



(10) **DE 10 2021 108 509 A1 2022.08.04**

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2021 108 509.8**  
(22) Anmeldetag: **06.04.2021**  
(43) Offenlegungstag: **04.08.2022**

(51) Int Cl.: **B23K 26/073 (2006.01)**  
**B23K 26/067 (2006.01)**  
**B23K 26/064 (2014.01)**  
**B23K 26/06 (2014.01)**  
**B23K 26/53 (2014.01)**  
**C03B 33/00 (2006.01)**

(66) Innere Priorität  
**10 2021 102 391.2 02.02.2021**

(71) Anmelder:  
**TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH, 71254  
Ditzingen, DE**

(74) Vertreter:  
**Kümmel, Felix, Dipl.-Phys. Dr. rer. nat., 71254  
Ditzingen, DE**

(72) Erfinder:  
**Kleiner, Jonas, 71229 Leonberg, DE; Flamm,  
Daniel, 70806 Kornwestheim, DE; Kaiser, Myriam,  
71296 Heimsheim, DE**

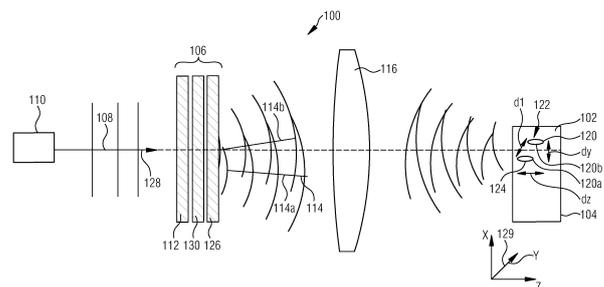
(56) Ermittelter Stand der Technik:  
**siehe Folgeseiten**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

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

(54) Bezeichnung: **Vorrichtung und Verfahren zur Laserbearbeitung eines Werkstücks**

(57) Zusammenfassung: Die vorliegende Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur Laserbearbeitung eines Werkstücks (104), welches ein für die Laserbearbeitung transparentes Material (102) aufweist, umfassend eine erste Strahlformungseinrichtung (106) mit einem Strahlteilungselement (112) zur Aufteilung eines in die erste Strahlformungseinrichtung (106) eingekoppelten ersten Eingangsstrahls (108) in eine Mehrzahl von Teilstrahlen (114), und eine der ersten Strahlformungseinrichtung (106) zugeordnete Fokussieroptik (116) zur Abbildung von aus der ersten Strahlformungseinrichtung (106) ausgekoppelten Teilstrahlen (114) in mindestens eine Fokuszone (122), wobei die Aufteilung des ersten Eingangsstrahls (108) mittels dem Strahlteilungselement (112) durch Phasenaufprägung auf den ersten Eingangsstrahl (108) erfolgt, die Teilstrahlen (114) zur Ausbildung der mindestens einen Fokuszone (122) in unterschiedliche Teilbereiche (120) der mindestens einen Fokuszone (122) fokussiert werden, zur Laserbearbeitung des Werkstücks (104) die mindestens eine Fokuszone (122) mittels der Fokussieroptik (116) unter mindestens einem Anstellwinkel ( $\alpha$ ) zu einer Außenseite (144; 146) des Werkstücks (104) in das Material (102) eingebracht wird und wobei durch Beaufschlagung des Materials (102) mittels der mindestens einen Fokuszone (122) Materialmodifikationen (156) in dem Material (102) erzeugt werden, welche mit einer Änderung eines Brechungsindex des Materials (102) assoziiert sind.



(56) Ermittelte Stand der Technik:

DE	10 2019 217 577	A1
US	2019 / 0 135 678	A1
US	2020 / 0 147 729	A1
WO	2017/ 073 907	A1
WO	2018/ 182 946	A1
JP	2006- 68 762	A
JP	2011- 67 873	A

CHREMMOS, Ioannis D. [u.a.]: Bessel-like optical beams with arbitrary trajectories. In: Optics Letters, Vol. 37, 2012, No. 23, S. 5003-5005. - ISSN 0146-9592 (P); 1539-4794 (E). DOI: 10.1364/OL.37.005003. URL: <https://www.osapublishing.org/ol/viewmedia.cfm?uri=ol-37-23-5003&seq=0> [abgerufen am 2021-03-04]

DICKEY, Fred M. (Hrsg.): Laser beam shaping : theory and techniques. 2. ed. Boca Raton, Fla. : CRC Press, 2014. Deckblatt und Inhaltsverzeichnis. - ISBN 978-1-4665-6100-7. URL: [www.gbv.de/dms/tib-ub-hannover/780748743.pdf](http://www.gbv.de/dms/tib-ub-hannover/780748743.pdf) [abgerufen am 2018-02-12]

EFREMIDIS, Nikolaos K. ; CHRISTODOULIDES, Demetrios N.: Abruptly autofocusing waves. In: Optics Letters (OL), Vol. 35, 2010, No. 23, S. 4045-4047. - ISSN 0146-9592 (P); 1539-4794 (E). DOI: 10.1364/OL.35.004045. URL: <https://www.osapublishing.org/ol/viewmedia.cfm?uri=ol-35-23-4045&seq=0> [abgerufen am 2021-05-17]

FLAMM, Daniel [u.a.]: Structured light for ultrafast laser micro- and nanoprocessing. 18-12-2020. arXiv:2012.10119v1. S. 1-18. URL: <https://arxiv.org/pdf/2012.10119v1> [abgerufen am 2021-03-17]

ITOH, Kazuyoshi [u.a.]: Ultrafast processes for bulk modification of transparent materials. In: MRS Bulletin, Vol. 31, 2006, No. 8, S. 620-625. - ISSN 0883-7694 (P); 1938-1425 (E). DOI: 10.1557/mrs2006.159. URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1557/mrs2006.159.pdf> [abgerufen am 2021-02-09]

PAPAZOGLU, Dimitrios G. [u.a.]: Observation of abruptly autofocusing waves. In: Optics Letters (OL), Vol. 36, 2011, No. 10, S. 1842-1844. - ISSN 0146-9592 (P); 1539-4794 (E). DOI: 10.1364/OL.36.001842. URL: <https://www.osapublishing.org/ol/viewmedia.cfm?uri=ol-36-10-1842&seq=0> [abgerufen am 2021-05-17]

## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur Laserbearbeitung eines Werkstücks, welches ein für die Laserbearbeitung transparentes Material aufweist.

**[0002]** Weiter betrifft die Erfindung ein Verfahren zur Laserbearbeitung eines Werkstücks, welches ein für die Laserbearbeitung transparentes Material aufweist.

**[0003]** Aus der US 2020/0147729 A1 ist ein Verfahren zur Ausbildung eines abgeschrägten Kantenbereichs an einem Glassubstrat mittels eines Laserstrahls bekannt, wobei eine Form des abgeschrägten Kantenbereichs durch Anpassung einer axialen Energieverteilung des Laserstrahls angepasst wird.

**[0004]** Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine eingangs genannte Vorrichtung und ein eingangs genanntes Verfahren bereitzustellen, welche flexibel und vielseitig einsetzbar sind und mittels welchen insbesondere eine Laserbearbeitung des Werkstücks entlang unterschiedlicher Bearbeitungsgeometrien auf technisch einfache Weise durchführbar ist.

**[0005]** Diese Aufgabe wird bei der eingangs genannten Vorrichtung erfindungsgemäß dadurch gelöst, dass die Vorrichtung eine erste Strahlformungseinrichtung mit einem Strahlteilungselement zur Aufteilung eines in die erste Strahlformungseinrichtung eingekoppelten ersten Eingangsstrahls in eine Mehrzahl von Teilstrahlen umfasst, und eine der ersten Strahlformungseinrichtung zugeordnete Fokussieroptik zur Abbildung von aus der ersten Strahlformungseinrichtung ausgekoppelten Teilstrahlen in mindestens eine Fokuszone, wobei die Aufteilung des ersten Eingangsstrahls mittels dem Strahlteilungselement durch Phasenaufprägung auf den ersten Eingangsstrahl erfolgt, die Teilstrahlen zur Ausbildung der mindestens einen Fokuszone in unterschiedliche Teilbereiche der mindestens einen Fokuszone fokussiert werden, zur Laserbearbeitung des Werkstücks die mindestens eine Fokuszone mittels der Fokussieroptik unter mindestens einem Anstellwinkel zu einer Außenseite des Werkstücks in das Material eingebracht wird und wobei durch Beaufschlagung des Materials mittels der mindestens einen Fokuszone Materialmodifikationen in dem Material erzeugt werden, welche mit einer Änderung eines Brechungsindex des Materials assoziiert sind.

**[0006]** Durch Aufteilung des ersten Eingangsstrahls mittels dem Strahlteilungselement basierend auf Phasenaufprägung und anschließendes Fokussieren der ausgebildeten Teilstrahlen lässt sich die min-

destens eine Fokuszone auf technisch einfache Weise mit unterschiedlichen Geometrien ausbilden. Die mindestens eine Fokuszone lässt sich dadurch insbesondere mit unterschiedlichen Abschnitten ausbilden, welche jeweils eine unterschiedliche Geometrie und/oder einen unterschiedlichen Anstellwinkel aufweisen. Es lässt sich dadurch auf technisch einfache Weise eine Laserbearbeitung des Werkstücks mit unterschiedlichen Bearbeitungsgeometrien erreichen.

**[0007]** Bei der erfindungsgemäßen Lösung lässt sich insbesondere die mindestens eine Fokuszone unter dem Anstellwinkel in das Material einbringen, ohne dass hierfür ein Anstellen einer Optik bezüglich dem Werkstück erforderlich ist.

**[0008]** Darunter, dass die Materialmodifikationen mit einer Änderung des Brechungsindex des Materials assoziiert sind, ist insbesondere zu verstehen, dass die Materialmodifikationen mit einer Änderung des Brechungsindex des Materials einhergehen und/oder dass bei Ausbildung der Materialmodifikationen eine Änderung des Brechungsindex im Material erfolgt.

**[0009]** Das Strahlteilungselement ist insbesondere als diffraktives Strahlteilungselement ausgebildet und/oder als 3D-Strahlteilungselement ausgebildet. Mittels dem Strahlteilungselement erfolgt vorzugsweise eine Phasenaufprägung auf einen Strahlquerschnitt des ersten Eingangsstrahls.

**[0010]** Insbesondere erfolgt die Aufteilung des ersten Eingangsstrahls mittels dem Strahlteilungselement durch reine Phasenmanipulation der Phase des ersten Eingangsstrahls. Insbesondere ist die mittels dem Strahlteilungselement durchgeführte Phasenaufprägung auf den ersten Eingangsstrahl variabel einstellbar und/oder definierbar.

**[0011]** Insbesondere kann es vorgesehen sein, dass die mindestens eine Fokuszone eine Mehrzahl von Fokusverteilungen aufweist und/oder aus einer Mehrzahl von Fokusverteilungen gebildet ist. Beispielsweise sind die Fokusverteilungen in den unterschiedlichen Teilbereichen der Fokuszone angeordnet.

**[0012]** Jeweilige Fokusverteilungen der Fokuszone sind in der Fokuszone insbesondere zueinander beabstandet angeordnet. Es ist allerdings möglich, dass sich die jeweiligen Fokusverteilungen zumindest abschnittsweise räumlich überlappen.

**[0013]** Insbesondere erstreckt sich die mindestens eine Fokuszone in einer Ebene. Vorzugsweise sind die Fokusverteilungen, aus welchen die mindestens eine Fokuszone gebildet ist, in einer Ebene angeordnet. Insbesondere ist diese Ebene senkrecht zu einer

Vorschubrichtung orientiert, in welche die mindestens eine Fokuszone zur Laserbearbeitung des Werkstücks relativ zu dem Werkstück bewegt wird.

**[0014]** Insbesondere ist jeder Fokusverteilung der mindestens einen Fokuszone ein Linsenanteil und/oder Gitteranteil der mittels dem Strahlteilungsselement aufgeprägten Phasenverteilung zugeordnet. Insbesondere umfasst die aufgeprägte Phasenverteilung eine Mehrzahl überlagerter Linsenanteile und/oder Gitteranteile, wobei jeder Fokusverteilung der mindestens einen Fokuszone ein Linsenanteil und/oder Gitteranteil zugeordnet ist. Es lassen sich dadurch unterschiedliche Fokusverteilungen der Fokuszone mit einem Ortsversatz in einer zu einer Vorschubrichtung, in welche die Fokuszone zur Laserbearbeitung des Werkstücks relativ zu dem Werkstück bewegt wird, senkrecht orientierten Ebene anordnen.

**[0015]** Beispielsweise ist die erste Strahlformungseinrichtung als Fernfeldstrahlformungselement ausgebildet oder umfasst ein oder mehrere Fernfeldstrahlformungselemente. Die mindestens eine Fokuszone wird beispielsweise durch Fokussierung von aus der ersten Strahlformungseinrichtung ausgekoppelten Teilstrahlen mittels der Fokussieroptik in die jeweiligen Teilbereiche der Fokuszone ausgebildet.

**[0016]** Beispielsweise ist die Fokussieroptik als Mikroskopobjektiv oder Linsenelement ausgebildet.

**[0017]** Bei einer Ausführungsform kann es vorgesehen sein, dass die erste Strahlformungseinrichtung um eine zu einer Haupt-Propagationsrichtung des ersten Eingangsstrahls parallele Achse drehbar ist oder gedreht wird. Es lässt sich dadurch die mindestens eine Fokuszone beispielsweise um eine zu einer Vorschubrichtung, in welche die mindestens eine Fokuszone zur Laserbearbeitung des Werkstücks relativ zu dem Werkstück bewegt wird, senkrecht orientierte Drehachse drehen.

**[0018]** Es kann vorgesehen sein, dass die Fokussieroptik in die erste Strahlformungseinrichtung integriert ist und/oder dass die Fokussieroptik Teil der ersten Strahlformungseinrichtung ist und/oder dass eine Funktionalität der Fokussieroptik in die erste Strahlformungseinrichtung integriert ist.

**[0019]** Insbesondere ist das Material des Werkstücks aus einem für einen Laserstrahl, aus welchem die mindestens eine Fokuszone gebildet ist, transparenten Material hergestellt.

**[0020]** Unter einem transparenten Material ist insbesondere ein Material zu verstehen, durch welches mindestens 70 % und insbesondere mindestens 80 % und insbesondere mindestens 90 % einer Laser-

energie eines Laserstrahls, aus welchem die mindestens eine Fokuszone gebildet ist, transmittiert wird.

**[0021]** Insbesondere ist der erste Eingangsstrahl ein in die erste Strahlformungseinrichtung und/oder in das Strahlteilungsselement eingekoppelter erster Eingangsstrahl.

**[0022]** Insbesondere kann es vorgesehen sein, dass die mittels der mindestens einen Fokuszone in dem Material erzeugten Materialmodifikationen Typ I und/oder Typ II Modifikationen sind. Es werden dadurch bei der Laserbearbeitung Materialmodifikationen im Material des Werkstücks erzeugt, welche mit einer Änderung des Brechungsindex des Materials einhergehen. An diesen Materialmodifikationen lässt sich insbesondere eine Trennung des Materials durchführen.

**[0023]** Bei einer Ausführungsform umfasst die Vorrichtung eine zweite Strahlformungseinrichtung zur Strahlformung des in die erste Strahlformungseinrichtung eingekoppelten ersten Eingangsstrahls, wobei mittels der zweiten Strahlformungseinrichtung durch Phasenaufprägung auf einen auf die zweite Strahlformungseinrichtung einfallenden zweiten Eingangsstrahl dem ersten Eingangsstrahl eine Fokusverteilung mit einer definierten geometrischen Form und/oder mit einem definierten Intensitätsprofil zugeordnet wird, sodass durch Fokussierung der aus der ersten Strahlformungseinrichtung ausgekoppelten Teilstrahlen mittels der Fokussieroptik in unterschiedlichen Teilbereichen der Fokuszone jeweils Fokusverteilungen basierend auf dieser geometrischen Form und/oder basierend auf diesem Intensitätsprofil ausgebildet werden. Es lässt sich dadurch eine Geometrie von Fokusverteilungen, aus welchen die mindestens eine Fokuszone gebildet ist, anpassen. Dadurch wird ein flexibler und vielseitiger Einsatz der Vorrichtung ermöglicht.

**[0024]** Insbesondere ist die zweite Strahlformungseinrichtung bezüglich einer Haupt-Propagationsrichtung von durch die Vorrichtung geführten Laserstrahlen vor der ersten Strahlformungseinrichtung angeordnet.

**[0025]** Der zweite Eingangsstrahl ist insbesondere ein Eingangsstrahl der zweiten Strahlformungseinrichtung. Beispielsweise ist der zweite Eingangsstrahl ein von einer Laserquelle der Vorrichtung bereitgestellter Laserstrahl mit insbesondere gaußförmigem Strahlprofil.

**[0026]** Insbesondere ist der erste Eingangsstrahl ein aus der zweiten Strahlformungseinrichtung ausgekoppelter Strahl und/oder ein mittels der zweiten Strahlformungseinrichtung bereitgestellter Strahl.

**[0027]** Insbesondere erfolgt mittels der zweiten Strahlformungseinrichtung eine Modifikation und/oder Anpassung einer dem in die zweite Strahlformungseinrichtung eingekoppelten zweiten Eingangsstrahl zugeordneten Fokusverteilung. Insbesondere wird eine mittels der zweiten Strahlformungseinrichtung modifizierte und/oder angepasste Fokusverteilung dem mittels der zweiten Strahlformungseinrichtung bereitgestellten ersten Eingangsstrahl zugeordnet.

**[0028]** Bei einer Ausführungsform kann es vorgesehen sein, dass die zweite Strahlformungseinrichtung um eine zu einer Haupt-Propagationsrichtung des zweiten Eingangsstrahls parallele Achse drehbar ist oder gedreht wird. Es lässt sich dadurch die mindestens eine Fokuszone beispielsweise um eine zu einer Vorschubrichtung, in welche die mindestens eine Fokuszone zur Laserbearbeitung des Werkstücks relativ zu dem Werkstück bewegt wird, senkrecht orientierte Drehachse drehen.

**[0029]** Insbesondere kann es vorgesehen sein, dass die Phasenaufprägung auf den zweiten Eingangsstrahl derart ist, dass die Fokusverteilung bezüglich einer zugeordneten Hauptstreckungsrichtung eine langgezogene Form aufweist, und/oder dass die Phasenaufprägung auf den zweiten Eingangsstrahl derart ist, dass die Fokusverteilung ein quasi-nichtbeugendes und/oder Bessel-artiges Intensitätsprofil aufweist. Es lässt sich dadurch die mindestens eine Fokuszone beispielsweise aus einer Mehrzahl von Fokusverteilungen mit langgezogener Form aufbauen. Dadurch lässt sich insbesondere entsprechend längliche und/oder linienartige Materialmodifikationen ausbilden, wodurch beispielsweise eine verbesserte Einbringung von Ätzflüssigkeit zur Materialtrennung ermöglicht wird.

**[0030]** Die zweite Strahlformungseinrichtung ist oder umfasst insbesondere ein Strahlformungselement zur Durchführung der Phasenaufprägung, z.B. ein diffraktives optisches Element und/oder ein Axiconelement.

**[0031]** Insbesondere ist die Hauptstreckungsrichtung der Fokusverteilung mit langgezogener Form quer und insbesondere senkrecht zu einer Vorschubrichtung orientiert, in welche die mindestens eine Fokuszone zur Laserbearbeitung des Werkstücks relativ zu dem Werkstück bewegt wird.

