(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
27. Juli 2023 (27.07.2023)

WIPO | PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2023/139151 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:
B23K 26/06 (2014.01) *B21B 27/00* (2006.01)
B23K 26/067 (2006.01) *B23K 26/0622* (2014.01)
B23K 26/073 (2006.01) *B41C 1/05* (2006.01)
B23K 26/08 (2014.01) *B23K 101/06* (2006.01)
B23K 26/352 (2014.01) *B23K 101/08* (2006.01)
B23K 26/364 (2014.01) *B23K 103/04* (2006.01)
B21B 1/22 (2006.01) *B23K 103/10* (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2023/051198

(22) Internationales Anmeldedatum:
19. Januar 2023 (19.01.2023)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2022 101 349.9
21. Januar 2022 (21.01.2022) DE

(71) Anmelder: **TRUMPF LASER- UND SYSTEMTECHNIK GMBH** [DE/DE]; Johann-Maus-Strasse 2, 71254 Ditzingen (DE).

(72) Erfinder: **SAILER, Marc**; Schalmenäcker 31, 78052 Villingen (DE). **GROSSMANN, Daniel**; Schramberger Str. 36, 78713 Schramberg (DE). **FLAMM, Daniel**; Rosenstr. 7, 71640 Ludwigsburg (DE). **KLEINER, Jonas**; Talstrasse 35, 71229 Leonberg (DE).

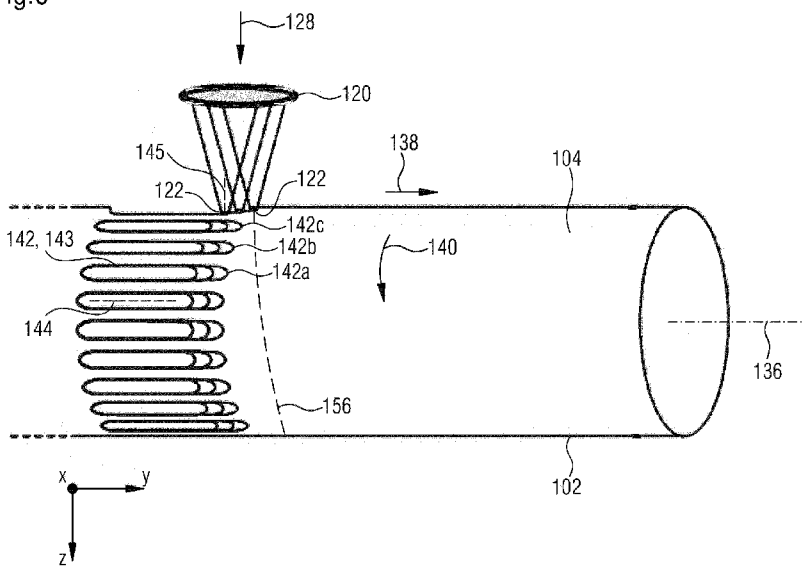
(74) Anwalt: **TRUMPF PATENTABTEILUNG**; Trumpf SE + Co. KG Johann-Maus-Strasse 2, 71254 Ditzingen (DE).

(81) Bestimmungsstaaten *(soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart)*: AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW,

(54) Title: METHOD FOR THE LASER PROCESSING OF A WORKPIECE

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUR LASERBEARBEITUNG EINES WERKSTÜCKS

Fig.6



(57) Abstract: The invention relates to a method for the laser processing of a workpiece (102), which has a curved surface (104), in which method at least one focus element (122) is provided by means of an input laser beam (110), the surface (104) of the workpiece (102) is acted on by the at least one focus element (122) and the at least one focus element (122) is moved relative to the surface (104), wherein the at least one focus element (122) has an elongated shape parallel to a longitudinal central axis (145) of the at least one focus element (122), the longitudinal central axis (145) of the at least one focus element (122) is orientated transverse, and in particular perpendicular, to the surface (104) of the workpiece (102), and wherein a material (106) of the workpiece (102) is removed and/or modified on the surface (104) by means of the at least one focus element (122).

WO 2023/139151 A1

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten *(soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart)*: ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— *mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)*

— *in Schwarz-Weiss; die internationale Anmeldung enthielt in ihrer eingereichten Fassung Farbe oder Graustufen und kann von PATENTSCOPE heruntergeladen werden.*

(57) Zusammenfassung: Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Laserbearbeitung eines Werkstücks (102), welches eine gekrümmte Oberfläche (104) aufweist, bei dem mittels eines Eingangslaserstrahls (110) mindestens ein Fokuselement (122) bereitgestellt wird, die Oberfläche (104) des Werkstücks (102) mit dem mindestens einen Fokuselement (122) beaufschlagt wird und das mindestens eine Fokuselement (122) relativ zu der Oberfläche (104) bewegt wird, wobei das mindestens eine Fokuselement (122) parallel zu einer Längsmittelachse (145) des mindestens einen Fokuselements (122) eine längliche Form aufweist, die Längsmittelachse (145) des mindestens einen Fokuselements (122) quer und insbesondere senkrecht zu der Oberfläche (104) des Werkstücks (102) orientiert ist und wobei mittels des mindestens einen Fokuselements (122) ein Material (106) des Werkstücks (102) an der Oberfläche (104) abgetragen und/oder modifiziert wird.

Verfahren zur Laserbearbeitung eines Werkstücks

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Laserbearbeitung eines Werkstücks, welches eine gekrümmte Oberfläche aufweist.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein eingangs genanntes Verfahren bereitzustellen, welches eine Laserbearbeitung des Werkstücks mit erhöhter Effizienz und erhöhter Zuverlässigkeit ermöglicht.

Diese Aufgabe wird bei dem eingangs genannten Verfahren erfindungsgemäß dadurch gelöst, dass mittels eines Eingangslaserstrahls mindestens ein Fokuselement bereitgestellt wird, die Oberfläche des Werkstücks mit dem mindestens einen Fokuselement beaufschlagt wird und das mindestens eine Fokuselement relativ zu der Oberfläche bewegt wird, wobei das mindestens eine Fokuselement parallel zu einer Längsmittelachse des mindestens einen Fokuselements eine längliche Form aufweist, die Längsmittelachse des mindestens einen Fokuselements quer und insbesondere senkrecht zu der Oberfläche des Werkstücks orientiert ist und wobei mittels des mindestens einen Fokuselements ein Material des Werkstücks an der Oberfläche abgetragen und/oder modifiziert wird.

