers **103** wird der Ringstrahl **2** weiter aufgeweitet. An der Grenzfläche zwischen Zwischenkörper **103** und zweitem Plan-Axikon **102** wird der Gaußstrahl erneut vom Lot der Grenzfläche weggebrochen und weiter aufgeweitet.

[0096] Beim Auftreffen auf die Austrittsfläche **105** des Galilei-Axikons **100'** wird der Ringstrahl **2** gemäß dem Brechungsgesetz vom Lot der Austrittsfläche **105** weggebrochen, da der Ringstrahl **2** vom optisch dichteren Medium in das optisch dünnere Medium übergeht. Im dargestellten Ausführungsbeispiel sind die Axikonwinkel α_1 , α_2 und die Brechzahlen n_1 , n_2 , n_z so konfiguriert, dass der Ringstrahl **2** erst mittels einer Sammellinse **106**, welche hinter dem Galilei-Axikon **100'** angeordnet ist, in einen Linienfokus **3** mit einer Länge L_f fokussiert wird. Der Linienfokus **3** durchdringt das Werkstück **50** vollständig.

[0097] Beispielhaft zeigt die **Fig. 7** die Intensitätsverteilung im Linienfokus **3** eines Galilei-Axikons **100'** entlang Strahlrichtung (z-Richtung). Die Länge L_f des Linienfokus **3** entspricht der Breite der Intensitätsverteilung bei halber maximaler Intensität $I_{\max}$.

[0098] Der von einem Laser emittierte Gaußstrahl **6** hat sein Intensitätsmaximum in seiner radialen Mitte. Aufgrund der Auffächerung des Gaußstrahls **6** beim Passieren des Galilei-Axikons **100'**, befindet sich das Intensitätsmaximum $I_{\max}$ des Ringstrahls **2** auf dessen Innenseite und führt dazu, dass der Linienfokus **3** eine höhere Intensität im vorderen Bereich der dargestellten Intensitätsverteilung aufweist.

[0099] Bei einem Kepler-Axikon **100''** dagegen befindet sich das Intensitätsmaximum im hinteren Bereich der Intensitätsverteilung (nicht dargestellt), da sich aufgrund der Strahlkreuzung im Kepler-Axikon

100'' die maximale Intensität $I_{\max}$ des Ringstrahls **2** auf dessen Außenseite befindet.

Bezugszeichenliste

1	Vorrichtung
2	Ringstrahl
3	Linienfokus
4	Zwischenfokus
5	Laser
6	Laserstrahl, Gaußstrahl
10	Optische Einrichtung
50	Werkstück
100	Doppelaxikon
100'	Galilei-Axikon
100''	Kepler-Axikon
101	Erstes Planaxikon
102	Zweites Planaxikon
103	Zwischenkörper
104	Grenzfläche
105	Austrittsfläche des Doppelaxikons
106	Sammellinse
110	Eintrittsfläche
112	Spitze
114	Kegelfläche
120	Austrittsfläche der optischen Einrichtung 10
122	Spitze
124	Kegelfläche
P	Optische Achse
R	Innenradius des Ringstrahls
α_1	erster Axikonwinkel
α_2	zweiter Axikonwinkel
β, β'	Öffnungswinkel
L_f	Länge des Linienfokus
L_z	Länge des Zwischenfokus
N	Normale zur Kegelachse

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

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

Zitierte Patentliteratur

- EP 2754524 A1 [0010]

Zitierte Nicht-Patentliteratur

- John H. McLeod: The Axicon: A New Type of Optical Element. J. Opt. Soc. Am. / Vol. 44, No. 8, August 1954 [0006]
- Niklas Weber et al.: Highly compact imaging using Bessel beams generated by ultraminiaturized multi-microaxicon systems. J. Opt. Soc. Am. / Vol. 29, No. 5, May 2012 [0008]
- R. Kampmann et al.: Optical systems for trapping particles in air. Applied Optics / Vol. 53, No. 4, February 2014 [0009]
- Brzobohatý, Oto; Cižmár, Tomáš; Zemánek, Pavel (2008): High quality quasi-Bessel beam generated by round-tip axicon. In: Opt. Express 16 (17), S. 12688 [0019]
- J. Durnin, J. J. Miceli Jr., J. H. Eberly (1988): Comparison of Bessel and Gaussian beams. In: Opt. Lett. 13 (2), S. 79-80 [0019]
- Jarutis, V.; Paškauskas, R.; Stabinis, A. (2000) : Focusing of Laguerre-Gaussian beams by axicon. In: Optics Communications 184 (1-4), S. 105-112 [0019]