**[0032]** Günstig kann es sein, wenn die Phasenaufprägung auf den zweiten Eingangsstrahl derart ist, dass die Fokusverteilung bezüglich einer zugeordneten Hauptstreckungsrichtung ein Intensitätsprofil aufweist, welches ausgehend von einer Maximalintensität an einem Intensitätsmaximum des Intensitätsprofils auf das  $1/e^2$ -Fache der Maximalintensität um näherungsweise einen Faktor 3 schneller abfällt als

dies bei einem gaußförmigen Intensitätsprofil der Fall ist, und/oder wenn die Phasenaufprägung auf den zweiten Eingangsstrahl derart ist, dass die Fokusverteilung eine Form und/oder ein Intensitätsprofil eines abrupt-selbstfokussierenden Strahls aufweist. Durch den schnellen Intensitätsabfall dieser Fokusverteilungen ergibt sich eine präzisere Materialbearbeitung bei verringerter Beschädigung des zu bearbeitenden Materials. Das Material lässt sich dadurch insbesondere mit einer besonderen ebenen und/oder glatten Kante trennen.

**[0033]** Beispielsweise ist der Intensitätsabfall von der Maximalintensität auf das  $1/e^2$ -Fache der Maximalintensität um mindestens einen Faktor 2,5 schneller und/oder um höchstens einen Faktor 3,5 schneller als dies bei einem gaußförmigen Intensitätsprofil der Fall ist.

**[0034]** Insbesondere weist das Intensitätsprofil ausgehend von dem Intensitätsmaximum in Hauptstreckungsrichtung eine Intensitätsabfallflanke auf, an welcher der Intensitätsabfall ausgebildet ist. Insbesondere liegt die Intensität des Intensitätsprofils in Hauptstreckungsrichtung auf die Intensitätsabfallflanke folgend unter dem Wert des  $1/e^2$ -Fachen der Maximalintensität.

**[0035]** Vorzugsweise ist die Intensitätsabfallflanke bei Laserbearbeitung des Werkstücks einem Gutsstücksegment zugewandt. Es lässt sich dadurch bei einer Materialtrennung insbesondere eine besonders glatte Schnittkante realisieren.

**[0036]** Das genannte Intensitätsmaximum ist insbesondere ein Hauptmaximum und/oder globales Maximum des Intensitätsprofils. Insbesondere weist das Intensitätsprofil ein oder mehrere Nebenmaxima auf, welche sich an das Intensitätsmaximum entgegen der Hauptstreckungsrichtung anschließen. Insbesondere nimmt eine jeweilige Maximalintensität der Nebenmaxima mit zunehmendem Abstand zu dem Hauptmaximum ab.

**[0037]** Insbesondere liegen die Nebenmaxima bei Laserbearbeitung des Werkstücks in einem Restwerkstücksegment und/oder Verschnittsegment. Es lassen sich dadurch in dem Restwerkstücksegment und/oder Verschnittsegment beispielsweise Risse und/oder Kanäle ausbilden, welche einen Ätzangriff zur Materialtrennung begünstigen.

**[0038]** Die Hauptstreckungsrichtung dieser Fokusverteilungen ist insbesondere parallel oder näherungsweise parallel zu einer Haupt-Propagationsrichtung des zweiten Eingangsstrahls orientiert.

**[0039]** Es kann vorgesehen sein, dass mittels der zweiten Strahlformungseinrichtung ein Zwischenbild der Fokusverteilung ausgebildet wird, wobei insbe-

sondere das Zwischenbild der Fokusverteilung bezüglich einer Haupt-Propagationsrichtung des zweiten Eingangsstrahls vor der ersten Strahlformungseinrichtung angeordnet ist.

**[0040]** Die zweite Strahlformungseinrichtung ist insbesondere als Nahfeldstrahlformungseinrichtung ausgebildet, d.h. eine Abbildung der Fokusverteilung als Zwischenbild erfolgt insbesondere mittels der zweiten Strahlformungseinrichtung.

**[0041]** Das mittels der zweiten Strahlformungseinrichtung ausgebildete Zwischenbild ist insbesondere ein Abbild der Fokusverteilung, welche dem in die erste Strahlformungseinrichtung eingekoppelten ersten Eingangsstrahl zugeordnet ist.

**[0042]** Bei einer Ausführungsform umfasst die Vorrichtung eine der zweiten Strahlformungseinrichtung zugeordnete Fernfeldoptik, wobei mittels der Fernfeldoptik eine Fernfeldfokussierung eines aus der zweiten Strahlformungseinrichtung ausgekoppelten Ausgangsstrahls in eine Brennebene der Fernfeldoptik erfolgt, und wobei insbesondere die erste Strahlformungseinrichtung in einem Bereich dieser Brennebene angeordnet ist.

**[0043]** Insbesondere entspricht dann ein aus der Fernfeldoptik ausgekoppelter Ausgangsstrahl dem in die erste Strahlformungseinrichtung einzukoppelnden ersten Eingangsstrahl.

**[0044]** Unter dem Bereich der Brennebene ist insbesondere ein sich um die Brennebene erstreckender Bereich zu verstehen, welcher insbesondere zu der Brennebene einen maximalen Abstand von 10 % einer Brennweite der Fernfeldoptik aufweist.

**[0045]** Insbesondere kann es vorgesehen sein, dass mittels der Fernfeldoptik eine Fernfeldfokussierung des mittels der zweiten Strahlformungseinrichtung ausgebildeten Zwischenbilds der Fokusverteilung in die Brennebene erfolgt.

**[0046]** Insbesondere erfolgt mittels der Fernfeldoptik eine Fouriertransformation des mittels der zweiten Strahlformungseinrichtung erzeugten Zwischenbilds und/oder der mittels der zweiten Strahlformungseinrichtung erzeugten Fokusverteilung.

**[0047]** Es kann vorgesehen sein, dass die Fernfeldoptik in die zweite Strahlformungseinrichtung integriert ist und/oder dass die Fernfeldoptik Teil der zweiten Strahlformungseinrichtung ist und/oder dass eine Funktionalität der Fernfeldoptik in die zweite Strahlformungseinrichtung integriert ist.

**[0048]** Insbesondere weist eine transversale Intensitätsverteilung des ersten Eingangsstrahls in der

Brennebene eine Ringstruktur und/oder eine Ringsegmentstruktur auf.

**[0049]** Es kann vorgesehen sein, dass die Fernfeldoptik und die Fokussieroptik eine Teleskopeinrichtung ausbilden, und/oder dass die Fernfeldoptik und die Fokussieroptik eine gemeinsame Brennebene aufweisen, wobei insbesondere die erste Strahlformungseinrichtung in einem Bereich dieser gemeinsamen Brennebene angeordnet ist.

**[0050]** Insbesondere ist eine Brennweite der Fernfeldoptik größer als eine Brennweite der Fokussieroptik.

**[0051]** Insbesondere kann es vorgesehen sein, dass dem ersten Eingangsstrahl eine Fokusverteilung mit einer definierten geometrischen Form und/oder mit einem definierten Intensitätsprofil zugeordnet ist, wobei den aus der ersten Strahlformungseinrichtung ausgekoppelten Teilstrahlen ebenfalls diese geometrische Form und/oder dieses Intensitätsprofil zugeordnet ist, und/oder wobei durch Fokussierung der aus der ersten Strahlformungseinrichtung ausgekoppelten Teilstrahlen mittels der Fokussieroptik in unterschiedlichen Teilbereichen der mindestens einen Fokuszone jeweils Fokusverteilungen basierend auf dieser geometrischen Form und/oder basierend auf diesem Intensitätsprofil ausgebildet werden. Es lässt sich dadurch insbesondere die mindestens eine Fokuszone aus zueinander beabstandeten und/oder benachbarten Fokusverteilungen mit definierter Geometrie aufbauen. Weiter ergibt sich dadurch beispielsweise eine Ausbildung der mindestens einen Fokuszone durch Aneinanderreihung von Fokusverteilungen als näherungsweise identische Kopien aufgrund von Strahlteilung mittels des Strahlteilungselements.

**[0052]** Eine Zuordnung einer definierten geometrischen Form und/oder eines definierten Intensitätsprofils zu dem ersten Eingangsstrahl erfolgt beispielsweise mittels einer Laserquelle, welche den ersten Eingangsstrahl bereitstellt. Alternativ hierzu erfolgt die Zuordnung mittels der vorstehend beschriebenen zweiten Strahlformungseinrichtung.

**[0053]** Bei einer Ausführungsform weist der auf das Strahlteilungselement und/oder auf die erste Strahlformungseinrichtung einfallende erste Eingangsstrahl ein gaußförmiges Intensitätsprofil auf, z.B. wenn er direkt aus einer Laserquelle stammt. Dadurch wird dann beispielsweise die mindestens eine Fokuszone aus einer Mehrzahl von benachbarten „Fokuspunkten“ mit gaußförmiger Form und/oder gaußförmigem Intensitätsprofil aufgebaut und/oder ausgebildet.

**[0054]** Günstig kann es sein, wenn die erste Strahlformungseinrichtung ein Strahlformungselement zur

Modifikation der dem ersten Eingangsstrahl zugeordneten Fokusverteilung aufweist, wobei mittels dem Strahlformungselement eine Modifikation und/oder Ausrichtung der geometrischen Form und/oder des Intensitätsprofils der in die mindestens eine Fokuszone abgebildeten Fokusverteilung in einer zu einer Vorschubrichtung, in welche die mindestens eine Fokuszone zur Laserbearbeitung des Werkstücks relativ zu dem Werkstück bewegt wird, senkrecht orientierten Querschnittsebene erfolgt, und/oder wobei mittels dem Strahlformungselement eine Modifikation und/oder Ausrichtung der geometrischen Form und/oder des Intensitätsprofils der in die mindestens eine Fokuszone abgebildeten Fokusverteilung in einer zu einer Vorschubrichtung, in welche die mindestens eine Fokuszone zur Laserbearbeitung des Werkstücks relativ zu dem Werkstück bewegt wird, parallel orientierten Querschnittsebene erfolgt.

**[0055]** Insbesondere ist die zur Vorschubrichtung parallel orientierte Querschnittsebene senkrecht zu einer Haupt-Propagationsrichtung von Strahlen orientiert, aus welchen die Fokusverteilung gebildet wird.

**[0056]** Mittels dem Strahlformungselement der ersten Strahlformungseinrichtung erfolgt insbesondere eine Modifikation des in die erste Strahlformungseinrichtung eingekoppelten Eingangsstrahls innerhalb und/oder mittels der ersten Strahlformungseinrichtung.

**[0057]** Insbesondere ist oder umfasst das Strahlformungselement ein diffraktives oder refraktives Strahlformungselement, und/oder das Strahlformungselement ist oder umfasst einen diffraktiven field mapper. Insbesondere lassen sich mittels dem Strahlformungselement definierte Wellenfrontaberrationen auf einen in das Strahlformungselement eingekoppelten Eingangsstrahl aufprägen.

**[0058]** Das Strahlformungselement ist insbesondere derart eingerichtet, dass den aus der ersten Strahlformungseinrichtung ausgekoppelten Teilstrahlen die mittels dem Strahlformungselement modifizierte Fokusverteilung zugeordnet werden, sodass durch Fokussierung der aus der ersten Strahlformungseinrichtung ausgekoppelten Teilstrahlen mittels der Fokussieroptik in unterschiedlichen Teilbereichen der Fokuszone jeweils Fokusverteilungen mit dieser modifizierten geometrischen Form und/oder mit diesem modifiziertem Intensitätsprofil ausgebildet werden.

**[0059]** Insbesondere basiert diese modifizierte Form und/oder dieses modifizierte Intensitätsverteilung auf einer ursprünglichen Form und/oder auf einem ursprünglichen Intensitätsprofil, welches dem erstem Eingangsstrahl zugeordnet ist. Unter einer modifi-

zierten Form und/oder modifizierten Intensitätsverteilung ist insbesondere eine auf der ursprünglichen Form und/oder auf dem ursprünglichen Intensitätsprofil basierende Abwandlung zu verstehen.

**[0060]** Günstig kann es sein, wenn mittels dem Strahlformungselement eine Ausrichtung einer Haupterstreckungsrichtung der geometrischen Form und/oder des Intensitätsprofils der Fokusverteilung in einer zur Vorschubrichtung senkrecht orientierten Querschnittsebene einstellbar ist oder eingestellt wird, und insbesondere wenn eine Einstellung der Ausrichtung derart erfolgt, dass die Haupterstreckungsrichtung parallel oder näherungsweise parallel zu einer korrespondierenden lokalen Erstreckungsrichtung der Fokuszone orientiert ist. Es lässt sich dadurch beispielsweise eine zur lokalen Erstreckungsrichtung der Fokuszone näherungsweise parallel orientierte Ausbildung von Materialmodifikationen im Material des Werkstücks erreichen. Dies ermöglicht insbesondere eine optimierte Trennung des Materials.

**[0061]** Es kann auch vorgesehen sein, dass die Ausrichtung der Haupterstreckungsrichtung der geometrischen Form und/oder des Intensitätsprofils der Fokusverteilung derart erfolgt, dass die Haupterstreckungsrichtung quer zur korrespondierenden lokalen Erstreckungsrichtung orientiert ist. Beispielsweise schließt die Haupterstreckungsrichtung mit der lokalen Erstreckungsrichtung einen kleinsten Winkel von mindestens  $1^\circ$  und/oder höchstens  $90^\circ$  ein. Dadurch liegt die Fokusverteilung beispielsweise zumindest abschnittsweise in einem bei der Laserbearbeitung des Werkstücks entstehenden Restwerkstücksegment und/oder Verschnittsegment. Dadurch werden beispielsweise in dem Restwerkstücksegment und/oder Verschnittsegment Materialmodifikationen und/oder Kanäle ausgebildet, welche einen Ätzangriff zur Materialtrennung begünstigen.

**[0062]** Es ist grundsätzlich zusätzlich auch möglich, dass mittels dem Strahlformungselement die Fokusverteilung in der zur Vorschubrichtung senkrecht orientierten Querschnittsebene derart modifiziert wird, dass diese eine Haupterstreckungsrichtung in dieser zur Vorschubrichtung senkrechten Querschnittsebene aufweist.

**[0063]** Es kann vorgesehen sein, dass mittels dem Strahlformungselement die Fokusverteilung in der zur Vorschubrichtung senkrecht orientierten Querschnittsebene derart modifiziert wird, dass diese eine gekrümmte Längsmittelachse aufweist.

**[0064]** Günstig kann es sein, wenn mittels dem Strahlformungselement eine Modifikation des Intensitätsprofils der Fokusverteilung in einer zur Vorschubrichtung parallel orientierten Querschnittsebene derart erfolgt, dass das Intensitätsprofil

mindestens eine Vorzugsrichtung aufweist, wobei insbesondere die mindestens eine Vorzugsrichtung parallel oder quer oder senkrecht zur Vorschubrichtung orientiert ist. Es lässt sich dadurch insbesondere eine Ausbildung von Materialmodifikationen im Material des Werkstücks bei der Laserbearbeitung kontrollieren und/oder optimieren. Dadurch wird beispielsweise eine verbesserte Einbringung von Ätzflüssigkeit zur Materialtrennung ermöglicht.

**[0065]** Insbesondere liegen die mindestens eine Vorzugsrichtung und die Vorschubrichtung in einer gemeinsamen Ebene.

**[0066]** Beispielsweise wird das Intensitätsprofil der Fokusverteilung ist der zur Vorschubrichtung parallelen Ebene mittels dem Strahlformungselement beispielsweise elliptisch oder rechteckig oder quadratisch ausgebildet.

**[0067]** Unter der Vorzugsrichtung einer als Ellipse ausgebildeten Fokusverteilung ist beispielsweise eine große Halbachse der Ellipse zu verstehen.

**[0068]** Beispielsweise ist die Vorzugsrichtung der als Ellipse ausgebildeten Fokusverteilung parallel oder näherungsweise parallel zur Vorschubrichtung orientiert.

**[0069]** Eine als Quadrat oder Rechteck ausgebildete Fokusverteilung weist beispielsweise zwei Vorzugsrichtungen auf, welche jeweils parallel zu einer Verbindungsrichtung zweier gegenüberliegender Punkte des Quadrats orientiert sind. Beispiel ist dann eine der Vorzugsrichtungen parallel zur Vorschubrichtung orientiert und die andere senkrecht hierzu.

**[0070]** Vorteilhaft kann es sein, wenn mittels dem Strahlformungselement der ersten Strahlformungseinrichtung eine Ausrichtung der mindestens einen Vorzugsrichtung der Fokusverteilung in der zur Vorschubrichtung parallel orientierten Querschnittsebene einstellbar ist oder eingestellt wird. Es lässt sich dadurch insbesondere eine Ausbildung von Materialmodifikationen im Material des Werkstücks bei der Laserbearbeitung kontrollieren und/oder optimieren.

**[0071]** Insbesondere kann es vorgesehen sein, dass der mindestens eine Anstellwinkel der mindestens einen Fokuszone mindestens  $1^\circ$  und/oder höchstens  $90^\circ$  beträgt. Vorzugsweise beträgt der mindestens eine Anstellwinkel mindestens  $10^\circ$ .

**[0072]** Unter dem Anstellwinkel ist insbesondere ein kleinster Winkel zwischen einer der mindestens einen Fokuszone zugeordneten lokalen Erstreckungsrichtung und einer Außenseite des Werkstücks zu verstehen. Beispielsweise wird die mindes-

tens eine Fokuszone durch diese Außenseite hindurch in das Material des Werkstücks eingekoppelt und/oder eingebracht.

**[0073]** Es kann vorgesehen sein, dass die mindestens eine Fokuszone unterschiedliche Abschnitte mit unterschiedlichen lokalen Erstreckungsrichtungen und/oder Anstellwinkeln aufweist.

**[0074]** Günstig kann es sein, wenn die erste Strahlformungseinrichtung ein Polarisations-Strahlteilungselement aufweist, welches derart eingerichtet ist, dass die aus der ersten Strahlformungseinrichtung ausgekoppelten Teilstrahlen jeweils einen von mindestens zwei unterschiedlichen Polarisationszuständen aufweisen, wobei mittels der Fokussieroptik Teilstrahlen mit unterschiedlichen Polarisationszuständen in benachbarte Teilbereiche der mindestens einen Fokuszone fokussiert werden. Es lässt sich dadurch die mindestens eine Fokuszone durch Aneinanderreihung von Fokuspunkten und/oder Fokusverteilungen mit unterschiedlichen Polarisationszuständen ausbilden.

**[0075]** Fokuspunkte und/oder Fokusverteilungen mit unterschiedlichen Polarisationszuständen sind insbesondere aus zueinander inkohärenten Teilstrahlen gebildet. Dadurch lassen sich die Fokuspunkte und/oder Fokusverteilungen mit besonders geringem Abstand zueinander anordnen und/oder aneinanderreihen.

**[0076]** Mittels des Polarisations-Strahlteilungselements erfolgt insbesondere eine Aufteilung eines in das Polarisations-Strahlteilungselement eingekoppelten Strahls in eine Mehrzahl von polarisierten Teilstrahlen, welche jeweils einen von mindestens zwei unterschiedlichen Polarisationszuständen aufweisen.

**[0077]** Beispielsweise umfasst das Polarisations-Strahlteilungselement ein doppelbrechendes Keilelement und/oder ein doppelbrechendes Linsenelement. Es lässt sich dadurch beispielsweise vor der Fokussierung der Teilstrahlen mittels der Fokussieroptik ein Richtungsversatz und/oder ein Winkelversatz von Teilstrahlen mit unterschiedlichen Polarisationszuständen erzeugen. Dadurch lassen sich die Teilstrahlen mit unterschiedlichen Polarisationszuständen in räumlich unterschiedliche Teilbereiche der mindestens einen Fokuszone abbilden.

**[0078]** Insbesondere sind unter unterschiedlichen Polarisationszuständen unterschiedliche lineare Polarisationszustände zu verstehen.

**[0079]** Beispielsweise umfasst das Polarisations-Strahlteilungselement einen Quarzkristall zur Polarisationsstrahlteilung.