Zur ordnungsgemäßen Durchführung der Laserbearbeitung an dem Werkstück ist es wesentlich, dass das mindestens eine Fokuselement an der oder im Bereich der zu bearbeitenden Oberfläche des Werkstücks positioniert ist, während die Oberfläche relativ zu dem mindestens einen Fokuselement bewegt wird, d.h. die Fokusposition der fokussierten Laserstrahlen, welche das Fokuselement ausbilden, sollte durchgehend an oder im Bereich der Oberfläche liegen.

Grundsätzlich können sich während der Durchführung des Bearbeitungsprozesses Abweichungen zwischen der Position des Fokuselements und der Oberfläche

ergeben, wodurch das Fokuselement für die jeweilige Anwendung beispielsweise zu weit oberhalb oder unterhalb der Oberfläche positioniert ist. Beispielsweise können solche Abweichungen aus Unebenheiten des Materials des Werkstücks an der Oberfläche, Ungenauigkeiten bei der Fokussierung von Laserstrahlen zur Ausbildung der Fokuselemente oder aus sich bei der Realisierung der Relativbewegung zwischen der Oberfläche und dem Fokuselement ergebenden Ungenauigkeiten resultieren.

Aufgrund der länglichen Form des Fokuselements erstreckt sich der fokussierte Strahlungsbereich, mittels welchem eine ordnungsgemäße Laserbearbeitung des Materials des Werkstücks an der Oberfläche möglich ist, mit einer bestimmten räumlichen Ausdehnung quer und insbesondere senkrecht zur Oberfläche des Werkstücks. Es ergibt sich dadurch eine erhöhte Fokuslagentoleranz, was einen Ausgleich der vorstehend genannten Ungenauigkeiten bei der Durchführung des Verfahrens in einem gewissen Rahmen ermöglich. Dies führt zu einer erhöhten Stabilität und einer verringerten Störanfälligkeit des Verfahrens bei der Durchführung.

Aufgrund der verringerten Anforderungen an die Genauigkeit der Positionierung des mindestens einen Fokuselements können zudem erhöhte Geschwindigkeiten der Relativbewegung zwischen dem Fokuselement und der Oberfläche realisiert werden, wodurch sich das Verfahren mit einer erhöhten Effizienz durchführen lässt.

Darunter, dass das mindestens eine Fokuselement länglich ausgebildet ist, ist insbesondere zu verstehen, dass das mindestens eine Fokuselement eine Längsrichtung und/oder eine Längsmittelachse aufweist, entlang welcher es eine größte räumliche Ausdehnung hat.

Darunter, dass die Oberfläche des Werkstücks mit dem mindestens einen Fokuselement beaufschlagt wird, ist insbesondere zu verstehen, dass zumindest ein räumlicher Abschnitt des mindestens einen Fokuselement mit dem Material des Werkstücks an der Oberfläche derart in Wechselwirkung gebracht wird, dass das Material dort modifiziert und insbesondere abgetragen wird.

Insbesondere wird im Fall mehrerer Fokuselemente die Oberfläche zeitlich parallel und/oder gleichzeitig mit den zur Laserbearbeitung des Werkstücks ausgebildeten Fokuselementen beaufschlagt.

Eine Wechselwirkung zwischen dem mindestens einen Fokuselement und dem Material des Werkstücks kann grundsätzlich eine lineare und/oder nichtlineare Absorption der dem mindestens einen Fokuselement zugeordneten Laserstrahlung durch das Material umfassen.

Insbesondere ist unter dem Fokuselement ein fokussierter Strahlungsbereich des Eingangslaserstrahls zu verstehen, welcher insbesondere eine bestimmte räumliche Ausdehnung aufweist, und/oder welcher insbesondere räumlich zusammenhängend ausgebildet ist. Zur Bestimmung von räumlichen Dimensionen eines bestimmten Fokuselements, wie z.B. eines Durchmessers, einer Länge oder einer räumlichen Ausdehnung des Fokuselements in einer bestimmten Richtung, werden nur Intensitätswerte betrachtet, welche 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 des Fokuselements.

Insbesondere ist einem bestimmten Fokuselement jeweils ein räumlicher Wechselwirkungsbereich zugeordnet, in welchem das Fokuselement bzw. die dem Fokuselement zugeordnete Laserstrahlung mit dem Material des Werkstücks wechselwirkt, wenn es an diesem angeordnet wird. Insbesondere wechselwirkt das Fokuselement in diesem Wechselwirkungsbereich mit dem Material durch lineare und/oder nichtlineare Absorption.

Günstig kann es sein, wenn das mindestens eine Fokuselement eine Bessel-artige Form und/oder ein Bessel-artiges Intensitätsprofil aufweist. Es lässt sich dadurch das mindestens eine Fokuselement auf technisch einfache weise mit länglicher Form ausbilden.

Bei einer Ausführungsform kann das mindestens eine Fokuselement eine Form und/oder ein Intensitätsprofil eines abrupt-selbstfokussierenden Strahls (abruptly autofocusing beam) aufweisen. Insbesondere weist das mindestens eine Fokuselement entlang einer Haupterstreckungsrichtung ein Intensitätsprofil auf, 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.

Durch den schnellen Intensitätsabfall dieser abrupt-selbstfokussierenden Fokusverteilungen ergibt sich eine präzisere Materialbearbeitung bei verringerter Beschädigung des zu bearbeitenden Materials. Das Material lässt sich dadurch insbesondere mit einer besonderes ebenen und/oder glatten Kante bearbeiten.

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.

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

Vorzugsweise ist die Intensitätsabfallflanke bei der Laserbearbeitung des Werkstücks dem Material der Oberfläche zugewandt oder in dem Material positioniert.

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 Haupterstreckungsrichtung anschließen.

Insbesondere nimmt eine jeweilige Maximalintensität der Nebenmaxima mit zunehmendem Abstand zu dem Hauptmaximum ab.

Beispielsweise weist das mindestens eine Fokuselement parallel zu seiner Längsmittelachse eine räumliche Ausdehnung von mindestens 5 µm und/oder höchstens 1000 µm und bevorzugt von mindestens 10 µm und/oder höchstens 500 µm auf.

In einem zur Längsmittelachse senkrecht orientierten Querschnitt weist das mindestens eine Fokuselement eine maximale räumliche Ausdehnung von mindestens 0,5 µm und/oder höchstens 10 µm, bevorzugt von mindestens 1 µm und/oder höchstens 5 µm und besonders bevorzugt von ca. 2,2 µm auf.