Patentansprüche

1. Vorrichtung (1) zum laserbasierten Trennen eines transparenten, sprödbrechenden Werkstücks (50) mit einem Laser (5), der einen Laserstrahl (6) mit einer Intensität I_L entlang einer optischen Achse (P) emittiert, und einer optischen Einrichtung (10), **dadurch gekennzeichnet**, dass die optische Einrichtung (10) mindestens ein einteiliges Doppelaxikon (100) aufweist, wobei das Doppelaxikon (100) eine Eintrittsfläche (110) und die optische Einrichtung (10) eine Austrittsfläche (120) aufweist, dass die Eintrittsfläche (110) derart ausgebildet ist, dass im Doppelaxikon (100) ein Ringstrahl (2) gebildet wird, dass die Intensität I_L im Doppelaxikon (100) kleiner ist als die Schwellintensität I_S des Materials des Doppelaxikons (100), und dass die Austrittsfläche (120) derart ausgebildet ist, dass in Richtung des Laserstrahls hinter der Austrittsfläche (120) ein Linienfokus (3) mit einer maximalen Intensität $I_{\max}$ und einer Länge L_f entsteht.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Doppelaxikon (100) ein Galilei-Axikon (100') ist.

3. Vorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Doppelaxikon (100) ein Kepler-Axikon (100'') ist.

4. Vorrichtung nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das einteilige Doppelaxikon (100) monolithisch ist.

5. Vorrichtung nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Doppelaxikon (100) eine Brechzahl von $1,35 \leq n_a \leq 1,9$ hat.

6. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Doppelaxikon (100) aus einem ersten Plan-Axikon (101) und einem zweiten Plan-Axikon (102) zusammengesetzt ist.

7. Vorrichtung nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass das erste Plan-Axikon (101) und das zweite Plan-Axikon (102) mittelbar über einen transparenten Zwischenkörper (103) oder unmittelbar miteinander verbunden sind.

8. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 6 oder 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass das erste Plan-Axikon (101) eine Brechzahl n_1 und das zweite Plan-Axikon (102) eine Brechzahl n_2 besitzt, wobei gilt: $n_1 = n_2$.

9. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 6 oder 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass das erste Plan-Axikon

(101) eine Brechzahl n_1 und das zweite Plan-Axikon (102) eine Brechzahl n_2 besitzt, wobei gilt: $n_1 \neq n_2$.

10. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 6 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Brechzahlen n_1 und/oder n_2 eine radiale Abhängigkeit aufweisen.

11. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 7 bis 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Zwischenkörper (103) eine Brechzahl $1,35 \leq n_z \leq 1,9$ hat.

12. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 7 bis 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Brechzahl n_z des Zwischenkörpers (103) eine radiale Abhängigkeit aufweist.

13. Vorrichtung nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Laserstrahl (6) nach Passieren der optischen Einrichtung (10) einen Öffnungswinkel β aufweist mit $5^\circ \leq \beta \leq 20^\circ$.

14. Vorrichtung nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Austrittsfläche (120) der optischen Einrichtung (10) Teil einer Linse (106) zur Fokussierung des Ringstrahls (2) ist.

15. Vorrichtung nach Anspruch 14, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Linse (106) eine Sammellinse (106) oder ein Axikon (106) ist.

16. Verfahren zum laserbasierten Trennen eines transparenten, sprödbrechenden Werkstücks (50), bei dem ein Laserstrahl (6) eines gepulsten Lasers (5) mit einer Wellenlänge λ zum Bearbeiten auf das Werkstück (50) gerichtet wird, wobei mittels einer im Strahlengang des Lasers (5) positionierten optischen Einrichtung (10) der Laserstrahl (6) einen Linienfokus (3) mit einer Länge L_f hinter der optischen Einrichtung (10) ausbildet, wobei das Werkstück (50) so positioniert wird, dass der Linienfokus (3) wenigstens teilweise im Werkstück (50) liegt, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Vorrichtung (1) nach Anspruch 1 verwendet wird.