**[0080]** Erfindungsgemäß ist es bei dem eingangs genannten Verfahren vorgesehen, dass mittels eines Strahlteilungselements einer ersten Strahlformungseinrichtung ein auf das Strahlteilungselement einfallender erster Eingangsstrahl in eine Mehrzahl von Teilstrahlen aufgeteilt wird und die aus der ersten Strahlformungseinrichtung ausgekoppelten Teilstrahlen mittels einer der ersten Strahlformungseinrichtung zugeordneten Fokussieroptik in mindestens eine Fokuszone fokussiert werden, wobei die Aufteilung des ersten Eingangsstrahls mittels dem Strahlteilungselement durch Phasenaufprägung auf den ersten Eingangsstrahl erfolgt, die Teilstrahlen zur Ausbildung der mindestens einen Fokuszone in unterschiedliche Teilbereiche der mindestens einen Fokuszone fokussiert werden, zur Laserbearbeitung des Werkstücks die mindestens eine Fokuszone mittels der Fokussieroptik unter mindestens einem Anstellwinkel zu einer Außenseite des Werkstücks in das Material eingebracht wird und wobei durch Beaufschlagung des Materials mittels der mindestens einen Fokuszone Materialmodifikationen in dem Material erzeugt werden, welche mit einer Änderung eines Brechungsindex des Materials assoziiert sind.

**[0081]** Das erfindungsgemäße Verfahren weist insbesondere ein oder mehrere Merkmale und/oder Vorteile der erfindungsgemäßen Vorrichtung auf.

**[0082]** Insbesondere ist das erfindungsgemäße Verfahren mittels der erfindungsgemäßen Vorrichtung durchführbar. Insbesondere führt die erfindungsgemäße Vorrichtung das erfindungsgemäße Verfahren aus.

**[0083]** Insbesondere kann es vorgesehen sein, dass zur Laserbearbeitung des Werkstücks die mindestens eine Fokuszone relativ zu dem Material des Werkstücks in eine Vorschubrichtung bewegt wird. Insbesondere wird eine in Vorschubrichtung orientierte Relativgeschwindigkeit zwischen dem Material und der mindestens einen Fokuszone eingestellt oder ist einstellbar.

**[0084]** Insbesondere kann es vorgesehen sein, dass durch Relativbewegung der mindestens einen Fokuszone bezüglich des Werkstücks in dem Material des Werkstücks Materialmodifikationen entlang einer Bearbeitungslinie und/oder Bearbeitungsfläche ausgebildet werden. Insbesondere lässt sich dadurch das Werkstück entlang der Bearbeitungslinie und/oder Bearbeitungsfläche trennen.

**[0085]** Vorteilhaft kann es sein, wenn das Material des Werkstücks entlang der Bearbeitungslinie und/oder Bearbeitungsfläche durch Ausübung einer thermischen Beaufschlagung und/oder einer mechanischen Spannung und/oder durch Ätzen mittels mindestens einer nasschemischen Lösung trennbar

ist oder getrennt wird. Beispielsweise erfolgt das Ätzen in einem ultraschallunterstützten Ätzbad.

**[0086]** Insbesondere weisen die erfindungsgemäße Vorrichtung und/oder das erfindungsgemäße Verfahren ein oder mehrere der nachfolgenden Merkmale auf:

Es kann vorgesehen sein, dass sich die mindestens eine Fokuszone zwischen zwei unterschiedlichen und/oder gegenüberliegenden Außenseiten des Werkstücks erstreckt und insbesondere durchgängig erstreckt. Beispielsweise sind diese Außenseiten parallel zueinander orientiert oder quer zueinander orientiert. Es lässt sich dadurch das Werkstück beispielsweise in zwei voneinander verschiedene Segmente trennen oder es lässt sich zur Kantenbearbeitung ein Segment vom Werkstück abtrennen. Dadurch lässt sich der Kantenbereich beispielsweise abschrägen oder anfasen.

**[0087]** Insbesondere kann es vorgesehen sein, dass die mindestens eine Fokuszone Fokusverteilungen aufweist, welche derart angeordnet sind, dass Materialmodifikationen in einem von dem Werkstück abzutrennenden Restwerkstücksegment und/oder Verschnittsegment ausgebildet werden. Diese Materialmodifikationen bilden beispielsweise Kanäle zur verbesserten Einbringung von Ätzflüssigkeit zur Materialtrennung.

**[0088]** Beispielsweise sind die Fokusverteilungen der mindestens einen Fokuszone so angeordnet, dass diese zumindest abschnittsweise in einem bei der Laserbearbeitung des Werkstücks gebildetes Restwerkstücksegment und/oder Verschnittsegment angeordnet sind oder zumindest abschnittsweise in einem bei der Laserbearbeitung des Werkstücks gebildetes Restwerkstücksegment hineinragen. Es lassen sich dadurch in dem Restwerkstücksegment und/oder Verschnittsegment beispielsweise Materialmodifikationen und/oder Kanäle ausbilden, welche eine Zuleitung von Ätzflüssigkeit an bei der Laserbearbeitung ausgebildete Materialmodifikationen begünstigen. Dadurch wird eine verbesserte Materialtrennung entlang einer Bearbeitungsfläche ermöglicht, an welcher die Materialmodifikationen angeordnet sind.

**[0089]** Aus dem gleichen Grund kann es günstig sein, wenn die Fokusverteilungen der mindestens einen Fokuszone so angeordnet werden, dass ein Hauptmaximum und/oder ein globales Maximum der jeweiligen Fokusverteilung einem bei der Laserbearbeitung des Werkstücks entstehenden Gutstücksegment zugewandt ist und/oder einem Restwerkstücksegment abgewandt ist.

**[0090]** Unter einem Gutstücksegment ist beispielsweise ein bei einer Trennung des Werkstück entste-

hendes Nutzsegment (im Gegensatz zu einem Restwerkstücksegment und/oder Verschnittsegment) zu verstehen.

**[0091]** Insbesondere weisen Fokusverteilungen der Fokuszone, aus welchen die Fokuszone gebildet ist, Intensitätsschwankungen von höchstens 20 % auf.

**[0092]** Insbesondere umfasst die Vorrichtung eine Werkstückhalterung für das Werkstück, welche vorzugsweise eine nicht-reflektierende und/oder stark streuende Oberfläche aufweist.

**[0093]** Insbesondere kann es vorgesehen sein, dass die Vorrichtung eine Laserquelle zur Bereitstellung eines Laserstrahls aufweist, aus welchem die mindestens eine Fokuszone ausbildbar ist oder ausgebildet wird. Insbesondere wird mittels der Laserquelle ein gepulster Laserstrahl und/oder ein Ultrakurzpuls Laserstrahl bereitgestellt.

**[0094]** Insbesondere ist die mindestens eine Fokuszone aus einem Ultrakurzpuls Laserstrahl ausgebildet oder mittels eines Ultrakurzpuls Laserstrahls bereitgestellt. Dieser Ultrakurzpuls Laserstrahl umfasst insbesondere ultrakurze Laserpulse.

**[0095]** Beispielsweise beträgt eine Wellenlänge des Laserstrahls, aus welchem die mindestens eine Fokuszone ausbildbar ist oder ausgebildet wird, mindestens 300 nm und/oder höchstens 1500 nm. Beispielsweise beträgt die Wellenlänge 515 nm oder 1030 nm.

**[0096]** Insbesondere weist der Laserstrahl, aus welchem die mindestens eine Fokuszone ausbildbar ist oder ausgebildet wird, eine mittlere Leistung von mindestens 1W bis 1kW auf. Beispielsweise umfasst der Laserstrahl Pulse mit einer Pulsenergie von mindestens 10  $\mu$ J und/oder höchstens 50 mJ. Es kann vorgesehen sein, dass der Laserstrahl Einzelpulse oder Bursts umfasst, wobei die Bursts 2 bis 20 Subpulse und insbesondere einen zeitlichen Abstand von näherungsweise 20ns aufweisen.

**[0097]** Es kann vorgesehen sein, dass die mindestens eine Fokuszone um eine zu einer Vorschubrichtung, in welche die mindestens eine Fokuszone zur Laserbearbeitung des Werkstücks relativ zu dem Werkstück bewegt wird, senkrecht orientierte Drehachse drehbar ist. Es lässt sich dadurch das Werkstück beispielsweise entlang einer gekrümmten Bearbeitungslinie und/oder Bearbeitungsfläche bearbeiten.

**[0098]** Insbesondere bildet die mindestens eine Fokuszone einen räumlich zusammenhängenden Wechselwirkungsbereich zur Laserbearbeitung des Werkstücks, wobei sich insbesondere durch Beaufschlagung des Materials des Werkstücks mit diesem

Wechselwirkungsbereich an dem Wechselwirkungsbereich lokalisierte Materialmodifikationen ausbilden lassen, mittels welchen insbesondere eine Trennung des Materials ermöglicht wird. Insbesondere erfolgt zwischen einander benachbarten Materialmodifikationen eine Rissbildung und/oder eine Änderung eines Brechungsindex des Materials.

**[0099]** Die durch ultrakurze Laserpulse in transparente Materialien eingebrachten Materialmodifikationen werden in drei verschiedene Klassen unterteilt, siehe K. Itoh et al. „Ultrafast Processes for Bulk Modification of Transparent Materials“ MRS Bulletin, vol. 31 p.620 (2006): Typ I ist eine isotrope Brechungsindexänderung; Typ II ist eine doppelbrechende Brechungsindexänderung; und Typ III ist ein sogenannter Void beziehungsweise Hohlraum. Die erzeugte Materialmodifikation hängt hierbei von Laserparametern des Laserstrahls, aus welchem die Fokuszone gebildet ist, wie z.B. der Pulsdauer, der Wellenlänge, der Pulsenergie und der Repetitionsfrequenz des Laserstrahls, und von den Materialeigenschaften, wie unter anderem der elektronischen Struktur und dem thermischen Ausdehnungskoeffizient, sowie von der numerischen Apertur (NA) der Fokussierung, ab.

**[0100]** Die isotropen Brechungsindexänderungen des Typs I werden auf ein örtlich begrenztes Aufschmelzen durch die Laserpulse und eine schnelle Wiedererstarrung des transparenten Materials zurückgeführt. Beispielsweise ist bei Quarzglas die Dichte und der Brechungsindex des Materials höher, wenn das Quarzglas von einer höheren Temperatur schnell herunter gekühlt wird. Wenn also das Material im Fokusvolumen schmilzt und dann schnell abkühlt, weist das Quarzglas in den Bereichen der Materialmodifikation einen höheren Brechungsindex auf, als in den nicht modifizierten Bereichen.

**[0101]** Die doppelbrechenden Brechungsindexänderungen des Typs II können beispielsweise durch Interferenzen zwischen dem ultrakurzen Laserpuls und dem elektrischen Feld des durch die Laserpulse erzeugten Plasmas entstehen. Diese Interferenz führt zu periodischen Modulationen in der Elektronenplasmadichte, welche beim Erstarren zu einer doppelbrechenden Eigenschaft, also richtungsabhängigen Brechungsindizes, des transparenten Materials führt. Eine Typ II Modifikation geht beispielsweise auch mit der Bildung von sogenannten Nanogratings einher.

**[0102]** Die Voids (Hohlräume) der Typ III-Modifikationen können beispielsweise mit einer hohen Laserpulsenergie erzeugt werden. Hierbei wird die Bildung der Voids einer explosionsartigen Ausdehnung von hoch angeregtem, verdampftem Material aus dem Fokusvolumen in das umgebende Material zugeschrieben. Dieser Prozess wird auch als Mikroexplo-

sion bezeichnet. Da diese Ausdehnung innerhalb der Masse des Materials stattfindet, hinterlässt die Mikroexplosion einen weniger dichten oder hohlen Kern (der Void), beziehungsweise eine mikroskopische Fehlstelle im Submikrometer-Bereich oder im atomaren Bereich, der oder die von einer verdichteten Materialhülle umgeben ist. Durch die Verdichtung an der Stoßfront der Mikroexplosion entstehen in dem transparenten Material Spannungen, die zu einer spontanen Rissbildung führen können, beziehungsweise eine Rissbildung begünstigen können.

**[0103]** Insbesondere kann die Bildung von Voids auch mit Typ I und Typ II Modifikationen einhergehen. Beispielsweise können Typ I und Typ II Modifikationen in den weniger beanspruchten Gebieten um die eingebrachten Laserpulse herum entstehen. Wenn demnach vom Einbringen einer Typ III Modifikation die Rede ist, dann ist in jedem Fall ein weniger dichter oder hohler Kern beziehungsweise eine Fehlstelle vorhanden. Beispielsweise wird in Saphir bei einer Typ III Modifikation durch die Mikroexplosion kein Hohlraum erzeugt, sondern ein Bereich geringerer Dichte. Aufgrund der auftretenden Materialspannungen bei einer Typ III Modifikation geht eine solche Modifikation zudem oft mit einer Rissbildung einher oder begünstigt diese zumindest. Die Bildung von Typ I und Typ II Modifikationen kann beim Einbringen von Typ III Modifikationen nicht vollständig unterbunden oder vermieden werden. Das Auffinden von „reinen“ Typ III Modifikationen ist daher nicht wahrscheinlich.

**[0104]** Bei hohen Repetitionsraten des Laserstrahls kann das Material zwischen den Pulsen nicht vollständig abkühlen, sodass kumulative Effekte der eingebrachten Wärme von Puls zu Puls einen Einfluss auf die Materialmodifikation nehmen können. Beispielsweise kann die Repetitionsfrequenz des Laserstrahls höher sein als der Kehrwert der Wärmediffusionszeit des Materials, sodass in der Fokuszone durch sukzessive Absorption von Laserenergie eine Wärmeakkumulation stattfinden kann, bis die Schmelztemperatur des Materials erreicht ist. Durch den thermischen Transport der Wärmeenergie in die die Fokuszone umliegenden Gebiete kann zudem ein größerer Bereich als die Fokuszone aufgeschmolzen werden. Nach dem Einbringen von ultrakurzen Laserpulsen, kühlt das erwärmte Material schnell ab, so dass die Dichte und andere strukturelle Eigenschaften des Hochtemperaturzustands im Material gewissermaßen eingefroren werden.

**[0105]** Die mindestens eine Fokuszone umfasst insbesondere eine Mehrzahl von zueinander beabstandeten und/oder benachbarten Fokusverteilungen, wobei zwischen einander benachbarten Fokusverteilungen die Fokuszone Unterbrechungen und/oder Nullstellen aufweisen kann, an denen es insbesondere zu keiner oder zu einer vernachlässigbaren Wechselwirkung mit dem Material kommt. Insbeson-

dere weisen diese Unterbrechungen der Fokuszone eine räumliche Ausdehnung von höchstens 10 % einer maximalen Ausdehnung und/oder einer maximalen Länge der Fokuszone auf. Insbesondere weisen diese Unterbrechungen eine räumliche Ausdehnung von höchstens 100 µm und insbesondere höchstens 50 µm auf. Falls größere Unterbrechungen von Intensitätsverteilungen vorliegen, sind hierunter unterschiedliche Fokuszonen zu verstehen.

**[0106]** Beispielsweise weist die mindestens eine Fokuszone eine Gesamtlänge zwischen 50 µm und 5000 µm auf.

**[0107]** Zur Bestimmung von räumlichen Dimensionen der mindestens einen Fokuszone, wie z.B. einer jeweiligen Länge und/oder eines jeweiligen Durchmessers, wird die Fokuszone in einer modifizierten Intensitätsverteilung betrachtet, welche nur Intensitätswerte aufweist, die oberhalb einer bestimmten Intensitätsschwelle liegen. Die Intensitätsschwelle wird hierbei beispielsweise so gewählt, dass unterhalb dieser Intensitätsschwelle liegende Werte eine derart geringe Intensität aufweisen, sodass diese für eine Wechselwirkung mit dem Material zur Ausbildung von Materialmodifikationen nicht mehr relevant sind. Beispielsweise beträgt die Intensitätsschwelle 50% eines globalen Intensitätsmaximums der tatsächlichen Intensitätsverteilung. Unter einer Länge der jeweiligen Fokuszone bzw. unter einem Durchmesser der jeweiligen Fokuszone ist dann eine maximale Erstreckungslänge und/oder eine Länge maximaler Ausdehnung der jeweiligen Fokuszone entlang einer Längsmittelachse der Fokuszone bzw. in einer zu der Längsmittelachse senkrecht orientierten Ebene unter Zugrundelegung der modifizierten Intensitätsverteilung zu verstehen.

**[0108]** Insbesondere ist unter den Angaben „zumindest näherungsweise“ oder „näherungsweise“ im Allgemeinen eine Abweichung von höchstens 10 % zu verstehen. Falls nicht anders angegeben, ist unter den Angaben „zumindest näherungsweise“ oder „näherungsweise“ insbesondere zu verstehen, dass ein tatsächlicher Wert und/oder Abstand und/oder Winkel um höchstens 10 % von einem idealen Wert und/oder Abstand und/oder Winkel abweicht, und/oder dass eine tatsächliche geometrische Form von einer idealen geometrischen Form um höchstens 10 % abweicht.

**[0109]** Die nachfolgende Beschreibung bevorzugter Ausführungsformen dient im Zusammenhang mit den Zeichnungen der näheren Erläuterung der Erfindung. Es zeigen:

**Fig. 1** eine schematische Darstellung eines Ausführungsbeispiels einer Vorrichtung zur Laserbearbeitung eines Werkstücks;

**Fig. 2** eine schematische Darstellung eines weiteren Ausführungsbeispiels einer Vorrichtung zur Laserbearbeitung eines Werkstücks;

**Fig. 3a** schematische Querschnittsdarstellungen eines Ausführungsbeispiels einer Fokusverteilung einer Fokuszone zur Laserbearbeitung des Werkstücks;

**Fig. 3b** schematische Querschnittsdarstellungen eines weiteren Ausführungsbeispiels einer Fokusverteilung einer Fokuszone zur Laserbearbeitung des Werkstücks;

**Fig. 3c** schematische Querschnittsdarstellungen eines weiteren Ausführungsbeispiels einer Fokusverteilung einer Fokuszone zur Laserbearbeitung des Werkstücks;

**Fig. 4a** eine schematische Querschnittsdarstellung eines Abschnitts eines Beispiels einer Fokuszone, welche in ein Material des Werkstücks eingebracht ist;

**Fig. 4b** eine schematische Querschnittsdarstellung eines Abschnitts eines weiteren Beispiels einer Fokuszone, welche in ein Material des Werkstücks eingebracht ist;

**Fig. 5** eine schematische Querschnittsdarstellung einer Fokuszone, welche das Werkstück von einer ersten Außenseite zu einer zweiten Außenseite vollständig durchdringt;

**Fig. 6** eine schematische Querschnittsdarstellung von mittels einer Fokuszone erzeugten Materialmodifikationen im Material des Werkstücks, wobei diese Materialmodifikationen mit einer Rissbildung des Materials einhergehen;

**Fig. 7** eine schematische Querschnittsdarstellung von mittels einer Fokuszone erzeugten Materialmodifikationen im Material des Werkstücks, wobei diese Materialmodifikationen mittels Wärmeakkumulation erzeugt sind und/oder mit einer Brechungsindexänderung des Materials einhergehen;

**Fig. 8** eine Querschnittsdarstellung einer simulierten Intensitätsverteilung eines Beispiels einer Fokuszone, welche eine Mehrzahl zueinander beabstandeter langgezogener Fokusverteilungen aufweist;

**Fig. 9a** eine Querschnittsdarstellung einer simulierten Intensitätsverteilung eines Beispiels eines abrupt-selbstfokussierenden Laserstrahls;

**Fig. 9b** eine Intensitätsverteilung des abrupt-selbstfokussierenden Laserstrahls gemäß **Fig. 9a** entlang einer Hauptstreckungsrichtung dieses Laserstrahls;

**Fig. 10** eine Querschnittsdarstellung einer simulierten Intensitätsverteilung einer Fokuszone,

welche eine Mehrzahl zueinander beabstandeter Fokusverteilungen aufweist, die als abrupt-selbstfokussierende Strahlen ausgebildet sind;

**Fig. 11** eine schematische Darstellung einer den abrupt-selbstfokussierenden Strahlen zugeordneten Phasenverteilung;

**Fig. 12a,c,e** Querschnittsdarstellungen von simulierten Intensitätsverteilungen von drei unterschiedlichen Ausführungsbeispielen der Fokuszone,

**Fig. 12b,d,f** schematische Darstellungen von Phasenverteilungen, welchen den Querschnittsdarstellungen gemäß **Fig. 12a** bzw. **Fig. 12c** bzw. **Fig. 12e** zugeordnet sind;

**Fig. 13a** eine schematische perspektivische Darstellung von Materialmodifikationen, welche in dem Material des Werkstücks entlang einer Bearbeitungslinie und/oder Bearbeitungsfläche erzeugt werden; und

**Fig. 13b** eine schematische Darstellung von zwei Segmenten des Werkstücks, welche durch Trennung des Werkstücks an der Bearbeitungslinie und/oder Bearbeitungsfläche gebildet werden.