Günstig kann es sein, wenn mehrere Fokuselemente bereitgestellt werden, welche parallel zu einer Längsrichtung des Werkstücks und/oder der Oberfläche beabstandet sind, wobei die Oberfläche parallel zur Längsrichtung eben ausgebildet ist und wobei insbesondere die Oberfläche des Werkstück gleichzeitig mit den Fokuselementen beaufschlagt wird. Es lassen sich dadurch insbesondere mehrere Abschnitte einer an der Oberfläche des Werkstücks auszubildenden länglichen Modifikation gleichzeitig ausbilden. Hieraus ergibt sich eine erhöhte Geschwindigkeit und Effizienz des Verfahrens.

Darunter, dass die Oberfläche des Werkstücks parallel zur Längsrichtung eben ausgebildet ist, ist insbesondere zu verstehen, dass die Oberfläche in Längsrichtung eine Krümmung von zumindest näherungsweise Null aufweist, und/oder dass ein Krümmungsradius der Oberfläche in Längsrichtung größer als 1 m und insbesondere größer als 10 m und insbesondere größer als 100 m und insbesondere "unendlich" groß ist, und/oder dass die Oberfläche in Längsrichtung ungekrümmt ist. Insbesondere steht die Angabe "ebene Oberfläche" nicht in Zusammenhang mit einer Beschaffenheit und insbesondere mikroskopischen Beschaffenheit der Oberfläche, wie beispielsweise einer Rauheit der Oberfläche.

Beispielsweise werden die Fokuselemente zueinander benachbart und/oder aneinander angrenzend angeordnet. Es kann vorgesehen sein, dass sich die Fokuselemente zumindest teilweise überlappen.

Darunter, dass die Fokuselemente parallel zur Längsrichtung bzw. Umfangsrichtung des Werkstücks beabstandet sind, ist insbesondere zu verstehen, dass eine Abstandsrichtung zwischen den Fokuselementen zumindest eine von Null verschiedene Komponente aufweist, welche parallel zur Längsrichtung bzw. Umfangsrichtung orientiert ist.

Beispielsweise liegen die Fokuselemente in einer Ebene, welche insbesondere parallel zur Längsrichtung orientiert ist oder in welcher eine zur Längsrichtung parallele Längsmittelachse des Werkstücks liegt, und/oder welche parallel zu einer Haupt-Propagationsrichtung von Laserstrahlen bzw. Teilstrahlen, aus welchen die Fokuselemente gebildet sind, orientiert ist.

Vorteilhaft kann es sein, wenn zur Bereitstellung der Fokuselemente der Eingangslaserstrahl mittels eines Strahlteilungselements in eine Mehrzahl von Teilstrahlen aufgeteilt wird und aus dem Strahlteilungselement ausgekoppelte Teilstrahlen fokussiert werden, um die Fokuselemente auszubilden. Es lassen sich dadurch die Fokuselemente als Kopien zueinander ausbilden. Insbesondere lassen sich dadurch die Fokuselemente auf technisch einfache Weise an unterschiedlichen Positionen und/oder mit unterschiedlichen Abständen an oder im Bereich der Oberfläche des Werkstücks positionieren.

Insbesondere kann es vorgesehen sein, dass durch Relativbewegung zwischen dem mindestens einen Fokuselement und der Oberfläche an der Oberfläche mehrere längliche Modifikationen und insbesondere mehrere Rillen ausgebildet werden, welche in einer Umfangsrichtung des Werkstücks und/oder der Oberfläche zueinander beabstandet sind, wobei die Oberfläche des Werkstücks entlang der Umfangsrichtung gekrümmt ist.

Ein maximaler Querschnittsdurchmesser einer bestimmten länglichen Modifikation in einem zur Oberfläche senkrechten Querschnitt beträgt beispielsweise mindestens 1 µm und/oder höchstens 10 µm.

Ein Abstand zwischen an der Oberfläche in Umfangsrichtung benachbarten Rillen beträgt beispielsweise mindestens 1 µm und/oder höchstens 100 mm und bevorzugt mindestens 5 µm und/oder höchstens 100 µm.

Darunter, dass die Oberfläche in Umfangsrichtung gekrümmt ist, ist insbesondere zu verstehen, dass die Oberfläche in Umfangsrichtung eine von Null verschiedene Krümmung aufweist, und/oder dass die Oberfläche in Umfangsrichtung einen endlichen Krümmungsradius aufweist, und/oder dass die Oberfläche entlang der Umfangsrichtung nicht eben ist.

Insbesondere weist die Oberfläche in Umfangsrichtung eine maximale Krümmung auf.

Die länglichen Materialmodifikationen erstrecken sich insbesondere entlang einer Längsmittelachse, welche quer und insbesondere senkrecht zur Umfangsrichtung orientiert ist, und/oder welche parallel oder quer zu einer Längsrichtung des Werkstücks orientiert ist.

Vorteilhaft kann es sein, wenn eine Relativbewegung zwischen dem mindestens einen Fokuselement und der Oberfläche des Werkstücks eine Bewegung parallel zu einer Längsrichtung des Werkstücks und/oder der Oberfläche umfasst, wobei die Oberfläche parallel zur Längsrichtung eben ausgebildet ist. Dies ermöglicht beispielsweise eine linienartige Abtragung von Material an der Oberfläche. Es lassen sich dadurch an der Oberfläche längliche Modifikationen und insbesondere Rillen ausbilden, welche sich parallel zur Längsrichtung erstrecken.

Zumindest ist die Oberfläche parallel zur Längsrichtung in einem Bereich eben, in welchem eine Beaufschlagung des Werkstücks mit dem mindestens einen Fokuselement zur Durchführung einer Laserbearbeitung erfolgt.

Günstig kann es sein, wenn eine Relativbewegung zwischen dem mindestens einen Fokuselement und der Oberfläche des Werkstücks eine Bewegung in einer Umfangsrichtung des Werkstücks und/oder der Oberfläche umfasst, wobei die Oberfläche des Werkstücks entlang der Umfangsrichtung gekrümmt ist. Dadurch lassen sich an der Oberfläche längliche Modifikationen und insbesondere Rillen

ausbilden, welche sich parallel oder quer zur Längsrichtung des Werkstücks erstrecken. Beispielsweise können dadurch auf effiziente Weise mehrere längliche Modifikationen ausgebildet werden, welche in Umfangsrichtung zueinander beabstandet sind.