17. Verfahren nach Anspruch 16, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Werkstück (50) derart positioniert wird, dass die maximale Intensität $I_{\max}$ im Werkstück (50) liegt.

18. Verfahren nach Anspruch 16 oder 17, **dadurch gekennzeichnet**, dass die maximale Intensität $I_{\max}$ derart eingestellt wird, dass die maximale Intensität $I_{\max}$ größer ist als die Schwellintensität I_S des Materials des Werkstücks (50).

19. Verfahren nach einem der Ansprüche 16 bis 18, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Länge L_f des Linienfokus (3) derart eingestellt wird, dass L_f kleiner ist als die Dicke des Werkstücks (50).

20. Verfahren nach einem der Ansprüche 16 bis 18, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Länge L_f des Linienfokus (3) derart eingestellt wird, dass L_f größer ist als die Dicke des Werkstücks (50).

21. Verfahren nach einem der Ansprüche 16 bis 20, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Linienfokus (3) derart eingestellt und das Werkstück (50) derart positioniert wird, dass wenigstens eine der beiden gegenüberliegenden Oberflächen des Werkstücks (50) vom Linienfokus (3) durchquert wird.

22. Verfahren nach einem der Ansprüche 16 bis 21, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Laser (5) verwendet wird, dessen Laserstrahl (6) vor der Eintrittsfläche (110) des Doppelaxikons (100) folgende Parameter aufweist:
Pulsenergie E_p 50 μ J bis 10 mJ,
Wellenlänge $\lambda = 0,2$ bis 20 μ m,
Pulsdauer $D_p = 0,1$ bis 100 ps.

23. Verfahren nach Anspruch 21, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Laser (5) verwendet wird, dessen Laserstrahl (6) eine Pulsenergie E_p von 500 μ J bis 5 mJ aufweist.

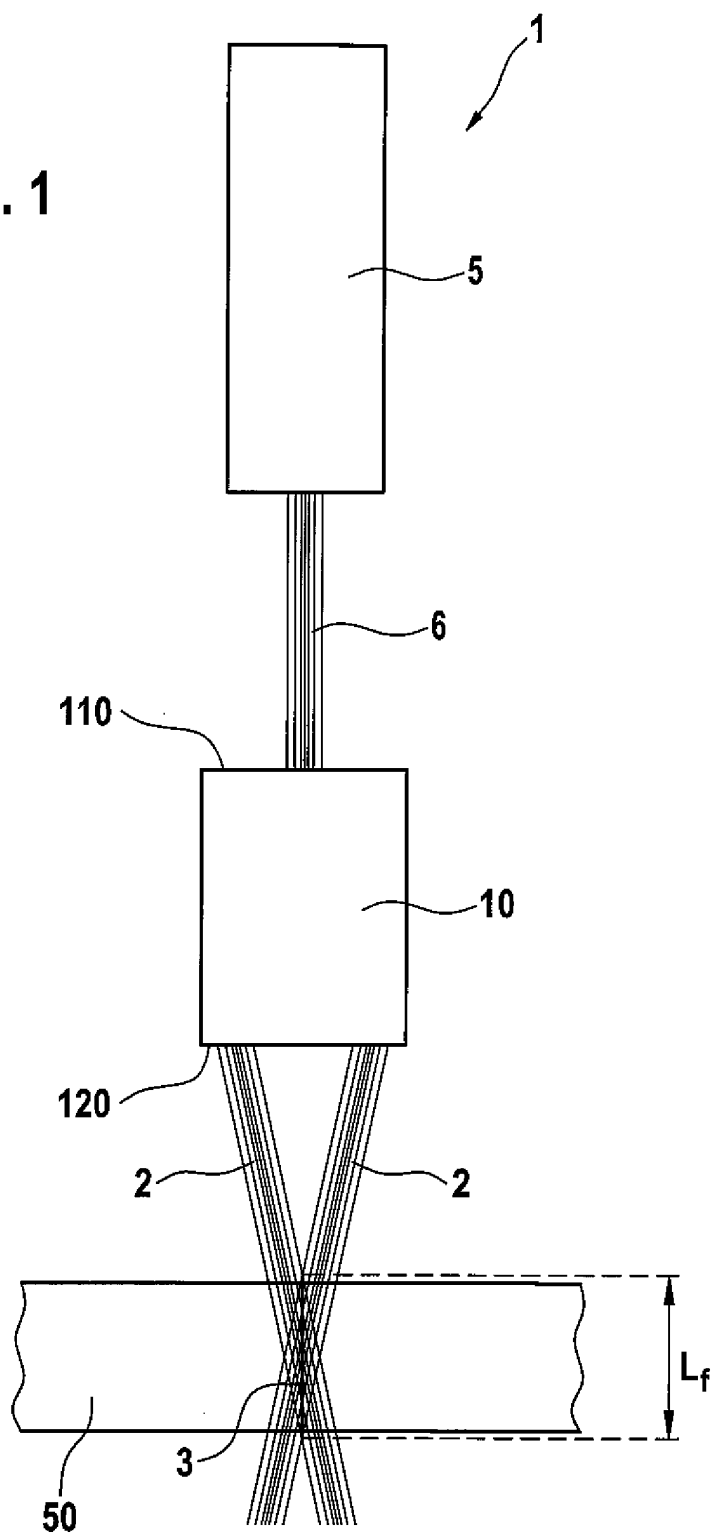
24. Verfahren nach Anspruch 22 oder 23, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Laser (5) verwendet wird, dessen Wellenlänge λ 0,4 bis 11 μ m beträgt.