**[0110]** Gleiche oder funktional äquivalente Elemente sind in sämtlichen Ausführungsbeispielen mit denselben Bezugszeichen bezeichnet.

**[0111]** Ein Ausführungsbeispiel einer Vorrichtung zur Laserbearbeitung eines Werkstücks ist in **Fig. 1** gezeigt und dort mit 100 bezeichnet. Mittels der Vorrichtung 100 lassen sich in einem Material 102 des Werkstücks 104 lokalisierte Materialmodifikationen, wie beispielsweise Fehlstellen im Submikrometerbereich oder atomaren Bereich, erzeugen, welche eine Materialschwächung zur Folge haben. An diesen Materialmodifikationen lässt sich das Werkstück beispielsweise in einem Folgeschritt in voneinander verschiedene Segmente trennen oder es lässt sich beispielsweise ein Segment von dem Werkstück 104 abtrennen. Insbesondere können mittels der Vorrichtung 100 Materialmodifikationen unter einem Anstellwinkel in das Material 102 eingebracht werden, sodass sich durch Abtrennung eines entsprechenden Segments von dem Werkstück 104 ein Kantenbereich des Werkstücks 104 anfasen oder abschrägen lässt.

**[0112]** Die Vorrichtung 100 umfasst eine erste Strahlformungseinrichtung 106, in welche ein erster Eingangsstrahl 108 eingekoppelt wird. Dieser erste Eingangsstrahl 108 ist beispielsweise ein Laserstrahl, welcher z.B. mittels einer Laserquelle 110 bereitgestellt wird und/oder aus einer Laserquelle 110 ausgekoppelt wird. Unter dem ersten Eingangsstrahl 108 ist insbesondere ein Strahlenbündel zu

verstehen, welches eine Mehrzahl insbesondere parallel verlaufender Strahlen umfasst.

**[0113]** Der mittels der Laserquelle 110 bereitgestellte Laserstrahl ist insbesondere ein gepulster Laserstrahl und/oder ein Ultrakurzpulslaserstrahl.

**[0114]** Die erste Strahlformungseinrichtung 106 umfasst ein Strahlteilungselement 112, mittels welchem der erste Eingangsstrahl 108 in eine Mehrzahl von Teilstrahlen 114 und/oder Teilstrahlenbündeln aufgeteilt wird. Bei dem in **Fig. 1** gezeigten Beispiel sind zwei voneinander verschiedene Teilstrahlen 114a und 114b angedeutet.

**[0115]** Die erste Strahlformungseinrichtung 106 und/oder das Strahlteilungselement 112 sind beispielsweise jeweils als Fernfeldstrahlformungselement ausgebildet.

**[0116]** Zur Fokussierung der aus der ersten Strahlformungseinrichtung 106 ausgekoppelten Teilstrahlen 114 umfasst die Vorrichtung 100 eine Fokussieroptik 116, in welche die Teilstrahlen 114 eingekoppelt werden. Beispielsweise treffen voneinander verschiedene Teilstrahlen 114 mit einem Ortsversatz und/oder Winkelversatz auf die Fokussieroptik 116 auf.

**[0117]** Beispielsweise ist die Fokussieroptik 116 als Mikroskopobjektiv oder Linsenelement ausgebildet.

**[0118]** Die Teilstrahlen 114 werden mittels der Fokussieroptik 116 in unterschiedliche Teilbereiche 120 einer Fokuszone 122 fokussiert, welche zur Laserbearbeitung des Werkstücks 104 wird in dessen Material 102 eingebracht wird.

**[0119]** In **Fig. 1** sind beispielsweise zwei unterschiedliche Teilbereiche 120a und 120b angedeutet, in welche die Teilstrahlen 114 zur Ausbildung der Fokuszone 122 fokussiert werden. Der Teilbereich 120a ist dabei beispielsweise dem Teilstrahl 114a zugeordnet und der Teilbereich 120b ist dem Teilstrahl 114b zugeordnet.

**[0120]** Dem in die erste Strahlformungseinrichtung 106 eingekoppelten ersten Eingangsstrahl 108 ist eine bestimmte Fokusverteilung zugeordnet. Unter dieser Fokusverteilung ist eine geometrische Form und/oder ein Intensitätsprofil zu verstehen, welche bzw. welches durch Fokussierung des ersten Eingangsstrahls 108 vor Einkopplung in die erste Strahlformungseinrichtung 106 ausgebildet werden würde.

**[0121]** Beispielsweise weist der erste Eingangsstrahl 108, welcher z.B. mittels der Laserquelle 108 bereitgestellt wird, ein gaußförmiges Strahlprofil auf. Durch Fokussierung des ersten Eingangsstrahls 108 vor Einkopplung in die erste Strahlformungseinrich-

tung 106 würde in diesem Fall eine Fokusverteilung mit gaußförmiger Form und/oder gaußförmigem Intensitätsprofil ausgebildet werden.

**[0122]** Insbesondere ist unter der Form der Fokusverteilung eine charakteristische räumliche Form und/oder räumliche Ausdehnung der Fokusverteilung zu verstehen.

**[0123]** Mittels des Strahlteilungselements 112 wird der in die erste Strahlformungseinrichtung 106 eingekoppelte erste Eingangsstrahl 108 derart aufgeteilt, dass den Teilstrahlen 114 ebenfalls diese Fokusverteilung zugeordnet ist. Durch Fokussierung dieser Teilstrahlen 114 mittels der Fokussieroptik 116 werden in den unterschiedlichen Teilbereichen 120 der Fokuszone 122 jeweils Fokusverteilungen 124 ausgebildet, wobei diese Fokusverteilungen 124 auf der dem ersten Eingangsstrahl 108 zugeordneten Fokusverteilung basieren.

**[0124]** Die Fokuszone 122 wird dadurch durch Aneinanderreihung unterschiedlicher Fokusverteilungen 124 aufgebaut und/oder ausgebildet. Unter unterschiedlichen Fokusverteilungen 124 sind vorliegend Fokusverteilungen 124 an unterschiedlichen räumlichen Positionen der Fokuszone 122 zu verstehen, wobei diese unterschiedlichen Fokusverteilungen 124 zumindest näherungsweise die gleiche geometrische Form und/oder das gleiche geometrische Intensitätsprofil aufweisen.

**[0125]** Unterschiedliche Fokusverteilungen 124 sind in der Fokuszone 122 zueinander beabstandet angeordnet. Es ist grundsätzlich möglich, dass sich zueinander benachbarte unterschiedliche Fokusverteilungen 124 räumlich überlappen.

**[0126]** Durch Strahlteilung mittels dem Strahlteilungselement 112 werden insbesondere Fokusverteilungen als identische Kopien ausgebildet, welche in unterschiedliche Teilbereiche 120 der Fokuszone 122 abgebildet werden.

**[0127]** Beispielsweise ist das Strahlteilungselement 112 als 3D-Strahlteilungselement ausgebildet. Hinsichtlich der technischen Realisierung und Eigenschaften des Strahlteilungselements 112 wird auf die wissenschaftliche Veröffentlichung „Structured light for ultrafast laser micro- and nanoprocessing“ von D. Flamm et al., arXiv:2012.10119v1 [physics.optics], 18. Dezember 2020, verwiesen. Hierauf wird ausdrücklich und vollinhaltlich Bezug genommen.

**[0128]** Insbesondere lässt sich mittels des Strahlteilungselements 112 ein Abstand  $d_1$  und/oder ein Ortsversatz zwischen einander benachbarten Fokusverteilungen 124 einstellen.

**[0129]** Zwischen einander benachbarten Fokusverteilungen 124 lassen sich beispielsweise ein Abstand  $dx$  und/oder ein Ortsversatz in einer  $x$ -Richtung und ein Abstand  $dz$  und/oder ein Ortsversatz in einer zu der  $x$ -Richtung senkrecht orientierten  $z$ -Richtung einstellen.

**[0130]** Hierzu werden beispielsweise mittels des Strahlteilungselements 112 voneinander verschiedene Teilstrahlen 114 derart ausgebildet, dass diese mit einem bestimmten Ortsversatz und/oder mit einer bestimmten Konvergenz und/oder Divergenz auf die Fokussieroptik 116 treffen. Die voneinander verschiedenen Teilstrahlen 114 werden dann mittels der Fokussieroptik 116 mit einem sich hieraus ergebenden Ortsversatz in  $x$ -Richtung und/oder  $z$ -Richtung abgebildet.

**[0131]** Zur Durchführung der Strahlteilung mittels dem Strahlteilungselement 112 wird auf einen transversalen Strahlquerschnitt des ersten Eingangsstrahls 108 eine definierte transversale Phasenverteilung aufgeprägt. Beispiele für transversale Phasenverteilungen von aus dem Strahlteilungselement 112 ausgekoppelten Strahlen und zugehörige Fokuszonen 112 sind beispielsweise in den **Fig. 12a, b** bzw. **Fig. 12c, d** bzw. **Fig. 12 e, f** gezeigt.

**[0132]** Zur Erzeugung des Ortsversatzes in  $x$ -Richtung und/oder in  $z$ -Richtung erfolgt die Phasenaufprägung mittels dem Strahlteilungselement 112 beispielsweise derart, dass die zugeordnete Phasenverteilung für jede Fokusverteilung 124 einen bestimmten optischen Gitteranteil und/oder optischen Linsenanteil aufweist. Aufgrund des optischen Gitteranteils ergibt sich eine Winkelablenkung von Teilstrahlen 114 vor der Fokussieroptik 116, welcher nach erfolgter Fokussierung in einem Ortsversatz in  $x$ -Richtung resultiert. Aufgrund des optischen Linsenanteils treffen Teilstrahlen 116 mit unterschiedlicher Konvergenz und/oder Divergenz auf die Fokussieroptik 116, was nach erfolgter Fokussierung in einem Ortsversatz in  $z$ -Richtung resultiert.

**[0133]** Es kann vorgesehen sein, dass die erste Strahlformungseinrichtung 106 ein Polarisations-Strahlteilungselement 126 aufweist. Mittels des Polarisations-Strahlteilungselements 126 wird eine Polarisationsstrahlteilung des ersten Eingangsstrahls 108 und/oder eines aus dem Strahlteilungselement 112 ausgekoppelten Strahls in Strahlen durchgeführt, welche jeweils einen von mindestens zwei unterschiedlichen Polarisationszuständen aufweisen.

**[0134]** Durch Polarisationsstrahlteilung mittels dem Polarisations-Strahlteilungselement 126 weisen die aus der ersten Strahlformungseinrichtung 106 ausgekoppelten Teilstrahlen 114 jeweils einen von mindestens zwei unterschiedlichen Polarisationszuständen auf. Diese Teilstrahlen 114 mit unterschiedlichen

Polarisationszuständen werden mittels der Fokussieroptik 116 in die unterschiedlichen Teilbereiche 120 der Fokuszone 122 fokussiert.

**[0135]** Beispielsweise ist das Polarisations-Strahlteilungselement 126 bezüglich einer Haupt-Propagationsrichtung 128 des in die erste Strahlformungseinrichtung 106 eingekoppelten ersten Eingangsstrahls 108 vor oder hinter dem Strahlteilungselement 116 angeordnet.

**[0136]** Bei dem gezeigten Beispiel ist die Haupt-Propagationsrichtung 128 parallel oder näherungsweise parallel zur  $z$ -Richtung orientiert. Insbesondere sind die  $x$ -Richtung und die  $z$ -Richtung jeweils senkrecht zu einer  $y$ -Richtung orientiert. Diese  $y$ -Richtung ist bei dem gezeigten Beispiel parallel oder näherungsweise parallel zu einer Vorschubrichtung 129 orientiert, in welche die Fokusverteilungen 124 zur Laserbearbeitung des Werkstücks 104 relativ zu dem Werkstück 104 bewegt werden.

**[0137]** Hinsichtlich der Funktionsweise und Ausführung des Polarisations-Strahlteilungselements 126 wird auf die nicht vorveröffentlichten deutschen Patentanmeldungen mit Aktenzeichen 10 2020 207 715.0 (Anmeldetag: 22. Juni 2020) und mit Aktenzeichen 10 2019 217 577.5 (Anmeldetag: 14. November 2019) der gleichen Anmelderin verwiesen. Hierauf wird ausdrücklich und vollinhaltlich Bezug genommen.

**[0138]** Insbesondere sind unter den Polarisationszuständen der Teilstrahlen 114 lineare Polarisationszustände zu verstehen, wobei beispielsweise zwei unterschiedliche Polarisationszustände vorgesehen sind und/oder wobei beispielsweise jeweilige Polarisationsrichtungen voneinander verschiedener Teilstrahlen unter einem Winkel von  $90^\circ$  zueinander ausgerichtet sind.

**[0139]** Insbesondere sind die Teilstrahlen 114 derart polarisiert, dass ein elektrisches Feld in einer Ebene senkrecht zu deren Propagationsrichtung orientiert ist (transversal elektrisch).

**[0140]** Zur Polarisationsstrahlteilung weist das Polarisations-Strahlteilungselement 126 beispielsweise ein doppelbrechendes Linsenelement und/oder ein doppelbrechendes Keilelement auf. Das doppelbrechende Linsenelement und/oder das doppelbrechende Keilelement sind beispielsweise aus einem Quarzkristall hergestellt oder umfassen einen Quarzkristall.

**[0141]** Mittels des doppelbrechenden Linsenelements werden beispielsweise Teilstrahlen 114 mit unterschiedlichem Polarisationszustand derart ausgebildet, dass diese durch Fokussierung mittels der Fokussieroptik 116 mit einem Ortsversatz in  $z$ -Richtung

tung und/oder x-Richtung abgebildet werden. Es lassen sich dadurch beispielsweise in der Fokuszone 122 aus Teilstrahlen 114 mit unterschiedlichem Polarisationszustand ausgebildete Fokusverteilungen 124 mit einem Ortsversatz in z-Richtung und/oder x-Richtung anordnen.

**[0142]** Mittels des Polarisations-Strahlteilungselements 126 lässt sich beispielsweise eine Aneinanderreihung von Fokusverteilungen 124 in der Fokuszone 122 realisieren, wobei zueinander benachbarte Fokusverteilungen 124 jeweils aus Teilstrahlen 114 mit unterschiedlichen Polarisationszuständen gebildet sind.

**[0143]** Weiter kann es vorgesehen sein, dass die erste Strahlformungseinrichtung 106 ein Strahlformungselement 130 aufweist, mittels welchem die dem ersten Eingangsstrahl 108 zugeordnete Fokusverteilung nach dessen Einkopplung in die erste Strahlformungseinrichtung 106 modifizierbar ist.

**[0144]** Hinsichtlich der technischen Realisierung und Eigenschaften des Strahlformungselements 130 wird auf die wissenschaftliche Veröffentlichung „Structured light for ultrafast laser micro- and nano-processing“ von D. Flamm et al., arXiv:2012.10119v1 [physics.optics], 18. Dezember 2020, und auf das Buch „Laser Beam Shaping: Theory and Techniques“, Fred M. Dickey, ed., CRC press, 2014, verwiesen. Hierauf wird ausdrücklich und vollinhaltlich Bezug genommen.

**[0145]** Das Strahlformungselement 130 ist beispielsweise als diffraktives oder refraktives Phasenelement zur Aufprägung von definierten Wellenfrontaberrationen auf einen in das Strahlformungselement 130 eingekoppelten Strahl ausgebildet. Beispielsweise ist das Strahlformungselement 130 als diffraktiver field mapper ausgebildet.

**[0146]** Beispielsweise ist das Strahlformungselement 130 bezüglich der Haupt-Propagationsrichtung 128 des ersten Eingangsstrahls 108 vor oder hinter dem Strahlteilungselement 112 angeordnet.

**[0147]** Bei dem in **Fig. 1** gezeigten Beispiel ist das Strahlformungselement 130 zwischen dem Strahlteilungselement 112 und dem Polarisations-Strahlteilungselement 126 angeordnet. Beispielsweise wird der Eingangsstrahl 108 zuerst mit dem Strahlteilungselement 112 bearbeitet und anschließend mit dem Strahlformungselement 130 und/oder mit dem Polarisations-Strahlteilungselement 126.

**[0148]** Mittels dem Strahlformungselement 130 sind eine geometrische Form und/oder ein Intensitätsprofil der in die Fokuszone 122 abgebildeten Fokusverteilungen 124 modifizierbar.

**[0149]** Eine Modifikation der Fokusverteilungen 124 der Fokuszone 122 mittels dem Strahlformungselement 130 kann in einer zur Vorschubrichtung 129 parallelen Querschnittsebene erfolgen, wobei diese Querschnittsebene insbesondere senkrecht zur Haupt-Propagationsrichtung 128 und/oder senkrecht zur z-Richtung orientiert ist (**Fig. 3a**, **Fig. 3b** und **Fig. 3c**).

**[0150]** Weiter kann eine Modifikation der Fokusverteilungen 124 der Fokuszone 122 mittels dem Strahlformungselement 130 in einer zur Vorschubrichtung 129 senkrechten Querschnittsebene erfolgen (**Fig. 4a** und **Fig. 4b**). Diese Querschnittsebene ist bei dem gezeigten Beispiel parallel zur x-Richtung und parallel zur Haupt-Propagationsrichtung 128 und/oder z-Richtung orientiert.

**[0151]** Bezüglich der zur Vorschubrichtung 129 parallel orientierten Querschnittsebene erfolgt die Modifikation der Fokusverteilung 124 beispielsweise derart, dass die Form und/oder das Intensitätsprofil der Fokusverteilung 124 in dieser Querschnittsebene eine Vorzugsrichtung 132 aufweist. Unter dieser Vorzugsrichtung 132 ist insbesondere eine Richtung zu verstehen, in welcher eine Erstreckungslänge der Fokusverteilung 124 lokal oder global maximiert ist. Beispielsweise ist unter der Vorzugsrichtung 132 eine HauptErstreckungsrichtung der Fokusverteilung 124 zu verstehen.

**[0152]** Bei dem in **Fig. 3b** gezeigten Beispiel ist die Fokusverteilung 124 in der zur Vorschubrichtung 129 parallelen Ebene elliptisch und/oder als Ellipse ausgebildet. Die Vorzugsrichtung 132 ist in diesem Fall parallel zu einer großen Halbachse dieser Ellipse orientiert.

**[0153]** Es ist grundsätzlich auch möglich, dass die Fokusverteilung 124 mehrere Vorzugsrichtungen 132 aufweist. Bei dem in **Fig. 3c** gezeigten Beispiel ist die Fokusverteilung 124 in der zur Vorschubrichtung 129 parallelen Ebene rechteckförmig und/oder als Rechteck und insbesondere quadratisch ausgebildet. In diesem Fall weist die Fokusverteilung 124 eine erste Vorzugsrichtung 132'a auf, welche beispielsweise parallel zur x-Richtung orientiert ist, und eine zweite Vorzugsrichtung 132'b, welche beispielsweise quer und insbesondere senkrecht zur x-Richtung orientiert ist, d.h. in dem gezeigten Beispiel parallel zur y-Richtung.

**[0154]** Beispielsweise liegen die erste Vorzugsrichtung 132'a und die zweite Vorzugsrichtung 132'b jeweils parallel zu Verbindungslinien zwischen einander gegenüberliegenden Ecken des Rechtecks.