Beispielsweise wird die Relativbewegung in Umfangsrichtung durch Rotation des Werkstücks und/oder der Oberfläche um eine zur Längsrichtung parallele Längsmittelachse des Werkstücks realisiert.

Insbesondere umfasst die Relativbewegung eine Überlagerung einer Bewegung in Längsrichtung und in Umfangsrichtung der Oberfläche relativ zu dem mindestens einen Fokuselement. Beispielsweise ist eine Trajektorie des mindestens einen Fokuselements auf der Oberfläche spiralförmig ausgebildet.

Vorteilhaft kann es sein, wenn der Eingangslaserstrahl ein gepulster Laserstrahl ist und wenn eine Relativbewegung zwischen dem mindestens einen Fokuselemente und der Oberfläche derart angepasst ist, dass Laserpulse, aus welchen das mindestens eine Fokuselement zu unterschiedlichen Zeitpunkten gebildet ist, jeweils in einer Umfangsrichtung des Werkstücks und/oder der Oberfläche beabstandet auf die Oberfläche treffen, um an der Oberfläche in Umfangsrichtung beabstandete längliche Modifikationen und insbesondere Rillen auszubilden, wobei die Oberfläche des Werkstücks entlang der Umfangsrichtung gekrümmt ist.

Insbesondere treffen die zu unterschiedlichen Zeiten vorliegenden Laserpulse eines bestimmten Fokuselements aufgrund der Relativbewegung an unterschiedlichen Positionen auf der Oberfläche auf.

Insbesondere liegen in Pausenzeiten zwischen zeitlich benachbarten Laserpulsen keine Fokuselemente vor bzw. es liegt an einer Position des Fokuselements kein fokussierter Strahlungsbereich vor, sodass keine Laserbearbeitung des Materials erfolgen kann.

Insbesondere sind die zu unterschiedlichen Zeiten vorliegenden Laserpulse gleichartig ausgebildet und/oder weisen gleichartige Eigenschaften auf, wie z.B. Pulsdauer, Wellenlänge, etc.

Insbesondere werden mittels den Laserpulsen, aus welchen das mindestens eine Fokuselement zu unterschiedlichen Zeitpunkten gebildet ist und/oder welche zu unterschiedlichen Zeitpunkten auf die Oberfläche treffen, jeweils zumindest Abschnitte von verschiedenen länglichen Modifikationen, welche in Umfangsrichtung beabstandet sind, ausgebildet.

Aus dem gleichen Grund kann es günstig sein, wenn die Relativbewegung zwischen dem mindestens einen Fokuselement und der Oberfläche derart synchronisiert ist, dass mittels zeitlich aufeinanderfolgender Laserpulse an der Oberfläche jeweils zumindest Abschnitte von länglichen Modifikationen und insbesondere Rillen ausgebildet werden, welche in Umfangsrichtung des Werkstücks und/oder der Oberfläche zueinander beabstandet sind.

Insbesondere sind die länglichen Modifikationen in Umfangsrichtung zueinander benachbart.

Insbesondere sind zeitlich aufeinanderfolgende Laserpulse jeweils auszubildenden länglichen Modifikationen, welche in Umfangsrichtung beabstandet und/oder benachbart sind, zugeordnet.

Vorteilhaft kann es sein, wenn eine geometrische Form und/oder ein Intensitätsprofil des mindestens einen Fokuselements in einem Querschnitt einstellbar ist oder eingestellt wird, um eine Geometrie einer mittels des mindestens einen Fokuselements ausgebildeten Modifikation und insbesondere länglichen Modifikation und/oder eines mittels des mindestens einen Fokuselements bewirkten Abtrags des Materials des Werkstücks an der Oberfläche zu definieren. Der Querschnitt ist hierbei an einer Position der Oberfläche, an welcher diese mittels des jeweiligen Fokuselements beaufschlagt wird, tangential zur Oberfläche des Werkstücks orientiert, d.h. eine Ebene des Querschnitts liegt an dieser Position tangential zur Oberfläche. Alternativ oder zusätzlich kann der Querschnitt senkrecht zu einer jeweiligen Längsmittelachse

des mindestens einen Fokuselements orientiert sein. Es lässt sich dadurch auf technisch einfache Weise die Querschnittsgeometrie der zugeordneten Modifikation an der Oberfläche definieren. Beispielsweise lässt sich dadurch die Querschnittsgeometrie einer mittels des mindestens einen Fokuselements auszubildenden länglichen Modifikation und insbesondere Rille definieren.

Insbesondere kann es vorgesehen sein, dass die geometrische Form des mindestens einen Fokuselements in dem Querschnitt eine Vorzugsrichtung aufweist, entlang welcher das mindestens eine Fokuselement in dem Querschnitt eine größte räumliche Ausdehnung aufweist, und/oder dass die geometrische Form des mindestens einen Fokuselements in dem Querschnitt asymmetrisch und insbesondere elliptisch ist.

Es ist grundsätzlich auch möglich, dass das mindestens eine Fokuselement in dem zu seiner Längsmittelachse senkrecht orientierten Querschnitt ein Top-Hat-Profil aufweist und/oder rechteckig ausgebildet ist und/oder quadratisch ausgebildet ist.

Im Fall eines Fokuselements mit gaußförmiger Form und/oder gaußförmigem Intensitätsprofil ist unter der Längsmittelachse insbesondere eine zu einer Haupt-Propagationsrichtung von Laserstrahlen und/oder Teilstrahlen, aus welchen das jeweilige Fokuselement gebildet ist, parallele Achse des Fokuselements zu verstehen.

Insbesondere kann es vorgesehen sein, dass das Material des Werkstücks mittels des mindestens einen Fokuselements an der Außenseite abgetragen wird und/oder strukturiert wird.

Insbesondere kann es vorgesehen sein, dass an der Oberfläche des Werkstücks mindestens eine längliche Modifikation und insbesondere mindestens eine Rille ausgebildet wird, wobei insbesondere eine Längsmittelachse der mindestens einen länglichen Modifikation zumindest komponentenweise parallel zu einer Längsrichtung des Werkstücks und/oder der Oberfläche orientiert ist, wobei die Oberfläche entlang der Längsrichtung eben ist.

Darunter, dass die Längsmittelachse der mindestens einen länglichen Modifikation zumindest komponentenweise parallel zu einer Längsrichtung des Werkstücks und/oder der Oberfläche orientiert ist, ist insbesondere zu verstehen, dass eine Richtung der Längsmittelachse zumindest eine von Null verschiedene Komponente aufweist, welche parallel zur Längsmittelachse orientiert ist.