25. Verfahren nach einem der Ansprüche 22 bis 24, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Laser (5) verwendet wird, dessen Pulsdauer D_p 5 bis 15 ps beträgt.

Es folgen 5 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Fig. 1



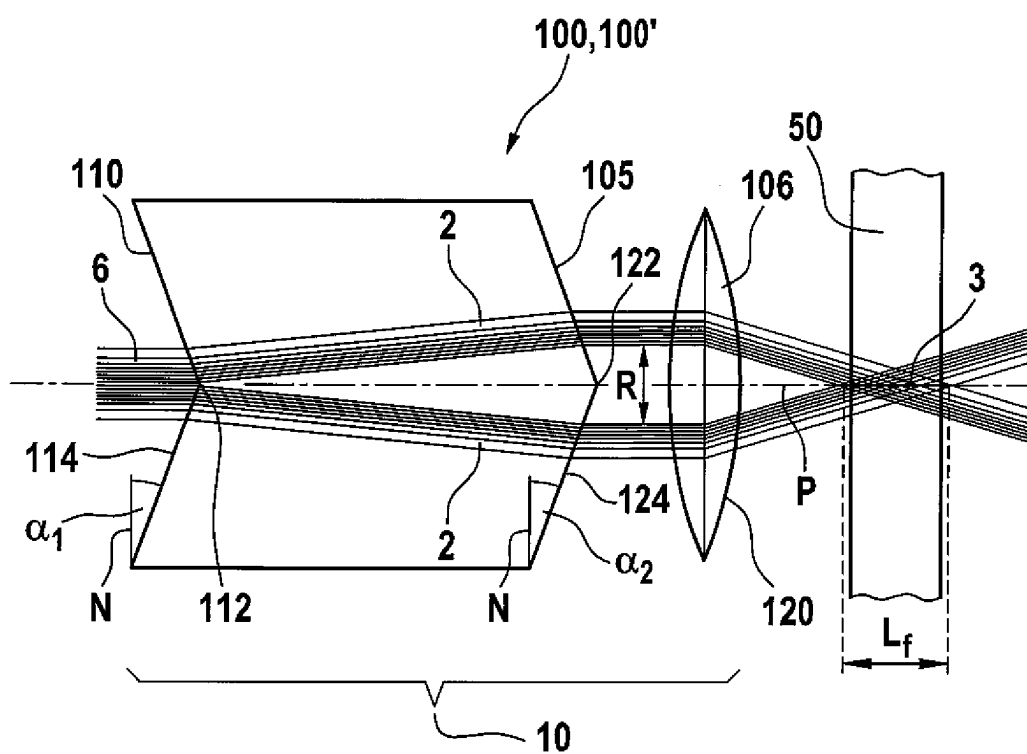


Fig. 2

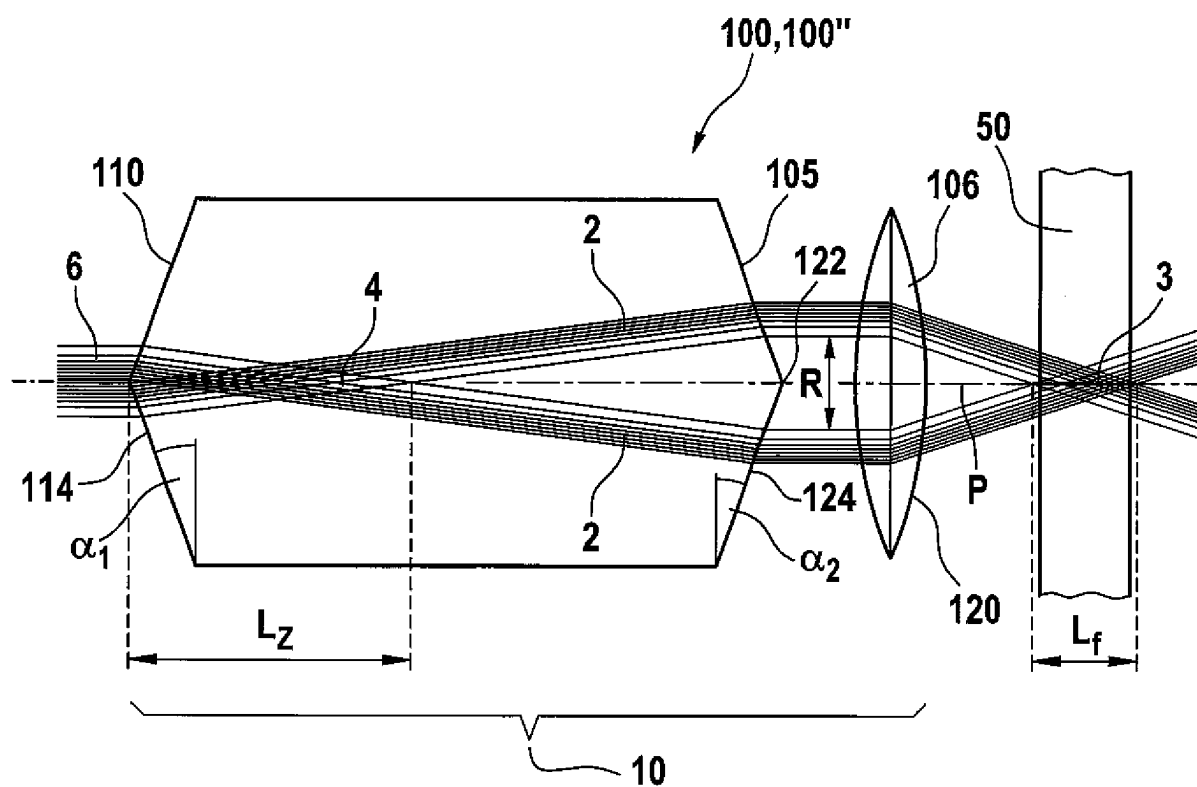