**[0155]** Es kann vorgesehen sein, dass die dem ersten Eingangsstrahl 108 zugeordnete Fokusverteilung

124 in der zur Vorschubrichtung 129 senkrecht orientierten Querschnittsebene eine längliche und/oder langgezogene Form aufweist (**Fig. 4a** und **Fig. 4b**). Dies wird beispielsweise dadurch realisiert, dass dem ersten Eingangsstrahl 108, welcher in die erste Strahlformungseinrichtung 106 eingekoppelt wird, ein quasi-nichtbeugendes und/oder Bessel-artiges Strahlprofil zugeordnet ist.

**[0156]** Die Fokusverteilung 124 weist beispielsweise eine Haupterstreckungsrichtung 134 auf, entlang welcher die Fokusverteilung 124 in der zur Vorschubrichtung 129 senkrecht orientierten Querschnittsebene insbesondere eine größte Länge und/oder insbesondere eine größte Ausdehnung aufweist (siehe auch **Fig. 3c**).

**[0157]** Beispielsweise ist die Haupterstreckungsrichtung 134 parallel zu einer Verbindungslinie zwischen einem Anfangspunkt und einem Endpunkt der Fokusverteilung 124 bezüglich einer Richtung größter Ausdehnung der Fokusverteilung 124 orientiert.

**[0158]** Insbesondere kann es vorgesehen sein, dass mittels dem Strahlformungselement 130 eine Ausrichtung 136 und/oder Orientierung der Fokusverteilung 124 in der zur Vorschubrichtung 129 senkrecht orientierten Querschnittsebene anpassbar ist, wobei beispielsweise die Ausrichtung 136 der jeweiligen Haupterstreckungsrichtung 134 der Fokusverteilung 124 anpassbar ist.

**[0159]** Bei dem in den **Fig. 4a** und **Fig. 4b** gezeigten Beispielen ist die Ausrichtung 136 der jeweiligen Fokusverteilung 124 in der x-z-Ebene anpassbar.

**[0160]** Die jeweilige Ausrichtung 136 der Fokusverteilungen 124 wird mittels dem Strahlformungselement 130 beispielsweise derart angepasst, dass die Ausrichtung 136 parallel oder näherungsweise parallel zu einer der jeweiligen Fokusverteilung 124 zugeordneten lokalen Erstreckungsrichtung 138 der Fokuszone 122 orientiert ist.

**[0161]** Unter der lokalen Erstreckungsrichtung 138 der Fokuszone 122 ist beispielsweise eine lokale Abstandsrichtung von benachbarten Fokusverteilungen 124, beispielsweise von zwei oder drei benachbarten Fokusverteilungen 124, zu verstehen. Die Fokusverteilungen 124 der Fokuszone 122 können beispielsweise in unterschiedlichen Abschnitten der Fokuszone 122 mit unterschiedlichen lokalen Erstreckungsrichtungen 138 angeordnet sein.

**[0162]** In der zur Vorschubrichtung 129 senkrecht orientierten Querschnittsebene kann die Fokusverteilung 124 durch Anpassung mittels dem Strahlformungselement 130 beispielsweise mit einer gekrümmten Form versehen werden (**Fig. 4b**). Bei-

spielsweise lässt sich dadurch die Fokusverteilung 124 als gekrümmter Bessel-artiger Strahl und/oder als beschleunigter Bessel-artiger Strahl erzeugen.

**[0163]** Hinsichtlich der Ausbildung und Eigenschaften von quasi-nichtbeugenden und/oder Bessel-artigen Strahlen mit gekrümmter Form wird auf die wissenschaftliche Veröffentlichung „Bessel-like optical beams with arbitrary trajectories“ von I. Chremmos et al., Optics Letters, Vol. 37, No. 23, 1. Dezember 2012, verwiesen.

**[0164]** Beispielsweise weist die Fokusverteilung 124 eine Längsmittelachse 140 auf, entlang welcher sie sich erstreckt. Diese Längsmittelachse 140 ist beispielsweise geradlinig ausgebildet (**Fig. 4a**). Im Fall einer Fokusverteilung mit gekrümmter Form weist die Längsmittelachse 140 eine gekrümmte Form oder eine abschnittsweise gekrümmte Form auf (**Fig. 4b**).

**[0165]** Die der Fokuszone 122 zugeordneten Fokusverteilungen 124 werden mittels der ersten Strahlformungseinrichtung 106 entlang einer Längsachse 142 der Fokuszone 122 angeordnet, welche beispielsweise geradlinig ausgebildet ist (**Fig. 4a** und **Fig. 4b**).

**[0166]** Die Längsachse 142 ist nicht notwendigerweise geradlinig und/oder stetig ausgebildet. Beispielsweise kann die Längsachse 142 zumindest abschnittsweise gekrümmt sein. Es ist auch möglich, dass die Längsachse 142 Richtungswechsel und insbesondere unetstetige Richtungswechsel aufweist.

**[0167]** Bei dem in **Fig. 5** gezeigten Beispiel erstreckt sich die Fokuszone 122 in dem Material 102 des Werkstücks 104 von einer ersten Außenseite 144 des Werkstücks 104 zu einer zweiten Außenseite 146 des Werkstücks 104, wobei die zweite Außenseite 146 bezüglich einer Tiefenrichtung 148 des Werkstücks 104 zu der ersten Außenseite 144 beabstandet ist. Insbesondere durchläuft die Fokuszone 122 das Werkstück 104 in Tiefenrichtung 144 vollständig und/oder unterbrechungsfrei.

**[0168]** Die erste Außenseite 144 und die zweite Außenseite 146 des Werkstücks 104 sind beispielsweise parallel oder näherungsweise parallel zueinander orientiert.

**[0169]** Zur Laserbearbeitung des Werkstücks 104 wird die Fokuszone 122 beispielsweise durch die erste Außenseite 144 oder durch die zweite Außenseite 146 in das Material 102 des Werkstücks 104 eingebracht und/oder eingekoppelt.

**[0170]** Die Fokuszone 122 weist einen von der ersten Außenseite 144 ausgehenden ersten Abschnitt 150 auf, an welchen sich in Tiefenrichtung 148 ein zweiter Abschnitt 152 der Fokuszone 122 anschließt.

Weiter weist die Fokuszone 122 einen auf diesen zweiten Abschnitt 152 in Tiefenrichtung 148 folgenden dritten Abschnitt 154 auf.

**[0171]** Bei dem gezeigten Beispiel ist die Längsachse 142 der Fokuszone 122 in jedem der Abschnitte 150, 152 und 154 geradlinig ausgebildet, wobei die Längsachse 142 an den Übergängen von dem ersten Abschnitt 150 zu dem zweiten Abschnitt 152 und von dem zweiten Abschnitt 152 zu dem dritten Abschnitt 154 insbesondere jeweils einen Richtungswechsel aufweist.

**[0172]** Jedem dieser Abschnitte 150, 152 und 154 ist eine unterschiedliche lokale Erstreckungsrichtung 138 zugeordnet, mit welcher die Fokusverteilungen 122 angeordnet sind.

**[0173]** Weiter ist jedem der Abschnitte 150, 152 und 154 ein bestimmter Anstellwinkel  $\alpha$  zugeordnet. Unter diesem Anstellwinkel  $\alpha$  ist ein kleinster Winkel zwischen der lokalen Erstreckungsrichtung 138 des entsprechenden Abschnitts 150, 152, 154 und der ersten Außenseite 144 und/oder oder zweiten Außenseite 146 zu verstehen.

**[0174]** Beispielsweise weisen der erste Abschnitt 150 und der dritte Abschnitt 154 einen Anstellwinkel  $\alpha$  von  $45^\circ$  auf und der zweite Abschnitt 152 weist einen Anstellwinkel  $\alpha$  von  $90^\circ$  auf.

**[0175]** Das Material 102 des Werkstücks 104 ist für eine Wellenlänge von Laserstrahlen, aus welchen die Fokuszone 122 und/oder die Fokusverteilungen 124 gebildet sind, transparenten Material hergestellt.

**[0176]** Zur Laserbearbeitung des Materials 102 wird die Fokuszone 122 in das Material 102 eingebracht. Durch diese Beaufschlagung des Materials 102 mit der Fokuszone 122 werden an den Fokusverteilungen 124 jeweils lokalisierte Materialmodifikationen 156 ausgebildet (**Fig. 6**), welche beispielsweise entlang der Längsachse 142 der Fokuszone 122 beabstandet zueinander angeordnet sind.

**[0177]** Durch geeignete Wahl von Bearbeitungsparametern, wie beispielsweise Laserparametern und/oder Vorschubgeschwindigkeit, können die Materialmodifikationen 156 als Typ III Modifikationen erzeugt werden, welche zu einer spontanen Bildung von Rissen 157 im Material 102 führen (**Fig. 6**). Die bei der Laserbearbeitung des Materials 102 ausgebildeten Risse 157 erstrecken sich insbesondere zwischen einander benachbarten Materialmodifikationen 156.

**[0178]** Unter der Vorschubgeschwindigkeit ist eine Geschwindigkeit einer Relativbewegung zwischen der Fokuszone 122 und dem Material 102 in Vorschubrichtung 129 zu verstehen.

**[0179]** Alternativ hierzu ist es möglich, durch geeignete Wahl der Bearbeitungsparameter die Materialmodifikationen 156 als Typ I und/oder Typ II Modifikationen zu erzeugen, welche mit einer Wärmeakkumulation im Material 102 und/oder mit einer Änderung eines Brechungsindex des Materials 102 einhergehen.

**[0180]** Die Ausbildung der Materialmodifikationen 156 als Typ I und/oder Typ II Modifikationen ist mit einer Wärmeakkumulation im Material 102 des Werkstücks 104 assoziiert. Insbesondere liegen die erzeugten Materialmodifikationen 156 in diesem Fall derart dicht aneinander, dass es bei deren Ausbildung durch Beaufschlagung des Materials 102 mit der Fokuszone 122 zu dieser Wärmeakkumulation kommt (angedeutet in **Fig. 7**).

**[0181]** Bei einer Ausführungsform umfasst die Vorrichtung 100 eine zweite Strahlformungseinrichtung 158, welche bezüglich der Haupt-Propagationsrichtung 128 des in die erste Strahlformungseinrichtung 106 eingekoppelten ersten Eingangsstrahls 108 vor dieser ersten Strahlformungseinrichtung 106 angeordnet ist. Mittels der zweiten Strahlformungseinrichtung 158 lässt sich die dem ersten Eingangsstrahl 108 zugeordnete Fokusverteilung vor dessen Einkopplung in die erste Strahlformungseinrichtung 106 anpassen.

**[0182]** Bei dieser Ausführungsform wird in die zweite Strahlformungseinrichtung 158 ein zweiter Eingangsstrahl 160 eingekoppelt, welche insbesondere mittels der Laserquelle 110 bereitgestellt ist und/oder ein aus der Laserquelle 100 ausgekoppelter Laserstrahl ist.

**[0183]** Analog zu dem ersten Eingangsstrahl 108 ist demnach unter dem zweiten Eingangsstrahl 160 insbesondere ein Strahlenbündel verstehen, welches eine Mehrzahl insbesondere parallel verlaufender Strahlen umfasst.

**[0184]** Der in die erste Strahlformungseinrichtung 106 eingekoppelte erste Eingangsstrahl 128 ist bei dem gezeigten Beispiel ein aus der zweiten Strahlformungseinrichtung 158 ausgekoppelter Strahl und/oder ein aus der zweiten Strahlformungseinrichtung 158 ausgekoppeltes Strahlenbündel.

**[0185]** Mittels der zweiten Strahlformungseinrichtung 158 erfolgt eine Phasenaufprägung auf den zweiten Eingangsstrahl 160, wodurch die dem in die erste Strahlformungseinrichtung 106 eingekoppelten ersten Eingangsstrahl 108 zugeordnete Fokusverteilung definiert wird. Es lässt sich dadurch die geometrische Form und/oder das Intensitätsprofil der dem ersten Eingangsstrahl 108 zugeordneten Fokusverteilung mittels der zweiten Strahlformungseinrichtung 158 definieren.

**[0186]** Der in die zweite Strahlformungseinrichtung 158 eingekoppelte zweite Eingangsstrahl 160 weist beispielsweise ein gaußförmiges Strahlprofil auf, d.h. der zweite Eingangsstrahl 160 weist eine gaußförmige Form und/oder ein gaußförmiges Intensitätsprofil auf.

**[0187]** Bei einer Ausführungsform ist die zweite Strahlformungseinrichtung 158 derart eingerichtet und ausgebildet, dass mittels der zweiten Strahlformungseinrichtung 158 dem in die erste Strahlformungseinrichtung 106 eingekoppelten ersten Eingangsstrahl 108 ein quasi-nichtbeugendes und/oder Bessel-artiges Strahlprofil zugeordnet wird.

**[0188]** Der erste Eingangsstrahl 108 lässt sich dadurch insbesondere in eine Fokusverteilung mit einem quasi-nichtbeugenden und/oder Bessel-artigen Strahlprofil abbilden. Bei dieser Ausführungsform weist die in die Fokuszone 122 abgebildete Fokusverteilung 124 eine langgezogene Form und/oder ein langgezogenes Intensitätsprofil auf (**Fig. 2** und **Fig. 8**). Insbesondere weist die Fokusverteilung 124 bei dieser Ausführungsform eine Hauptstreckungsrichtung 162 auf, entlang welcher sie sich erstreckt.

**[0189]** Beispielsweise ist oder umfasst die zweite Strahlformungseinrichtung 158 ein diffraktives optisches Element und/oder ein Axiconelement zur Aufprägung der Phasenverteilung auf den zweiten Eingangsstrahl 160 zur Ausbildung der Fokusverteilung 124 mit langgezogener Form und/oder langgezogenem Intensitätsprofil.

**[0190]** Der bei dieser Ausführungsform mittels der zweiten Strahlformungseinrichtung 158 bereitgestellte erste Eingangsstrahl 108 wird in die erste Strahlformungseinrichtung 106 eingekoppelt. Dieser erste Eingangsstrahl 108 wird, wie vorstehend beschrieben, mittels des Strahlteilungselements 112 der ersten Strahlformungseinrichtung 106 in voneinander verschiedene Teilstrahlen 114 aufgeteilt, welche mittels der Fokussieroptik 116 in die unterschiedlichen Teilbereiche 120 der Fokuszone 122 abgebildet werden. Die mittels der Fokussieroptik 116 in die Fokuszone 122 abgebildeten Fokusverteilungen 124 stellen hinsichtlich ihrer Form und/oder ihrem Intensitätsprofil Kopien der dem ersten Eingangsstrahl 108 zugeordneten Fokusverteilung dar, wobei durch Fokussierung mittels der Fokussieroptik 116 insbesondere eine verkleinerte Abbildung der Fokusverteilungen 124 erfolgt.

**[0191]** Ein Beispiel von mittels der Fokussieroptik 116 in die Fokuszone 122 abgebildeten Fokusverteilungen 124 mit langgezogener Form und/oder langgezogenem Intensitätsprofil ist in **Fig. 8** als Graustufenverteilung dargestellt, wobei hellere Graustufenwerte für größere Intensitäten stehen.

**[0192]** Bei dem in **Fig. 8** gezeigten Beispiel sind die Fokusverteilungen 124 quer zur Längsachse 142 und/oder zur lokalen Erstreckungsrichtung 138 orientiert.

**[0193]** Es kann vorgesehen sein, dass in der ersten Strahlformungseinrichtung 106 wie vorstehend beschrieben eine Strahlformung mittels dem Strahlformungselement 130 und/oder eine Strahlteilung mittels dem Polarisations-Strahlteilungselement 126 durchgeführt wird. In diesem Fall basieren die mittels der Fokussieroptik 116 abgebildeten Fokusverteilungen 124 hinsichtlich ihrer Form und/oder ihrem Intensitätsprofil auf der dem ersten Eingangsstrahl 108 zugeordneten Fokusverteilung, weisen aber aufgrund der Bearbeitung mittels dem Strahlformungselement 130 und/oder dem Polarisations-Strahlteilungselement 126 gegenüber der dem ersten Eingangsstrahl 108 zugeordneten Fokusverteilung eine modifizierte Form und/oder modifizierte Polarisationsseigenschaften auf.

**[0194]** Bei einer weiteren Ausführungsform ist die zweite Strahlformungseinrichtung 158 derart eingerichtet und ausgebildet, dass mittels der zweiten Strahlformungseinrichtung 158 dem in die erste Strahlformungseinrichtung 106 eingekoppelten ersten Eingangsstrahl 108 ein Strahlprofil zugeordnet wird, dessen Intensitätsprofil ausgehend von einem Intensitätsmaximum 164 bezüglich einer Hauptstreckungsrichtung 166 und/oder Hauptstreckungsachse einen abrupten Intensitätsabfall aufweist (**Fig. 9a** und **Fig. 9b**). Derartige Strahlen werden beispielsweise als abrupt-selbstfokussierende Strahlen bezeichnet.

**[0195]** Es lässt sich dadurch durch Abbildung der aus der ersten Strahlformungseinrichtung 106 ausgekoppelten Teilstrahlen 114 die Fokuszone 122 aus einer Mehrzahl von Fokusverteilungen 124 mit einem solchen Intensitätsprofil ausbilden (**Fig. 10**). Insbesondere weist dann das Intensitätsprofil jeder der Fokusverteilungen 124 der Fokuszone 122 den abrupten Intensitätsabfall auf.

**[0196]** Eine Graustufendarstellung einer zugehörigen zweidimensionalen Phasenverteilung von aus der zweiten Strahlformungseinrichtung 158 ausgekoppelten Strahlen ist in **Fig. 11** dargestellt, wobei die zugeordnete Graustufenskala von Weiß (Phase +Pi) bis Schwarz (Phase -Pi) reicht.

**[0197]** Insbesondere ist die Phasenverteilung bezüglich einer zugeordneten Mittelachse 167 und/oder Strahlmittelachse radialsymmetrisch und/oder rotationssymmetrisch ausgebildet. Diese Mittelachse 167 ist beispielsweise parallel oder näherungsweise parallel zur einer Haupt-Propagationsrichtung 267 des auf die zweite Strahlformungs-

einrichtung 158 einfallenden zweiten Eingangsstrahls 160 orientiert.

**[0198]** Insbesondere nimmt eine der Phasenverteilung zugeordnete Phasenfrequenz in radialer Richtung 367 ausgehend von der Mittelachse 167 mit zunehmendem radialen Abstand zu der Mittelachse 167 zu.

**[0199]** Bei dieser Ausführungsform wird dem in die erste Strahlformungseinrichtung 106 eingekoppelten ersten Eingangsstrahl 108 eine Form und/oder ein Intensitätsprofil eines abrupt-selbstfokussierenden Strahls zugeordnet. Hinsichtlich der Ausbildung und Eigenschaften derartiger Strahlen wird auf die wissenschaftlichen Veröffentlichungen „Abruptly autofocusing waves“ von Efremidis, Nikolaos K., and Demetrios N. Christodoulides, *Optics letters* 35.23 (2010): 4045-4047 und „Observation of abruptly autofocusing waves“ von Papazoglou et al., *Optics letters* 36.10 (2011): 1842-1844, verwiesen. Hierauf wird ausdrücklich und vollinhaltlich Bezug genommen.

**[0200]** Bei der in den **Fig. 9a** und **Fig. 9b** gezeigten Ausführungsform weist die Fokusverteilung 124 ausgehend von dem Intensitätsmaximum 164 in Haupterstreckungsrichtung 166 eine Intensitätsabfallflanke 165 auf.

**[0201]** Charakteristisch für den abrupt-selbstfokussierenden Strahl ist, dass an der Intensitätsabfallflanke 165 die Intensität ausgehend von dem Intensitätsmaximum 164 auf einen Wert von  $1/e^2$  näherungsweise 3-Fach schneller abfällt als dies bei einem gaußförmigen Intensitätsprofil der Fall wäre.