Eine Längsmittelachse der länglichen Materialmodifikation ist insbesondere parallel oder quer zur Längsrichtung und/oder zur Längsmittelachse des Werkstücks orientiert.

Beispielsweise sind das Werkstück und/oder die Oberfläche des Werkstücks zylinderförmig ausgebildet sind.

Beispielsweise ist die Oberfläche des Werkstücks konvex gekrümmt ist.

Insbesondere ist dem Werkstück und/oder der Oberfläche des Werkstücks eine Längsrichtung zugeordnet, wobei die Oberfläche entlang der Längsrichtung eben ist.

Insbesondere ist dem Werkstück und/oder der Oberfläche des Werkstücks eine Umfangsrichtung zugeordnet, wobei die Oberfläche entlang der Umfangsrichtung gekrümmt ist.

Insbesondere ist die Längsrichtung des Werkstücks und/oder der Oberfläche senkrecht zur Umfangsrichtung des Werkstücks bzw. der Oberfläche orientiert.

Insbesondere weist das Werkstück eine zur Längsrichtung parallele Längsmittelachse auf, wobei eine Drehung des Werkstücks um die Längsmittelachse eine Relativbewegung zwischen dem mindestens einen Fokuselement und der Oberfläche in Umfangsrichtung der Oberfläche bewirkt.

Insbesondere kann es vorgesehen sein, dass eine dem mindestens einen Fokuselement zugeordnete Haupt-Propagationsrichtung von Laserstrahlen und/oder Teilstrahlen, aus welchen das mindestens eine Fokuselement gebildet

ist, quer und insbesondere senkrecht zu der Oberfläche des Werkstücks orientiert ist.

Insbesondere kann es vorgesehen sein, dass eine dem mindestens einen Fokuselement zugeordnete Haupt-Propagationsrichtung von Laserstrahlen und/oder Teilstrahlen, aus welchen das mindestens eine Fokuselement gebildet ist, zumindest näherungsweise parallel zur Längsmittelachse des mindestens einen Fokuselements orientiert ist.

Insbesondere kann es vorgesehen sein, dass das Werkstück an der Oberfläche ein für den Eingangslaserstrahl und/oder für einen Laserstrahl, aus welchem das mindestens eine Fokuselement ausgebildet ist, teiltransparentes oder opakes Material aufweist.

Insbesondere weist das Werkstück an der Oberfläche ein Material auf, durch welches höchstens 30 % und insbesondere höchstens 20 % und insbesondere höchstens 10 % einer Laserenergie des Eingangslaserstrahls und/oder des Laserstrahls, aus welchem das mindestens eine Fokuselement gebildet ist, transmittiert wird.

Das Material des Werkstücks an der Oberfläche ist oder umfasst beispielsweise ein metallisches Material, wie z.B. Aluminium oder Edelstahl.

Insbesondere kann es vorgesehen sein, dass der Eingangslaserstrahl und/oder ein Laserstrahl, aus welchem das mindestens eine Fokuselement ausgebildet ist, ein gepulster Laserstrahl und insbesondere ein Ultrakurzpulslaserstrahl ist.

Ein jeweiliges Fokuselement wird dann mittels Laserpulsen des gepulsten Laserstrahls realisiert, welche zu einem bestimmten Zeitpunkt vorliegen und welche Teilstrahlen zugeordnet sind, durch deren Fokussierung das jeweilige Fokuselement ausgebildet wird.

Insbesondere weist der Eingangslaserstrahl und/oder ein Laserstrahl, aus welchem die Fokuselemente ausgebildet sind, ein beugendes Strahlprofil und/oder ein gaußförmiges Strahlprofil auf.

Beispielsweise beträgt eine Wellenlänge des Eingangslaserstrahls und/oder des Laserstrahls, aus welchem die Fokuselemente ausgebildet sind, mindestens 300 nm und/oder höchstens 1500 nm. Beispielsweise beträgt die Wellenlänge 515 nm oder 1030 nm.

Insbesondere weist der Eingangslaserstrahl und/oder der Laserstrahl, aus welchem die Fokuselemente ausgebildet sind, eine mittlere Leistung von mindestens 1W bis 1kW auf. Beispielsweise umfasst der Laserstrahl Pulse mit einer Pulsenergie von mindestens 1 µJ und/oder höchstens 10 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 10 ns bis 100 ns aufweisen.

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.

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. 2a eine schematische Querschnittsdarstellung einer Ausführungsform des Werkstücks;

Fig. 2b eine schematische Querschnittsdarstellung einer weiteren Ausführungsform des Werkstücks;

Fig. 3 eine schematische Querschnittsdarstellung eines Abschnitts einer Oberfläche des Werkstücks mit daran angeordneten Fokuselementen;

Fig. 4 eine schematische Darstellung eines Ausführungsbeispiels einer Strahlformungseinrichtung zur Strahlformung eines Eingangslaserstrahls;

Fig. 5a eine schematische Darstellung einer Variante einer Positionierung von an der Oberfläche des Werkstücks angeordneten Fokuselementen;

Fig. 5b eine schematische Darstellung einer weiteren Variante einer Positionierung von an der Oberfläche des Werkstücks angeordneten Fokuselementen;

Fig. 6 eine perspektivische Ansicht des Werkstücks, welches mittels Fokuselementen bearbeitet wird;

Fig. 7a eine simulierte Intensitätsverteilung eines zur Oberfläche des Werkstücks tangentialen Querschnitts eines Fokuselements mit symmetrischer Intensitätsverteilung und einen Querschnitt einer mittels dieses Fokuselements ausgebildeten Modifikation an der Oberfläche des Werkstücks;

Fig. 7b eine simulierte Intensitätsverteilung eines zur Oberfläche des Werkstücks tangentialen Querschnitts eines Fokuselements mit asymmetrischer Intensitätsverteilung und einen Querschnitt einer mittels dieses Fokuselements ausgebildeten Modifikation am Werkstück;

Fig. 8a eine simulierte Intensitätsverteilung eines zur Oberfläche des Werkstücks senkrechten Querschnitts von gaußförmigen Fokuselementen;

Fig. 8b eine den in Fig. 8a gezeigten Fokuselementen zugeordnete Phasenverteilung von aus einem Strahlteilungselement der Vorrichtung ausgekoppelten Teilstrahlen;

Fig. 9 eine simulierte Intensitätsverteilung eines zur Oberfläche des Werkstücks senkrechten Querschnitts von länglichen und/oder Bessel-artigen Fokuselementen;

Fig. 10a eine simulierte Intensitätsverteilung eines zur Oberfläche des Werkstücks senkrechten Querschnitts von abrupt-selbstfokussierenden Fokuselementen; und

Fig. 10b eine den Fokuselementen gemäß Fig. 10a zugeordnete Intensitätsverteilung.