Fig. 3

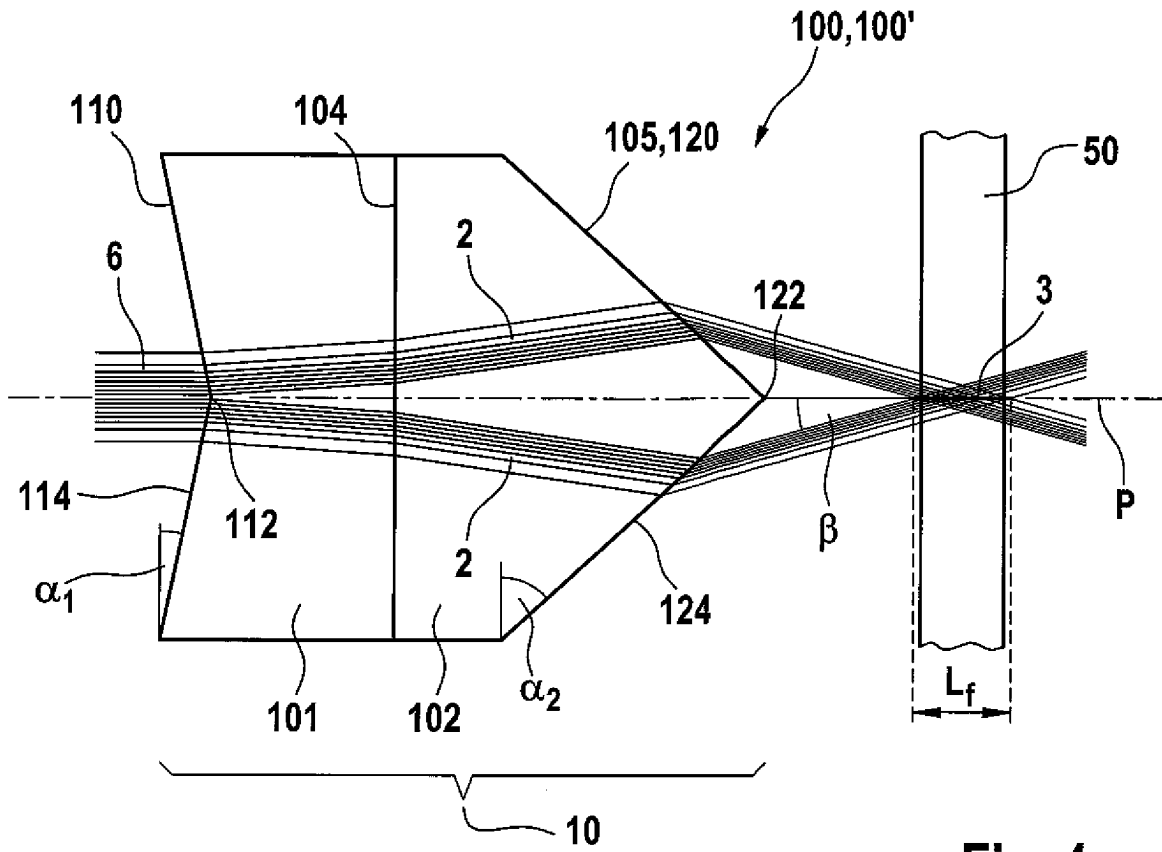


Fig. 4

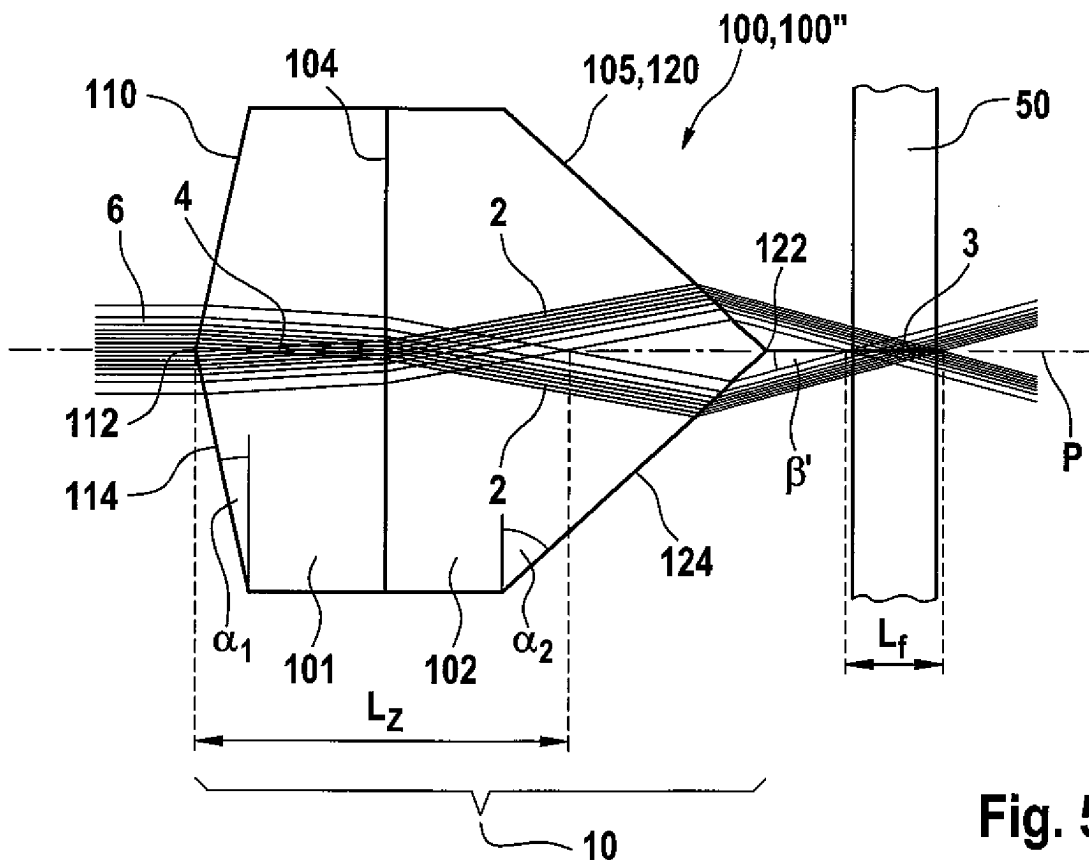