**[0202]** Das Intensitätsmaximum 164 ist insbesondere ein Hauptmaximum und/oder globales Maximum des Intensitätsprofils des abrupt-selbstfokussierenden Strahls. Insbesondere weist das Intensitätsprofil ein oder mehrere Nebenmaxima 164a auf, welche ausgehend von dem Intensitätsmaximum 164 entgegen der Haupterstreckungsrichtung 166 auf das Intensitätsmaximum 164 folgen. Insbesondere weisen die Nebenmaxima 164 mit zunehmendem Abstand vom Intensitätsmaximum 164 bezüglich der Haupterstreckungsrichtung 166 jeweils geringere maximale Intensitätswerte auf.

**[0203]** Insbesondere kann es vorgesehen sein, dass die zweite Strahlformungseinrichtung 158 als Nahfeldstrahlformungseinrichtung ausgebildet ist.

**[0204]** Beispielsweise wird mittels der zweiten Strahlformungseinrichtung 158 ein Zwischenbild 168 (angedeutet in **Fig. 2**) der dem ersten Eingangsstrahl 108 zugeordneten Fokusverteilung ausgebildet. Dieses Zwischenbild 168 ist bezüglich der

Haupt-Propagationsrichtung 128 des ersten Eingangsstrahls 108 zwischen der zweiten Strahlformungseinrichtung 158 und der ersten Strahlformungseinrichtung 106 angeordnet.

**[0205]** Insbesondere ist der zweiten Strahlformungseinrichtung 158 eine Fernfeldoptik 170 zugeordnet, mittels welcher eine Fernfeldfokussierung eines aus der zweiten Strahlformungseinrichtung 158 ausgekoppelten Ausgangsstrahls 172 und/oder Ausgangsstrahlbündels in eine Brennebene 174 der Fernfeldoptik 170 erfolgt.

**[0206]** Insbesondere erfolgt mittels der Fernfeldoptik 170 eine Fernfeldfokussierung des Zwischenbilds 168 in die Brennebene 174.

**[0207]** In dieser Brennebene 174 wird durch die Fernfeldfokussierung des Ausgangsstrahls 172 und/oder Ausgangsstrahlbündels eine Intensitätsverteilung in Form einer Ringstruktur und/oder Ringsegmentstruktur ausgebildet, welche insbesondere um eine optische Achse 176 der Fernfeldoptik 170 angeordnet ist.

**[0208]** Bei dem in **Fig. 2** gezeigten Beispiel wird mittels der Fernfeldoptik 170 und der Fokussieroptik 116 eine Teleskopeinrichtung 178 der Vorrichtung 100 ausgebildet. Hierzu weist die Fernfeldoptik 170 insbesondere eine größere Brennweite auf als die Fokussieroptik 116.

**[0209]** Die Brennebene 174 ist insbesondere eine gemeinsame Brennebene der Fernfeldoptik 170 und der Fokussieroptik 116. Insbesondere ist die Brennebene 174 eine Brennebene der Teleskopeinrichtung 178.

**[0210]** Die erste Strahlformungseinrichtung 106 ist insbesondere in der Brennebene 174 und/oder in einem Bereich der Brennebene 174 angeordnet. Unter diesem Bereich ist ein sich um die Brennebene 174 erstreckender Bereich zu verstehen, welcher beispielsweise zu der Brennebene 174 einen maximalen Abstand von 10 % der Brennweite der Fernfeldoptik 170 aufweist. Eine Abstandsrichtung dieses maximalen Abstands ist insbesondere parallel zur optischen Achse 176 und/oder zur Haupt-Propagationsrichtung 128 des ersten Eingangsstrahls 108 orientiert.

**[0211]** Unter dem genannten Bereich der Brennebene 174 ist insbesondere ein Fernfeldbereich der Teleskopeinrichtung 178 zu verstehen, in welchem insbesondere eine Fernfeldfokussierung des aus der zweiten Strahlformungseinrichtung 158 ausgekoppelten Ausgangsstrahls 172 und/oder des in die erste Strahlformungseinrichtung 106 einzukoppelnden ersten Eingangsstrahls 108 vorliegt.

**[0212]** Mittels dem Strahlteilungselement 112 der Vorrichtung 100 ist es grundsätzlich möglich, die Fokusverteilungen 124 entlang unterschiedlicher Pfade anzuordnen und dadurch Fokuszonen mit unterschiedlicher Geometrie auszubilden.

**[0213]** Bei dem in den **Fig. 12a** und **Fig. 12b** gezeigten Beispiel sind die Fokusverteilungen 124 entlang der Längsachse 142 der Fokuszone 122 angeordnet, wobei die Längsachse 142 geradlinig ausgebildet ist. Der Fokuszone 122 ist in diesem Fall beispielsweise ein einziger Anstellwinkel  $\alpha$  zugeordnet, mit welchem die Fokuszone 122 bezüglich der ersten Außenseite 144 und/oder der zweiten Außenseite 146 angewinkelt ist. Insbesondere weist die Fokuszone 122 bei diesem Ausführungsbeispiel durchgängig die gleiche lokale Erstreckungsrichtung 138 auf, d.h. die lokale Erstreckungsrichtung 138 ist insbesondere über die gesamte Erstreckung der Fokuszone 122 konstant.

**[0214]** Bei dem Ausführungsbeispiel gemäß den **Fig. 12c** und **Fig. 12d** weist die Fokuszone 122 einen ersten Abschnitt 180 und einen zweiten Abschnitt 182 auf, wobei die Fokusverteilungen 124 der Fokuszone 122 in dem ersten Abschnitt 180 und in dem zweiten Abschnitt 182 jeweils mit einer unterschiedlichen lokalen Erstreckungsrichtung 138 angeordnet sind. Beispielsweise weist die Fokuszone 122 bei diesem Ausführungsbeispiel im ersten Abschnitt 180 und im zweiten Abschnitt 182 jeweils durchgängig die gleiche lokale Erstreckungsrichtung 138 auf.

**[0215]** Insbesondere weist die Fokuszone 122 in dem ersten Abschnitt 180 und in dem zweiten Abschnitt 182 den gleichen Anstellwinkel  $\alpha$  auf, mit welchem die Fokuszone 122 bezüglich der ersten Außenseite 144 und/oder der zweiten Außenseite 146 angewinkelt ist. Insbesondere ist dann ein kleinster Winkel zwischen der jeweiligen lokalen Erstreckungsrichtung 138 des ersten Abschnitts 180 und des zweiten Abschnitts 182 doppelt so groß wie der Anstellwinkel  $\alpha$ .

**[0216]** Die Längsachse 142 der Fokuszone 122, entlang welcher die Fokusverteilungen 124 angeordnet sind, ist nicht notwendigerweise geradlinig ausgebildet. Beispielsweise kann es vorgesehen sein, dass die Längsachse 142 zumindest abschnittsweise eine gekrümmte Form aufweist. Beispielsweise weist die Fokuszone 122 bei dem in den **Fig. 12e** und **Fig. 12f** gezeigten Beispielen eine durchgängig gekrümmte Form auf.

**[0217]** Beispielsweise weist dann die Fokuszone 122 eine variierende lokale Erstreckungsrichtung 138 auf, d.h. die lokale Erstreckungsrichtung 138 der Fokuszone 122 ist an verschiedenen Positionen der Fokuszone 122 und/oder an verschiedenen Fokusverteilungen 124 der Fokuszone 122 jeweils unterschiedlich.

**[0218]** In den **Abb. 12b**, **Abb. 12d** und **Abb. 12f** ist jeweils eine den **Abb. 12a**, **Abb. 12c** bzw. **Abb. 12e** zugeordnete Phasenverteilung von aus dem Strahlteilungselement 112 ausgekoppelten Strahlen dargestellt, wobei die zugeordnete Graustufenskala von Weiß (Phase +Pi) bis Schwarz (Phase -Pi) reicht.

Die erfindungsgemäße Vorrichtung 100 funktioniert wie folgt:

**[0219]** Zur Durchführung der Laserbearbeitung wird das Material 102 des Werkstücks 104 mit der Fokuszone 122 beaufschlagt und die Fokuszone 122 wird in Vorschubrichtung 129 relativ zu dem Werkstück 104 durch dessen Material 102 bewegt.

**[0220]** Das Material 102 ist hierbei insbesondere ein für eine Wellenlänge von Strahlen, aus welchen die Fokuszone 122 gebildet ist, transparentes oder teiltransparentes Material. Beispielsweise ist das Material 102 ein Glasmaterial.

**[0221]** Die Fokuszone 122 wird beispielsweise entlang einer vordefinierten Bearbeitungslinie 184 und/oder Bearbeitungsfläche durch das Material 102 des Werkstücks 104 bewegt. Die Bearbeitungslinie 184 kann beispielsweise gerade und/oder gekrümmte Abschnitte aufweisen.

**[0222]** Durch Beaufschlagung des Materials 102 mit der Fokuszone 122 werden in dem Material 102 Materialmodifikationen 156 ausgebildet, welche entlang der Längsachse 142 der Fokuszone 122 angeordnet sind (**Fig. 5** und **Fig. 13a**). Es werden dadurch in dem Material Modifikationslinien 186 ausgebildet, an welchen die Materialmodifikationen 156 angeordnet sind, wobei diese Modifikationslinien 186 insbesondere eine der Längsachse 142 der Fokuszone 122 entsprechende Form aufweisen. Bei dem in **Fig. 13a** gezeigten Beispiel erstrecken sich die Modifikationslinien 186 von der ersten Außenseite 144 bis zur zweiten Außenseite 146.

**[0223]** Aufgrund der Relativbewegung der Fokuszone 122 bezüglich dem Material 102 wird eine Mehrzahl von Modifikationslinien 186 ausgebildet, welche parallel zur Vorschubrichtung 129 beabstandet positioniert sind. Es ergibt sich dadurch insbesondere eine flächige Ausbildung von Materialmodifikationen 156 in dem Material 102 (**Fig. 13a**).

**[0224]** Ein Abstand von in Vorschubrichtung 129 benachbarten Modifikationslinien 186 lässt sich beispielsweise durch geeignete Wahl einer Pulsdauer eines Laserstrahls, aus welchem die Fokuszone 122 gebildet ist, und/oder einer in Vorschubrichtung 129 orientierten Vorschubgeschwindigkeit definieren.

**[0225]** Die entlang der Bearbeitungslinie 184 und/oder der Bearbeitungsfläche ausgebildeten Materialmodifikationen 156 haben insbesondere eine Verringerung einer Festigkeit des Materials 102 zur Folge. Es lässt sich dadurch das Material 102 nach Ausbildung der Materialmodifikationen 156 an der Bearbeitungslinie 184 und/oder Bearbeitungsfläche, beispielsweise durch Ausübung einer mechanischen Kraft, in zwei voneinander verschiedene Segmente 188a und 188b trennen (**Fig. 13b**).

**[0226]** Das Segment 188b ist bei dem gezeigten Beispiel ein Gutstücksegment mit einer gewünschten Kantenform. Das Segment 188a ist in diesem Fall ein Restwerkstücksegment und/oder Verschnittsegment.

**[0227]** Vorzugsweise erfolgt eine Beaufschlagung des Materials 102 mit der Fokuszone 122 derart, dass die Fokuszone 122 das Material 102 durchdringt. Beispielsweise erstreckt sich die Fokuszone 122 durchgängig und/oder unterbrechungsfrei über eine gesamte Dicke D des Materials 102 durch das Material 102. Es lässt sich dadurch beispielsweise, wie in den **Fig. 13a** und **Fig. 13b** gezeigt, eine vollständige Trennung des Materials über seine Dicke D erreichen.

**[0228]** Es ist auch möglich, mittels der Fokuszone 122 einen Kantenbereich 190 des Materials 102 zu bearbeiten (angedeutet in **Fig. 13a**). Beispielsweise erstreckt sich die Fokuszone 122 dann durchgängig und/oder unterbrechungsfrei zwischen zueinander quer orientierten Außenseiten des Werkstücks 104. Es lässt sich dadurch beispielsweise in dem Kantenbereich 190 ein Kantensegment von dem Werkstück 104 abtrennen. Dadurch kann das Werkstück 104 in dem Kantenbereich 190 beispielsweise abgeschragt und/oder angefast werden.

**[0229]** Das Material 102 des Werkstücks 104 ist beispielsweise Quarzglas. Beispielsweise weist dann zur Ausbildung der Materialmodifikationen 156 als Typ I und/oder Typ II Modifikationen ein Laserstrahl, aus welchem die Fokusverteilungen 124 der Fokuszone 122 gebildet sind, eine Wellenlänge von 1030 nm und eine Pulsdauer von 1 ps auf. Weiter beträgt dann eine der Fokussieroptik 116 zugeordnete numerische Apertur 0,4 und eine einer einzigen Fokusverteilung 124 zugeordnete Pulsenergie 100 nJ.

**[0230]** Zur Ausbildung der Materialmodifikationen 156 als Typ III Modifikationen beträgt, bei ansonsten gleichen Parametern, die einer einzigen Fokusverteilung 124 zugeordnete Pulsenergie 1000 nJ.

#### Bezugszeichenliste

$\alpha$  Anstellwinkel

D	Dicke
d1	Abstand
dx	Abstand in x-Richtung
dz	Abstand in z-Richtung
100	Vorrichtung
102	Material
104	Werkstück
106	erste Strahlformungseinrichtung
108	erster Eingangsstrahl
110	Laserquelle
112	Strahlteilungselement
114	Teilstrahl
114a	Teilstrahl
114b	Teilstrahl
116	Fokussieroptik
120	Teilbereich
120a	Teilbereich
120b	Teilbereich
122	Fokuszone
124	Fokusverteilung
126	Polarisations-Strahlteilungselement
128	Haupt-Propagationsrichtung
129	Vorschubrichtung
130	Strahlformungselement
132	Vorzugsrichtung
132'a	erste Vorzugsrichtung
132'b	zweite Vorzugsrichtung
134	Haupterstreckungsrichtung
136	Ausrichtung
138	lokale Erstreckungsrichtung
140	Längsmittelachse
142	Längsachse
144	erste Außenseite
146	zweite Außenseite
148	Tiefenrichtung
150	erster Abschnitt
152	zweiter Abschnitt
154	dritter Abschnitt
156	Materialmodifikation
157	Riss

158	zweite Strahlformungseinrichtung
160	zweiter Eingangsstrahl
162	Haupterstreckungsrichtung
164	Intensitätsmaximum
164a	Nebenmaximum
165	Intensitätsabfallflanke
166	Haupterstreckungsrichtung
167	Mittelachse
267	Haupt-Propagationsrichtung
367	radiale Richtung
168	Zwischenbild
170	Fernfeldoptik
172	Ausgangsstrahl
174	Brennebene
176	optische Achse
178	Teleskopeinrichtung
180	erster Abschnitt
182	zweiter Abschnitt
184	Bearbeitungslinie
186	Modifikationslinie
188a	Segment
188b	Segment
190	Kantenbereich

**ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG**

**Zitierte Patentliteratur**

- US 2020/0147729 A1 [0003]
- DE 102020207715 [0137]
- DE 102019217577 [0137]

## Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Laserbearbeitung eines Werkstücks (104), welches ein für die Laserbearbeitung transparentes Material (102) aufweist, umfassend eine erste Strahlformungseinrichtung (106) mit einem Strahlteilungselement (112) zur Aufteilung eines in die erste Strahlformungseinrichtung (106) eingekoppelten ersten Eingangsstrahls (108) in eine Mehrzahl von Teilstrahlen (114), und eine der ersten Strahlformungseinrichtung (106) zugeordnete Fokussieroptik (116) zur Abbildung von aus der ersten Strahlformungseinrichtung (106) ausgekoppelten Teilstrahlen (114) in mindestens eine Fokuszone (122), wobei die Aufteilung des ersten Eingangsstrahls (108) mittels dem Strahlteilungselement (112) durch Phasenaufprägung auf den ersten Eingangsstrahl (108) erfolgt, die Teilstrahlen (114) zur Ausbildung der mindestens einen Fokuszone (122) in unterschiedliche Teilbereiche (120) der mindestens einen Fokuszone (122) fokussiert werden, zur Laserbearbeitung des Werkstücks (104) die mindestens eine Fokuszone (122) mittels der Fokussieroptik (116) unter mindestens einem Anstellwinkel ( $\alpha$ ) zu einer Außenseite (144; 146) des Werkstücks (104) in das Material (102) eingebracht wird und wobei durch Beaufschlagung des Materials (102) mittels der mindestens einen Fokuszone (122) Materialmodifikationen (156) in dem Material (102) erzeugt werden, welche mit einer Änderung eines Brechungsindex des Materials (102) assoziiert sind.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die mittels der mindestens einen Fokuszone (122) in dem Material (102) erzeugten Materialmodifikationen (156) Typ I und/oder Typ II Modifikationen sind.

3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, **gekennzeichnet durch** eine zweite Strahlformungseinrichtung (158) zur Strahlformung des in die erste Strahlformungseinrichtung (106) eingekoppelten ersten Eingangsstrahls (108), wobei mittels der zweiten Strahlformungseinrichtung (158) durch Phasenaufprägung auf einen auf die zweite Strahlformungseinrichtung (158) einfallenden zweiten Eingangsstrahl (160) dem ersten Eingangsstrahl (108) eine Fokusverteilung mit einer definierten geometrischen Form und/oder mit einem definierten Intensitätsprofil zugeordnet wird, sodass durch Fokussierung der aus der ersten Strahlformungseinrichtung (106) ausgekoppelten Teilstrahlen (114) mittels der Fokussieroptik (116) in unterschiedlichen Teilbereichen (120) der Fokuszone (122) jeweils Fokusverteilungen (124) basierend auf dieser geometrischen Form und/oder basierend auf diesem Intensitätsprofil ausgebildet werden.

4. Vorrichtung nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Phasenaufprägung auf

den zweiten Eingangsstrahl (160) derart ist, dass die Fokusverteilung (124) bezüglich einer zugeordneten Haupterstreckungsrichtung (162) eine langgezogene Form aufweist, und/oder dass die Phasenaufprägung auf den zweiten Eingangsstrahl (160) derart ist, dass die Fokusverteilung (124) ein quasinichtbeugendes und/oder Bessel-artiges Intensitätsprofil aufweist.

5. Vorrichtung nach Anspruch 3 oder 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Phasenaufprägung auf den zweiten Eingangsstrahl (160) derart ist, dass die Fokusverteilung (124) bezüglich einer zugeordneten Haupterstreckungsrichtung (166) ein Intensitätsprofil aufweist, welches ausgehend von einer Maximalintensität an einem Intensitätsmaximum (164) des Intensitätsprofils auf das  $1/e^2$ -Fache der Maximalintensität um näherungsweise einen Faktor 3 schneller abfällt als dies bei einem gaußförmigen Intensitätsprofil der Fall ist, und/oder dass die Phasenaufprägung auf den zweiten Eingangsstrahl (160) derart ist, dass die Fokusverteilung (124) eine Form und/oder ein Intensitätsprofil eines abrupt-selbstfokussierenden Strahls aufweist.

6. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 3 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass mittels der zweiten Strahlformungseinrichtung (158) ein Zwischenbild (168) der Fokusverteilung (124) ausgebildet wird, und insbesondere **dadurch gekennzeichnet**, dass das Zwischenbild (168) der Fokusverteilung (124) bezüglich einer Haupt-Propagationsrichtung (267) des zweiten Eingangsstrahls (160) vor der ersten Strahlformungseinrichtung (106) angeordnet ist.

7. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 3 bis 6, **gekennzeichnet durch** eine der zweiten Strahlformungseinrichtung (158) zugeordnete Fernfeldoptik (170), wobei mittels der Fernfeldoptik (170) eine Fernfeldfokussierung eines aus der zweiten Strahlformungseinrichtung (158) ausgekoppelten Ausgangsstrahls (172) in eine Brennebene (174) der Fernfeldoptik (170) erfolgt, und insbesondere **dadurch gekennzeichnet**, dass die erste Strahlformungseinrichtung (106) in einem Bereich dieser Brennebene (174) angeordnet ist.