Gleiche oder funktional äquivalente Elemente sind in allen Figuren mit denselben Bezugszeichen versehen.

Ein Ausführungsbeispiel einer Vorrichtung zur Laserbearbeitung eines Werkstücks ist in Fig. 1 gezeigt und dort mit 100 bezeichnet. Das Werkstück 102 weist eine gekrümmte Oberfläche 104 auf. Mittels der Vorrichtung 100 lässt sich ein Material 106 des Werkstücks 102 an der Oberfläche 104 bearbeiten und insbesondere abtragen.

Das Material 106 ist insbesondere ein für eine Wellenlänge, mit welcher eine Laserbearbeitung erfolgt, teiltransparentes oder opakes Material. Beispielsweise ist oder umfasst das Material 106 ein Metallmaterial, wie z.B. Stahl und/oder Edelstahl und/oder Aluminium.

Beispielsweise ist das Werkstück 102 zylinderförmig und/oder rohrförmig ausgebildet, wobei die Oberfläche 104 in einer Mantelfläche des zylinderförmigen Werkstücks 102 liegt (Fig. 2a). Ein der Oberfläche 104 zugeordneter Radius R des Werkstücks 102 ist nicht notwendigerweise konstant, sondern kann beispielsweise Stufen und/oder Sprünge aufweisen (Fig. 2b).

Die Vorrichtung umfasst ein Strahlteilungselement 108, in welches ein Eingangslaserstrahl 110 eingekoppelt wird. Dieser Eingangslaserstrahl 110 wird beispielsweise mittels einer Laserquelle 112 bereitgestellt. Beispielsweise ist der Eingangslaserstrahl 110 ein gepulster Laserstrahl und/oder ein Ultrakurzpulslaserstrahl.

Unter dem Eingangslaserstrahl 110 ist insbesondere ein Strahlenbündel zu verstehen, welches eine Mehrzahl insbesondere parallel verlaufender Strahlen umfasst. Der Eingangslaserstrahl 110 weist insbesondere einen transversalen Strahlquerschnitt 114 und/oder eine transversale Strahlausdehnung auf, mit welchem bzw. welcher der Eingangslaserstrahl 110 auf das Strahlteilungselement 108 trifft.

Der auf das Strahlteilungselement 108 treffende Eingangslaserstrahl 110 weist insbesondere zumindest näherungsweise ebene Wellenfronten 116 auf.

Mittels des Strahlteilungselements 108 wird der Eingangslaserstrahl 108 in eine Mehrzahl von Teilstrahlen 118 und/oder Teilstrahlenbündeln aufgeteilt. Bei dem in Fig. 1 gezeigten Beispiel sind zwei voneinander verschiedene Teilstrahlen 118a und 118b angedeutet.

Die aus dem Strahlteilungselement 108 ausgekoppelten Teilstrahlen 118 bzw. Teilstrahlenbündel weisen insbesondere ein divergentes Strahlprofil auf. Insbesondere ist das Strahlteilungselement 108 als Fernfeldstrahlformungselement ausgebildet.

Zur Fokussierung der aus dem Strahlteilungselement 108 ausgekoppelten Teilstrahlen 118 umfasst die Vorrichtung 100 eine Fokussieroptik 120, in welche die Teilstrahlen 118 eingekoppelt werden. Die Fokussieroptik 120 weist beispielsweise ein oder mehrere Linsenelemente auf. Beispielsweise ist die Fokussieroptik 120 als Mikroskopobjektiv ausgebildet.

Beispielsweise ist das Strahlteilungselement 108 zumindest näherungsweise in einer rückseitigen Brennebene der Fokussieroptik 120 angeordnet.

Die Fokussieroptik 120 weist beispielsweise eine Brennweite zwischen 5 mm und 50 mm auf.

Insbesondere treffen voneinander verschiedene Teilstrahlen 118 mit einem Ortsversatz und/oder Winkelversatz auf die Fokussieroptik 120 auf.

Die Teilstrahlen 118 werden mittels der Fokussieroptik 120 fokussiert, sodass mehrere Fokuselemente 122 ausgebildet werden, welche jeweils an unterschiedlichen räumlichen Positionen angeordnet sind. Es ist grundsätzlich möglich, dass sich voneinander verschiedene und/oder zueinander benachbarte Fokuselemente 122 abschnittsweise räumlich überlappen.

Beispielsweise sind einem bestimmten Fokuselement 122 jeweils ein oder mehrere Teilstrahlen 118 und/oder Teilstrahlenbündel zugeordnet. Beispielsweise wird ein jeweiliges Fokuselement 122 durch Fokussierung ein oder mehrerer Teilstrahlen 118 und/oder Teilstrahlenbündel ausgebildet.

Unter einem Fokuselement 122 ist insbesondere ein fokussierter Strahlungsbereich zu verstehen, wie z.B. ein Fokusspot, ein Fokuspunkt oder eine Fokuslinie. Insbesondere weisen die Fokuselemente 122 jeweils eine bestimmte geometrische Form und/oder ein bestimmtes Intensitätsprofil auf, wobei unter der geometrischen Form beispielsweise eine räumliche Form und/oder räumliche Ausdehnung des jeweiligen Fokuselements 122 zu verstehen ist.

Die geometrische Form und/oder das Intensitätsprofil eines bestimmten Fokuselements 122 wird im Folgenden als Fokusverteilung 124 des Fokuselements 122 bezeichnet (Fig. 3). Die Fokusverteilung 124 ist eine Eigenschaft der jeweiligen Fokuselemente 122 und beschreibt deren Form und/oder Intensitätsprofil. Insbesondere weisen mehrere Fokuselemente 122 oder alle ausgebildeten Fokuselemente 122 dieselbe Fokusverteilung 124 auf.