Fig. 5

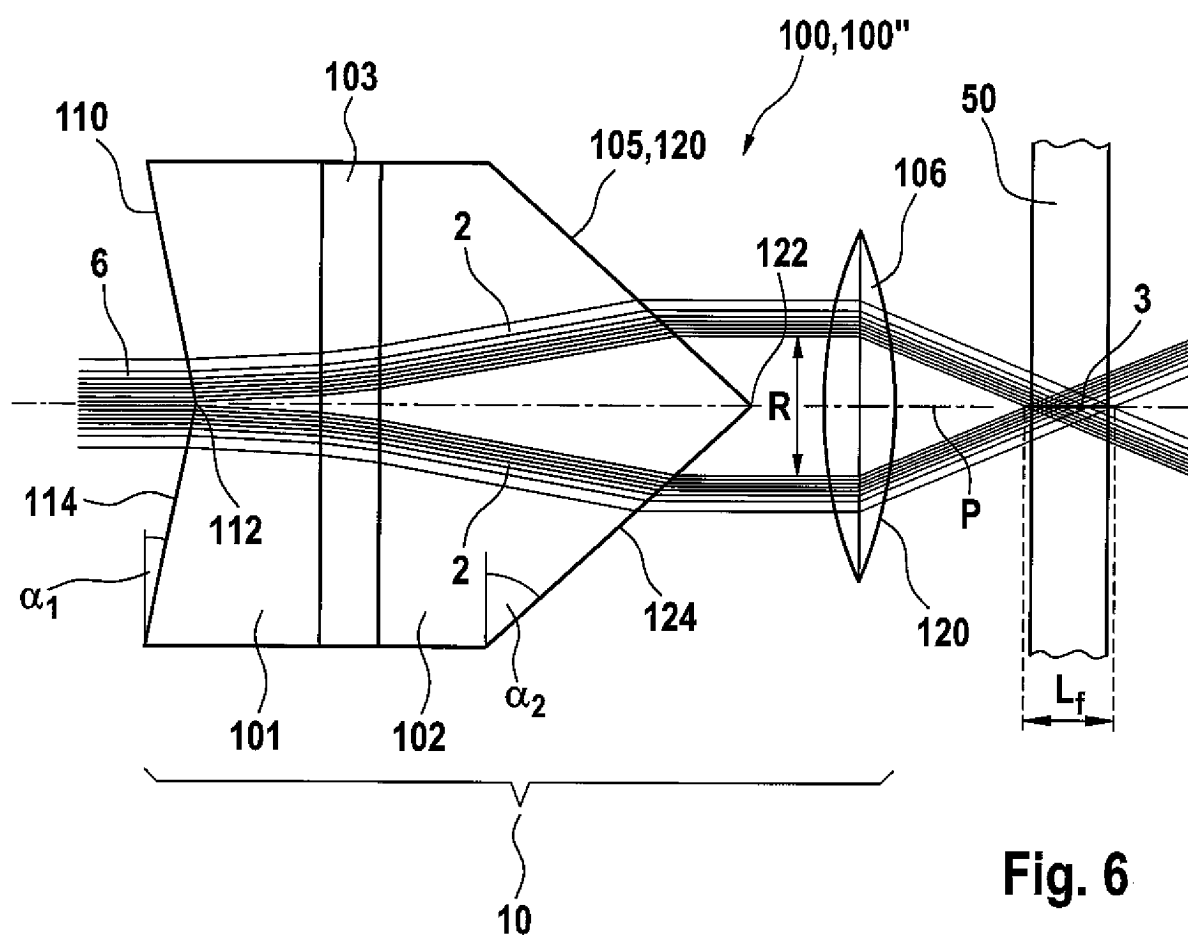
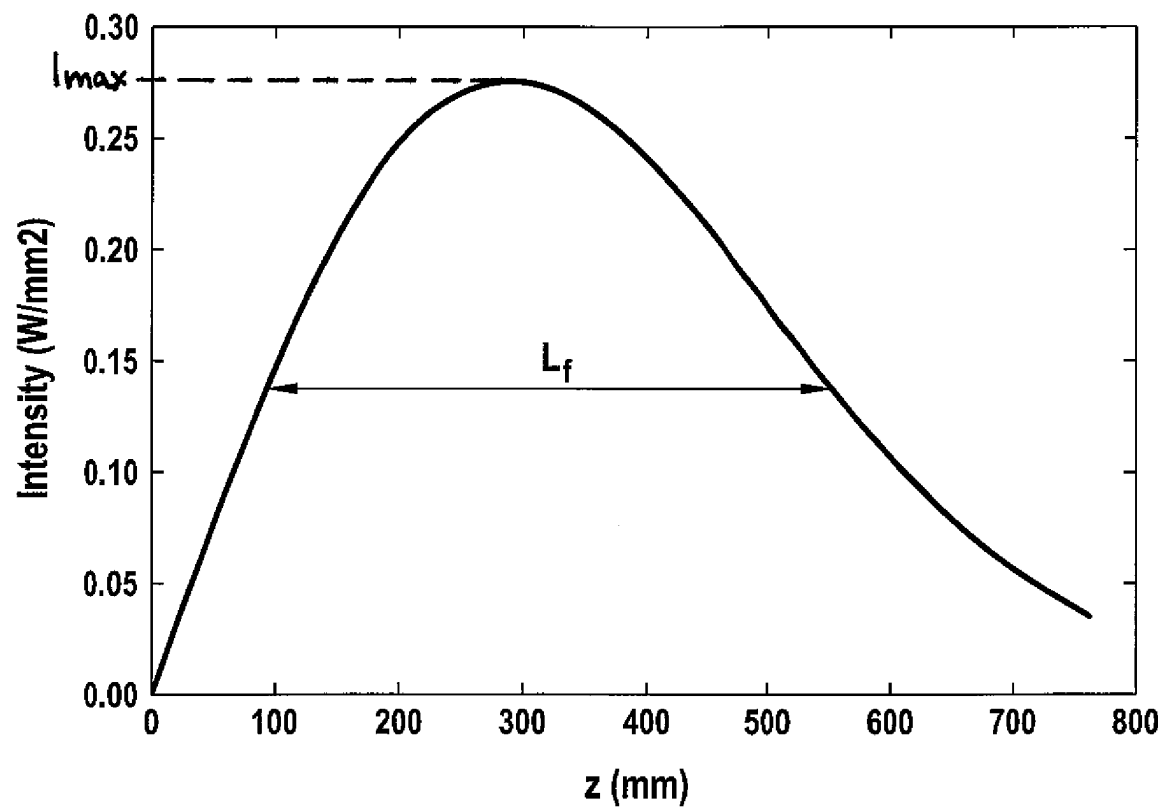


Fig. 6

**Fig. 7**