8. Vorrichtung nach Anspruch 6 und 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass mittels der Fernfeldoptik (170) eine Fernfeldfokussierung des mittels der zweiten Strahlformungseinrichtung (158) ausgebildeten Zwischenbilds (168) der Fokusverteilung (124) in die Brennebene (174) erfolgt.

9. Vorrichtung nach Anspruch 7 oder 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Fernfeldoptik (170) und die Fokussieroptik (116) eine Teleskopeinrichtung (178) ausbilden, und/oder dass die Fernfeldoptik (170) und die Fokussieroptik (116) eine gemeinsame Brennebene (174) aufweisen, wobei insbe-

sondere die erste Strahlformungseinrichtung (106) in einem Bereich dieser gemeinsamen Brennebene (174) angeordnet ist.

10. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass dem ersten Eingangsstrahl (108) eine Fokusverteilung mit einer definierten geometrischen Form und/oder mit einem definierten Intensitätsprofil zugeordnet ist, wobei den aus der ersten Strahlformungseinrichtung (106) ausgekoppelten Teilstrahlen (114) ebenfalls diese geometrische Form und/oder dieses Intensitätsprofil zugeordnet ist, und/oder wobei durch Fokussierung der aus der ersten Strahlformungseinrichtung (106) ausgekoppelten Teilstrahlen (114) mittels der Fokussieroptik (116) in unterschiedlichen Teilbereichen (120) der Fokuszone (122) jeweils Fokusverteilungen (124) basierend auf dieser geometrischen Form und/oder basierend auf diesem Intensitätsprofil ausgebildet werden.

11. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die erste Strahlformungseinrichtung (106) ein Strahlformungselement (130) zur Modifikation einer dem ersten Eingangsstrahl (108) zugeordneten Fokusverteilung aufweist, wobei mittels dem Strahlformungselement (130) eine Modifikation und/oder Ausrichtung der geometrischen Form und/oder des Intensitätsprofils der in die mindestens eine Fokuszone (122) abgebildeten Fokusverteilung (124) in einer zu einer Vorschubrichtung (129), in welche die mindestens eine Fokuszone (122) zur Laserbearbeitung des Werkstücks (104) relativ zu dem Werkstück (104) bewegt wird, senkrecht orientierten Querschnittsebene erfolgt, und/oder wobei mittels dem Strahlformungselement (130) eine Modifikation und/oder Ausrichtung der geometrischen Form und/oder des Intensitätsprofils der in die mindestens eine Fokuszone (122) abgebildeten Fokusverteilung (124) in einer zu einer Vorschubrichtung (129), in welche die mindestens eine Fokuszone (122) zur Laserbearbeitung des Werkstücks (104) relativ zu dem Werkstück (104) bewegt wird, parallel orientierten Querschnittsebene erfolgt.

12. Vorrichtung nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass mittels dem Strahlformungselement (130) eine Ausrichtung (136) einer Haupterstreckungsrichtung (134) der geometrischen Form und/oder des Intensitätsprofils der Fokusverteilung (124) in einer zur Vorschubrichtung (129) senkrecht orientierten Querschnittsebene einstellbar ist oder eingestellt wird, und insbesondere **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Einstellung der Ausrichtung (136) derart erfolgt, dass die Haupterstreckungsrichtung (134) parallel oder näherungsweise parallel zu einer korrespondierenden lokalen Erstreckungsrichtung (138) der Fokuszone (122) orientiert ist.

13. Vorrichtung nach Anspruch 11 oder 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass mittels dem Strahlformungselement (130) eine Modifikation des Intensitätsprofils der Fokusverteilung (124) in einer zur Vorschubrichtung (129) parallel orientierten Querschnittsebene derart erfolgt, dass das Intensitätsprofil mindestens eine Vorzugsrichtung (132) aufweist, wobei insbesondere die mindestens eine Vorzugsrichtung (132) parallel oder quer oder senkrecht zur Vorschubrichtung (129) orientiert ist.

14. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die erste Strahlformungseinrichtung (106) ein Polarisations-Strahlteilungselement (126) aufweist, welches derart eingerichtet ist, dass die aus der ersten Strahlformungseinrichtung (106) ausgekoppelten Teilstrahlen (114) jeweils einen von mindestens zwei unterschiedlichen Polarisationszuständen aufweisen, wobei mittels der Fokussieroptik (116) Teilstrahlen (114) mit unterschiedlichen Polarisationszuständen in benachbarte Teilbereiche (120) der mindestens einen Fokuszone (122) fokussiert werden.

15. Verfahren zur Laserbearbeitung eines Werkstücks (104), welches ein für die Laserbearbeitung transparentes Material (102) aufweist, bei dem mittels eines Strahlteilungselements (112) einer ersten Strahlformungseinrichtung (106) ein in die erste Strahlformungseinrichtung (106) eingekoppelter erster Eingangsstrahl (108) in eine Mehrzahl von Teilstrahlen (114) aufgeteilt wird und die aus der ersten Strahlformungseinrichtung (106) ausgekoppelten Teilstrahlen (114) mittels einer der ersten Strahlformungseinrichtung (106) zugeordneten Fokussieroptik (116) in mindestens eine Fokuszone (122) fokussiert werden, wobei die Aufteilung des ersten Eingangsstrahls (108) mittels dem Strahlteilungselement (112) durch Phasenaufprägung auf den ersten Eingangsstrahl (108) erfolgt, die Teilstrahlen (114) zur Ausbildung der mindestens einen Fokuszone (122) in unterschiedliche Teilbereiche (120) der mindestens einen Fokuszone (122) fokussiert werden, zur Laserbearbeitung des Werkstücks (104) die mindestens eine Fokuszone (122) mittels der Fokussieroptik (116) unter mindestens einem Anstellwinkel (a) zu einer Außenseite (144; 146) des Werkstücks (104) in das Material (102) eingebracht wird und wobei durch Beaufschlagung des Materials (102) mittels der mindestens einen Fokuszone (122) Materialmodifikationen (156) in dem Material (102) erzeugt werden, welche mit einer Änderung eines Brechungsindex des Materials (102) assoziiert sind.

Es folgen 11 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Fig.1

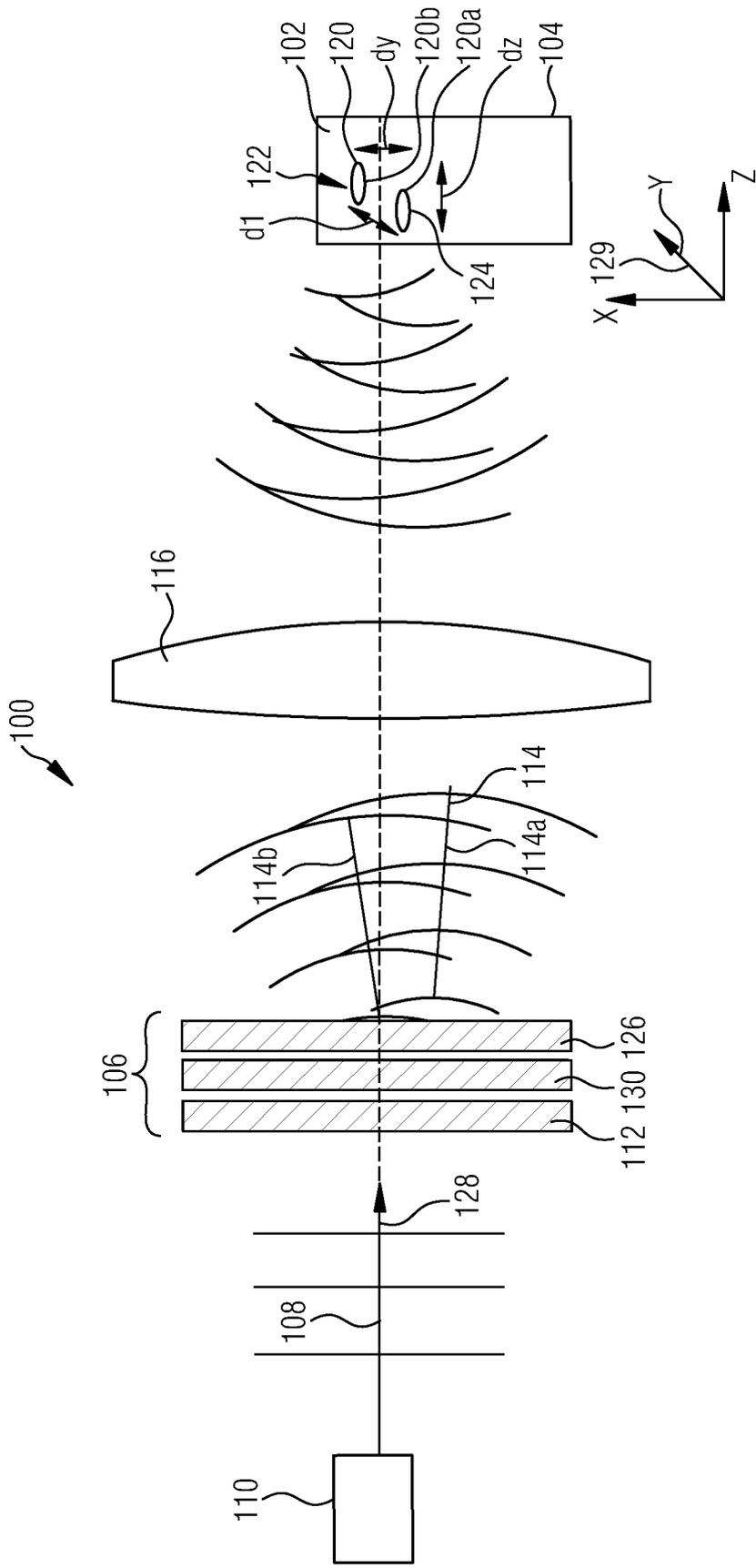


Fig.2

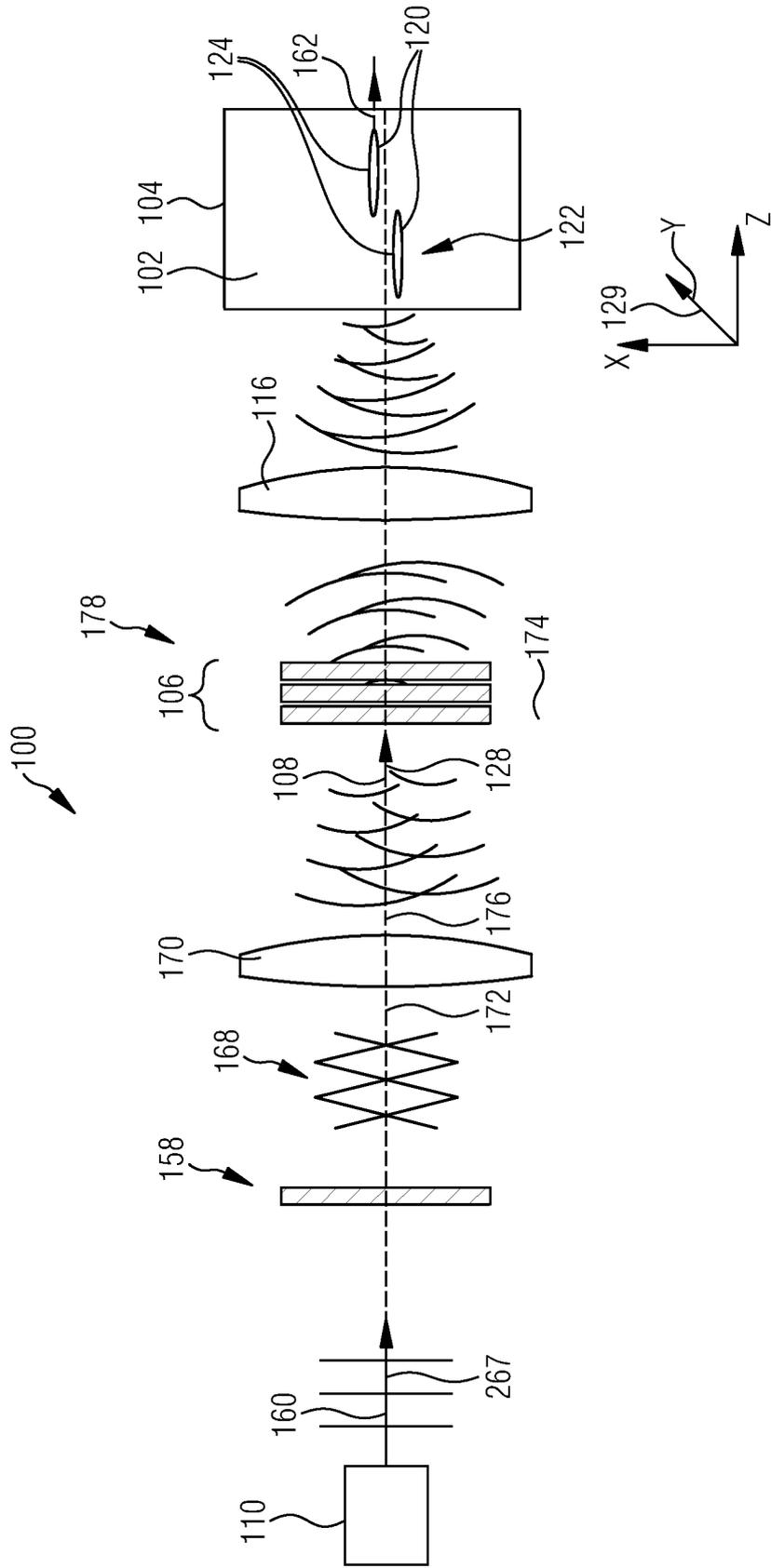


Fig.3 a)

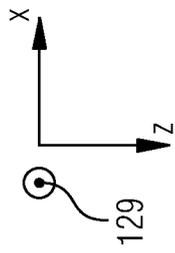
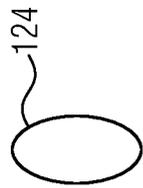
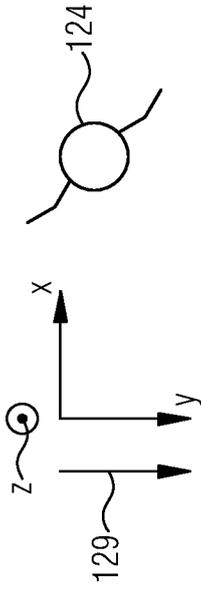


Fig.3 b)

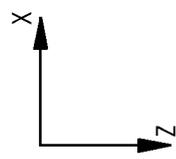
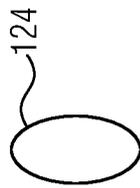
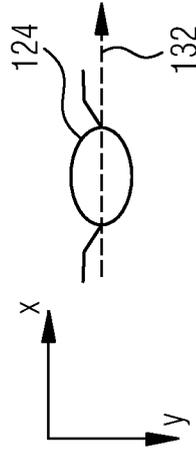


Fig.3 c)

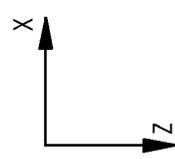
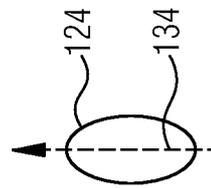
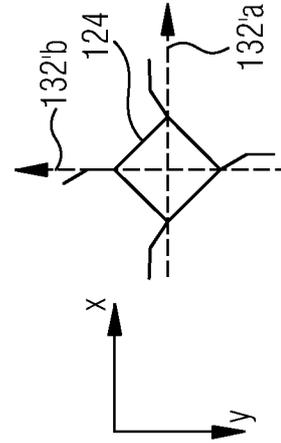


Fig.4 a)

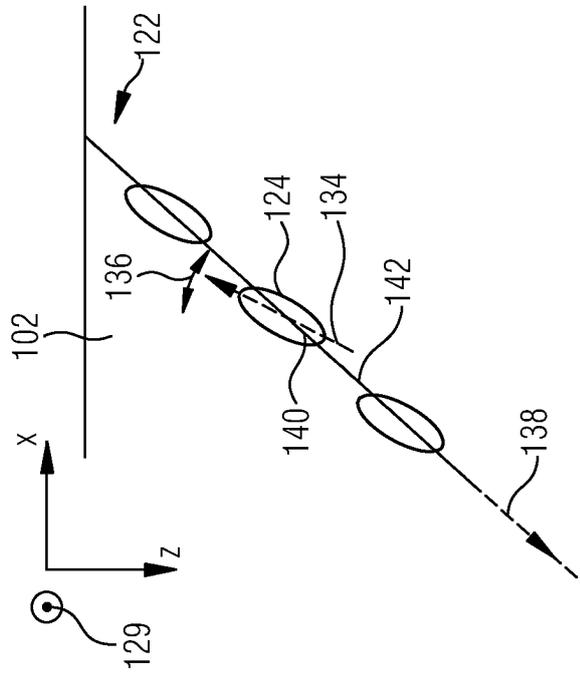


Fig.4 b)

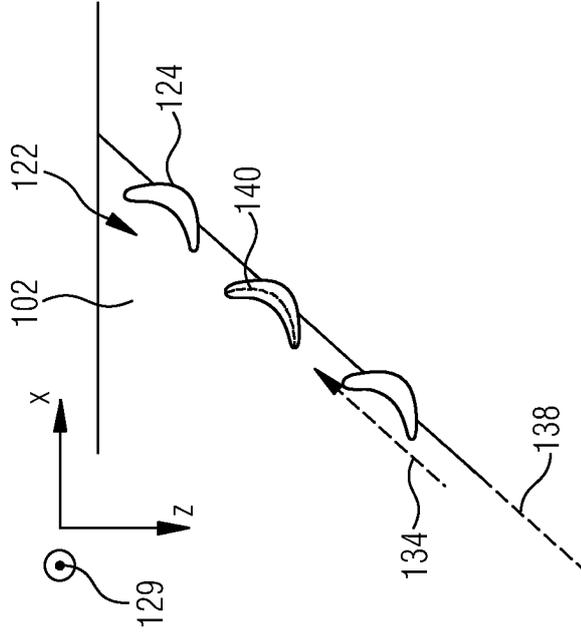


Fig.6

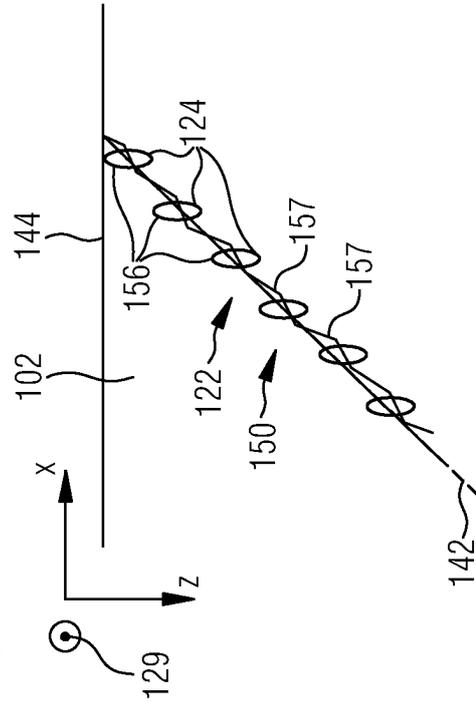
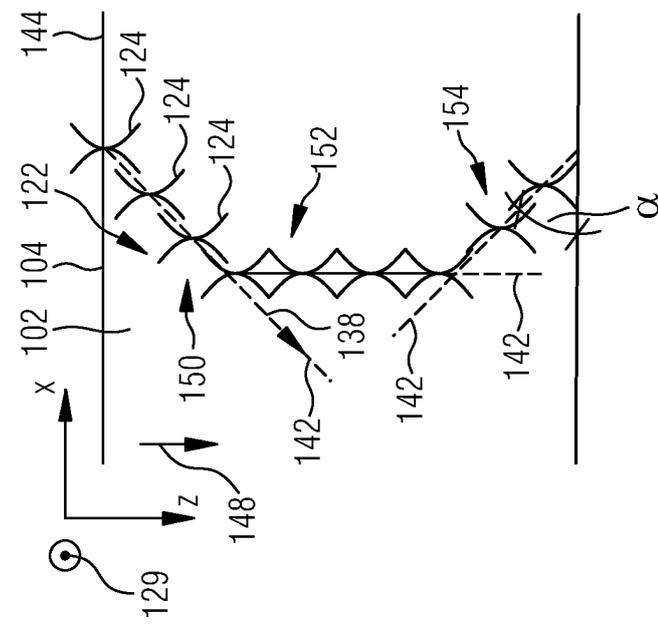