Die Fokusverteilung 124 der ausgebildeten Fokuselemente 122 wird durch den Eingangslaserstrahl 110 definiert, durch dessen Aufteilung mittels des Strahlteilungselements 108 die Fokuselemente 122 ausgebildet werden. Würde

der Eingangslaserstrahl 110 vor dessen Einkopplung in das Strahlteilungselement 108 fokussiert werden, so würde beispielsweise ein einziges Fokuselement mit der dem Eingangslaserstrahl 110 zugeordneten Fokusverteilung ausgebildet werden.

Beispielsweise weist der Eingangslaserstrahl 110, wenn dieser z.B. mittels der Laserquelle 112 bereitgestellt wird, ein gaußförmiges Strahlprofil auf. Durch Fokussierung des Eingangslaserstrahls 110 würde in diesem Fall ein Fokuselement ausgebildet werden, welches eine Fokusverteilung mit gaußförmiger Form und/oder gaußförmigem Intensitätsprofil aufweist.

Alternativ hierzu kann es beispielsweise vorgesehen sein, dass dem Eingangslaserstrahl 110 ein quasi-nichtbeugendes und/oder Bessel-artiges Strahlprofil zugeordnet ist, sodass durch Fokussierung des Eingangslaserstrahls 110 ein Fokuselement ausgebildet werden würde, welches eine Fokusverteilung mit quasi-nichtbeugender bzw. Bessel-artiger Form und/oder quasi-nichtbeugendem bzw. Bessel-artigem Intensitätsprofil aufweist.

Den durch Aufteilung des Eingangslaserstrahls 108 mittels des Strahlteilungselements 108 ausgebildeten Teilstrahlen 118 und/oder Teilstrahlenbündeln ist die Fokusverteilung des Eingangslaserstrahls 110 derart zugeordnet, dass durch Fokussierung der Teilstrahlen 118 die Fokuselemente 122 mit dieser Fokusverteilung und/oder mit einer auf dieser Fokusverteilung basierenden Fokusverteilung ausgebildet werden.

Bei dem in Fig. 1 gezeigten Beispiel weist der Eingangslaserstrahl 110 ein gaußförmiges Strahlprofil auf, d. h. dem Eingangslaserstrahl 110 ist eine Fokusverteilung mit gaußförmiger Form und/oder gaußförmigem Intensitätsprofil zugeordnet. Die Fokuselemente 122 weisen dann beispielsweise jeweils die Fokusverteilung 124 mit dieser gaußförmigen Form und/oder diesem gaußförmigem Intensitätsprofil oder mit einer auf dieser gaußförmigen Form und/oder diesem gaußförmigem Intensitätsprofil basierenden Form bzw. basierendem Intensitätsprofil auf (angedeutet in Fig. 3).

Falls dem Eingangslaserstrahl 110 beispielsweise ein Bessel-artiges Strahlprofil zugeordnet ist, weisen die zur Laserbearbeitung des Werkstücks 102 ausgebildeten Fokuselemente 122 jeweils eine Fokusverteilung 124 mit diesem Bessel-artigen Strahlprofil oder mit einem auf diesem Bessel-artigen Profil basierenden Strahlprofil auf. Die Fokuselemente 122 lassen sich dadurch beispielsweise jeweils mit einer Fokusverteilung ausbilden, welche eine längliche Form und/oder ein längliches Intensitätsprofil aufweist.

Es kann vorgesehen sein, dass die Vorrichtung 100 eine Strahlformungseinrichtung 126 zur Strahlformung des Eingangslaserstrahls 110 aufweist. Beispielsweise ist diese Strahlformungseinrichtung 126 bezüglich einer Haupt-Propagationsrichtung 128 des Eingangslaserstrahls 110 vor dem Strahlteilungselement 108 angeordnet und/oder zwischen der Laserquelle 112 und dem Strahlteilungselement 108 angeordnet. Ein Ausführungsbeispiel der Strahlformungseinrichtung 126 ist in Fig. 4 gezeigt.

Insbesondere wird mittels der Strahlformungseinrichtung 126 dem in das Strahlteilungselement 108 eingekoppelten Eingangslaserstrahl 110 ein bestimmtes Strahlprofil zugeordnet, wodurch sich insbesondere die dem Eingangslaserstrahl 110 zugeordnete Fokusverteilung vor dessen Einkopplung in die Strahlteilungseinrichtung 108 anpassen lässt. Insbesondere lässt sich mittels der Strahlformungseinrichtung 126 die geometrische Form und/oder das Intensitätsprofil der dem Eingangslaserstrahl 110 zugeordneten Fokusverteilung definieren.

Beispielsweise ist die Strahlformungseinrichtung 126 derart eingerichtet und ausgebildet, dass dem in das Strahlteilungselement 108 eingekoppelten Eingangslaserstrahl 108 ein quasi-nichtbeugendes und/oder Bessel-artiges Strahlprofil zugeordnet wird. Die Fokuselemente 122 weisen dann beispielsweise jeweils eine Fokusverteilung 124 mit diesem quasi-nichtbeugendem und/oder Bessel-artigem Strahlprofil oder mit einem auf diesem quasi-nichtbeugendem und/oder Bessel-artigem Strahlprofil basierendes Strahlprofil auf.

Hinsichtlich der Definition und der Realisierung quasi-nichtbeugender und/oder Bessel-artiger Strahlen wird auf das Buch "Structured Light Fields: Applications in

Optical Trapping, Manipulation and Organisation", M. Wördemann, Springer Science & Business Media (2012), ISBN 978-3-642-29322-1 sowie auf die wissenschaftlichen Veröffentlichungen "Bessel-like optical beams with arbitrary trajectories" von I. Chremmos et al., Optics Letters, Vol. 37, No. 23 , 1. Dezember 2012 und "Generalized axicon-based generation of nondiffracting beams" von K. Chen et al., arXiv:1911.03103v1 [physics.optics], 8. November 2019, verwiesen.

Die Strahlformungseinrichtung 126 umfasst bei dem Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 4 ein Strahlformungselement 130, mittels welchem eine Phasenaufprägung auf den Strahlquerschnitt 114 des Eingangslaserstrahls 110 erfolgt. Es lässt sich dadurch die geometrische Form und/oder das Intensitätsprofil der dem Eingangslaserstrahl 110 zugeordneten Fokusverteilung definieren.

Das Strahlformungselement 130 ist beispielsweise als diffraktives optisches Element und/oder als Axiconelement ausgebildet, um dem Eingangslaserstrahl 108 ein quasi-nichtbeugendes und/oder Bessel-artiges Strahlprofil zuzuordnen.