Fig.5



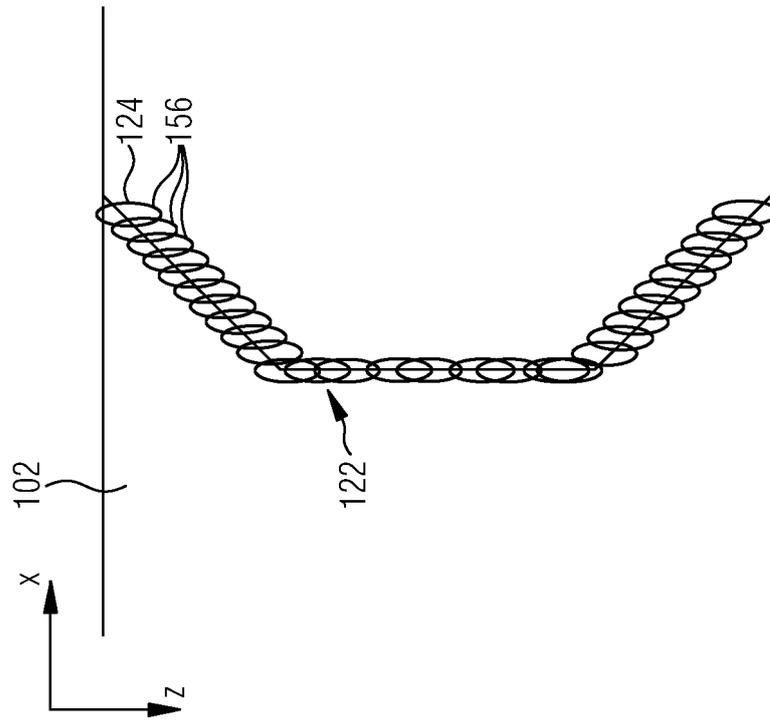


Fig. 7

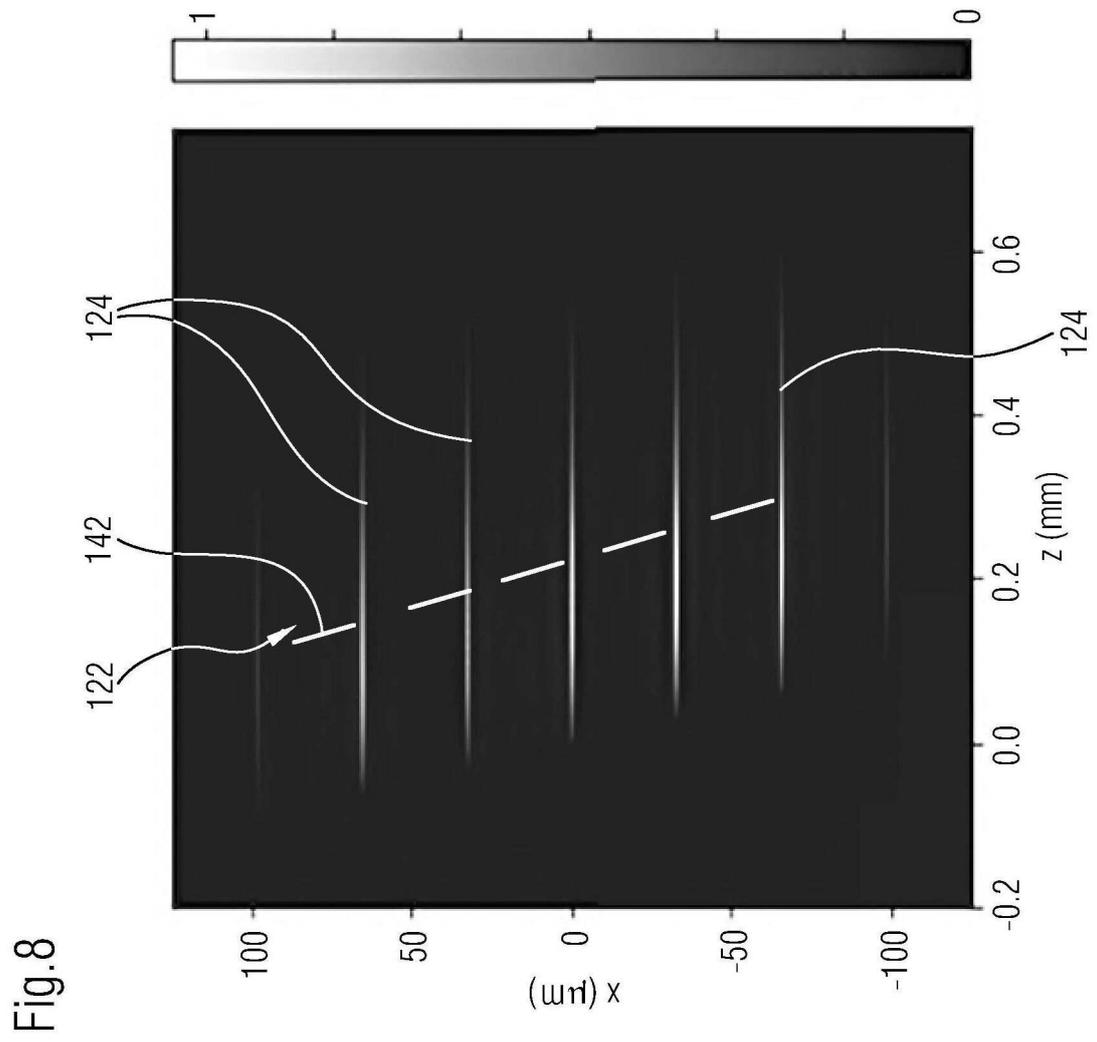


Fig.9 a)

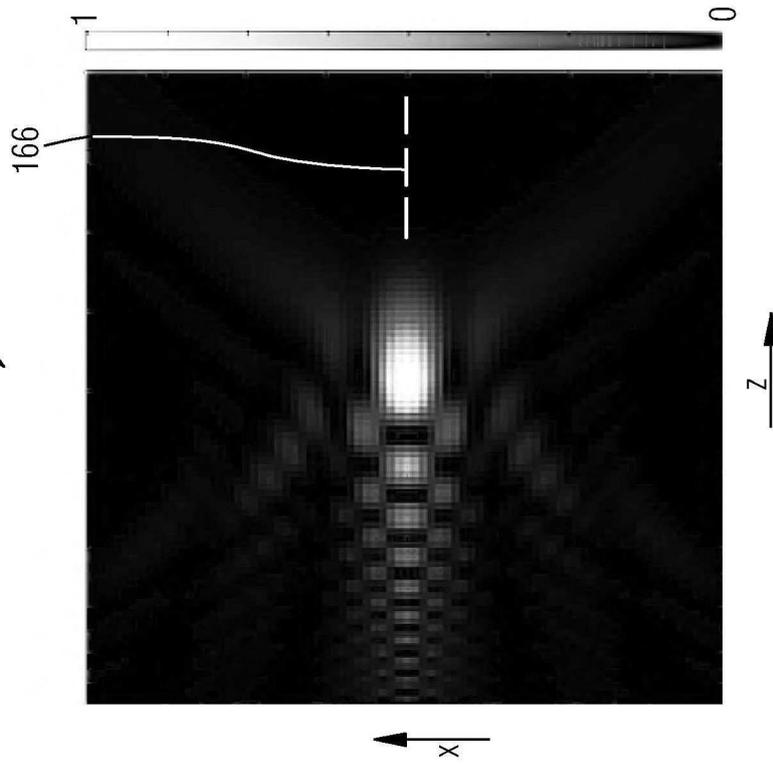


Fig.9 b)

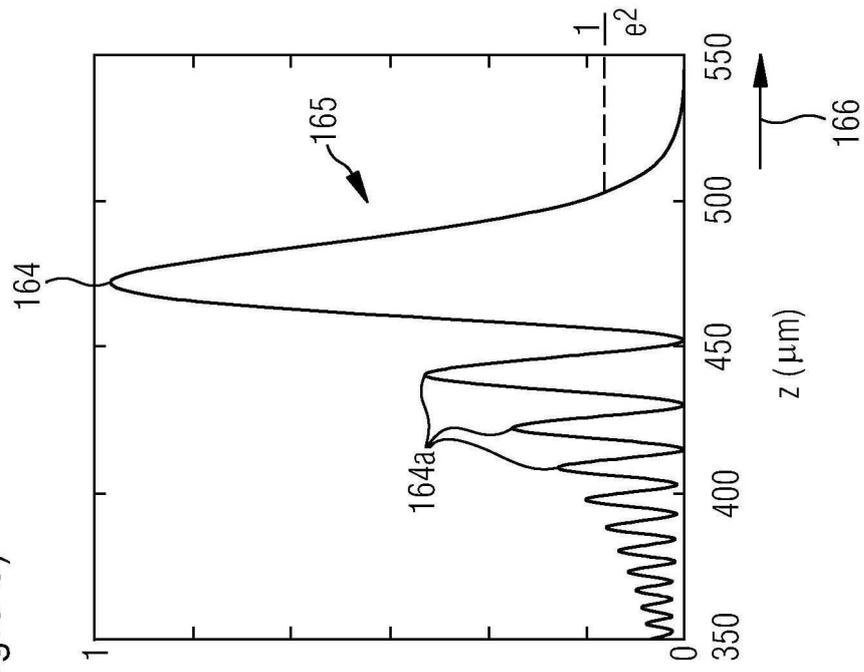


Fig.11

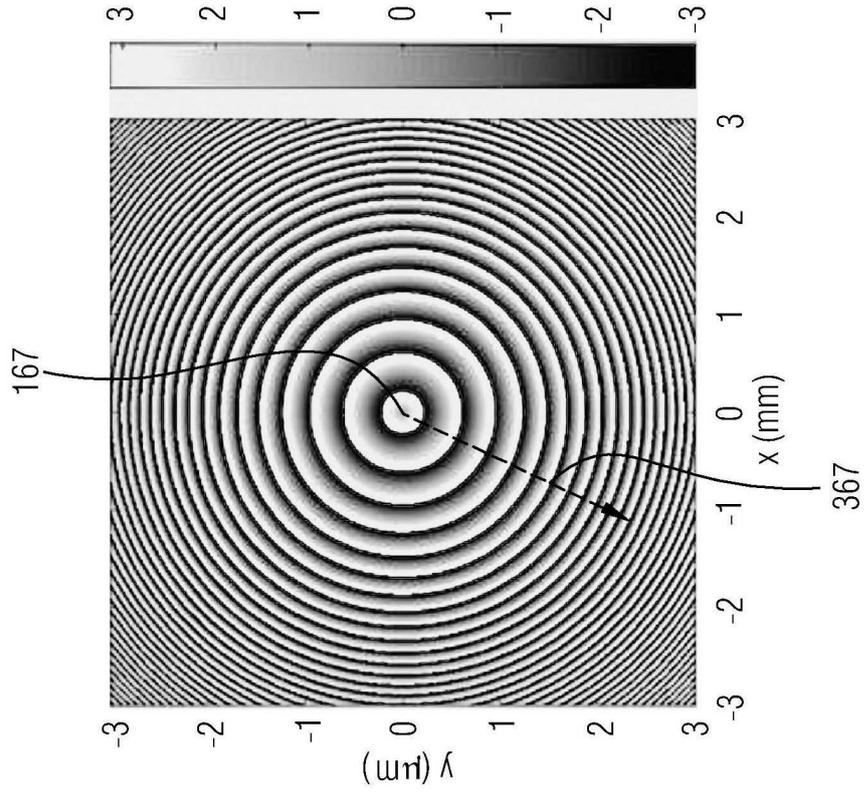
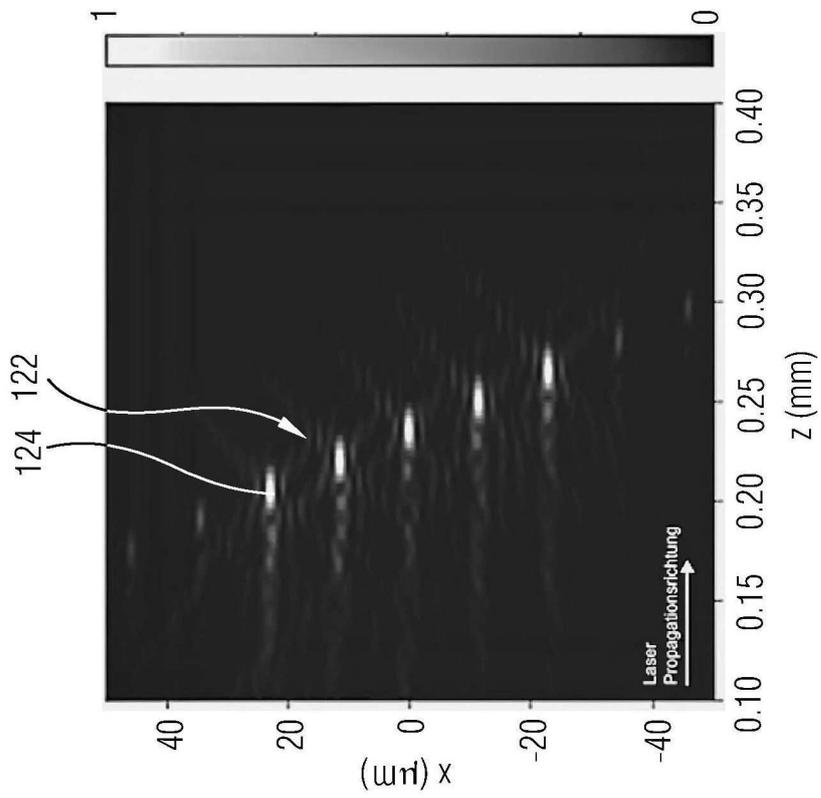


Fig.10



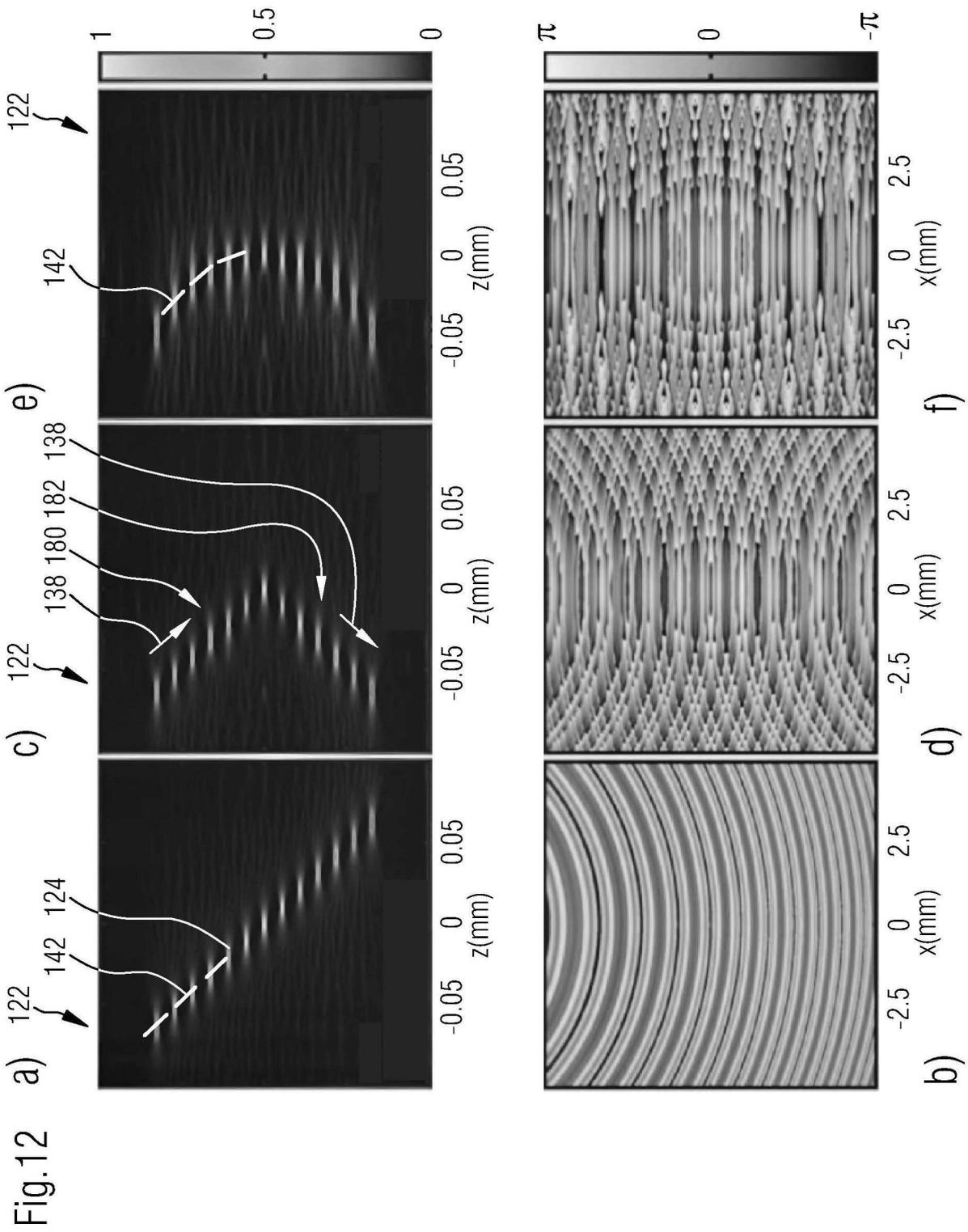


Fig.13 a)

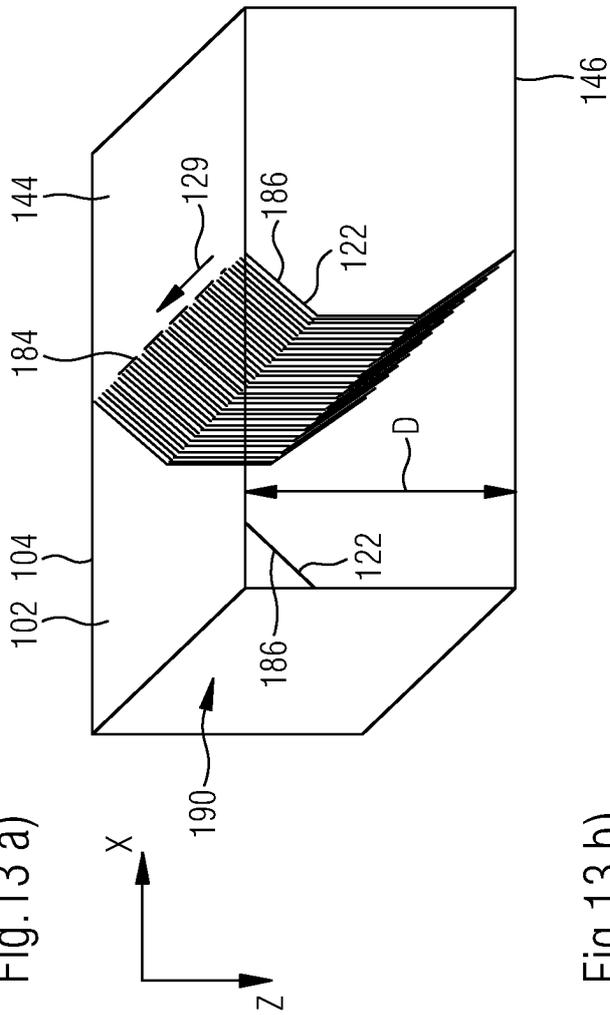


Fig.13 b)