Das Strahlformungselement 130 ist bei dem gezeigten Beispiel als Nahfeldstrahlformungselement ausgebildet.

Beispielsweise wird mittels des Strahlformungselements 130 ein Zwischenbild 132 der dem in das Strahlteilungselement 108 eingekoppelten Eingangslaserstrahl 110 zugeordneten Fokusverteilung ausgebildet. Dieses Zwischenbild ist bezüglich der Haupt-Propagationsrichtung 128 zwischen dem Strahlformungselement 130 und dem Strahlteilungselement 108 positioniert.

Insbesondere ist dem Strahlformungselement 130 eine Fernfeldoptik 134 zugeordnet, mittels welcher eine Fernfeldfokussierung des aus dem Strahlformungselement 130 ausgekoppelten Eingangslaserstrahls 110 in eine Brennebene (nicht gezeigt) der Fernfeldoptik 134 erfolgt. Insbesondere erfolgt mittels der Fernfeldoptik 134 eine Fernfeldfokussierung des Zwischenbilds 132 in die Brennebene. Insbesondere ist das Strahlteilungselement 108 in der genannten Brennebene angeordnet.

Es ist beispielsweise auch möglich, dem in das Strahlteilungselement 108 eingekoppelten Eingangslaserstrahl 110 mittels der Strahlformungseinrichtung 126 eine Form und/oder ein Intensitätsprofil eines abrupt-selbstfokussierenden Strahls zuzuordnen. 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.

Durch Strahlteilung mittels des Strahlteilungselements 108 werden die Fokuselemente 122 insbesondere jeweils identisch zueinander und/oder jeweils als Kopien zueinander ausgebildet. Vorzugsweise ist das Strahlteilungselement 106 als 3D-Strahlteilungselement ausgebildet oder umfasst ein 3D-Strahlteilungselement.

Hinsichtlich der technischen Realisierung und Eigenschaften des als 3D-Strahlteilungselement ausgeführten Strahlteilungselements 108 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.

Zur Durchführung der Strahlteilung wird bei einer Ausführungsform des Strahlteilungselements 108, bei welcher das Strahlteilungselement 108 beispielsweise als 3D-Strahlteilungselement ausgeführt ist, auf den transversalen Strahlquerschnitt 114 des Eingangslaserstrahls 110 eine definierte transversale Phasenverteilung aufgeprägt. Unter einem transversalen Strahlquerschnitt bzw. einer transversalen Phasenverteilung ist insbesondere ein Strahlquerschnitt bzw. eine Phasenverteilung in einer zur Haupt-Propagationsrichtung 128 des Eingangslaserstrahls 110 quer und insbesondere senkrecht orientierten Ebene zu verstehen.

Die zueinander beabstandeten Fokuselemente 122 werden durch Interferenz der fokussierten Teilstrahlen 118 ausgebildet, wobei beispielsweise konstruktive

Interferenz, destruktive Interferenz oder Zwischenfälle hiervon auftreten können, wie z.B. teilweise konstruktive oder teilweise destruktive Interferenz.

Jedem der ausgebildeten Fokuselemente 122 lässt sich mittels des Strahlteilungselements 108 eine bestimmte örtliche Position x_0, y_0, z_0 zuordnen, an welcher ein jeweiliges Fokuselement 122 an der Oberfläche 104 des Werkstücks 106 angeordnet ist (Fig. 5a und 5b). Beispielsweise ist unter der örtlichen Position eines bestimmten Fokuselements 122 die Position seines räumlichen Mittelpunkts und/oder Schwerpunkts zu verstehen.

Weiter lässt sich jedem der ausgebildeten Fokuselemente 122 mittels des Strahlteilungselements 108 eine bestimmte Intensität I_0 zuordnen.

Mittels des Strahlteilungselements 108 lässt sich somit sowohl die örtliche Position x_0, y_0, z_0 als auch die Intensität I_0 eines jeweiligen Fokuselements 122 einstellen.

Zur Ausbildung der Fokuselemente 122 an der jeweiligen Position x_0, y_0, z_0 weist die mittels des Strahlteilungselements 108 aufgeprägte Phasenverteilung für jedes Fokuselement 122 einen bestimmten optischen Gitteranteil und/oder optischen Linsenanteil auf. Die örtlichen Positionen x_0, y_0, z_0 lassen sich durch entsprechende Einstellung und/oder Auslegung des Strahlteilungselements 108 bzw. der mittels des Strahlteilungselements aufgeprägten Phasenverteilung definieren.

Die Intensität I_0 der jeweiligen Fokuselemente 122 ist bestimmt durch Phasenlagen der fokussierten Teilstrahlen 118 zueinander. Diese Phasenlagen sind durch die genannten optischen Gitteranteile und optischen Linsenanteile definierbar. Die Phasenlagen der fokussierten Teilstrahlen 118 können bei der Einstellung bzw. Auslegung des Strahlteilungselements 108 so zueinander gewählt werden, dass die Fokuselemente 122 jeweils eine gewünschte Intensität aufweisen.

Alternativ oder zusätzlich zu den vorstehend beschriebenen Varianten des Strahlteilungselements 108 kann es vorgesehen sein, dass das

Strahlteilungselement 108 als Polarisations-Strahlteilungselement ausgebildet ist oder ein Polarisations-Strahlteilungselement umfasst. In diesem Fall wird mittels des Strahlteilungselements 108 eine Polarisationsstrahlteilung des Eingangslaserstrahls 110 in Strahlen durchgeführt, welche jeweils einen von mindestens zwei unterschiedlichen Polarisationszuständen aufweisen.

Insbesondere sind unter den genannten Polarisationszuständen lineare Polarisationszustände zu verstehen, wobei beispielsweise zwei unterschiedliche Polarisationszustände vorgesehen sind und/oder zueinander senkrecht orientierte Polarisationszustände vorgesehen sind.

Insbesondere sind die Polarisationszustände derart, dass ein elektrisches Feld in einer Ebene senkrecht zur Strahlausbreitungsrichtung der polarisierten Strahlen orientiert ist (transversal elektrisch).

Zur Polarisationsstrahlteilung umfasst das Strahlteilungselement 108 beispielsweise ein doppelbrechendes Linsenelement und/oder ein doppelbrechendes Keilelement. Das doppelbrechende Linsenelement und/oder das doppelbrechende Keilelement sind beispielsweise aus einem Quarzkristall hergestellt oder umfassen einen Quarzkristall.

Hinsichtlich der Funktionsweise und Ausführung des Strahlteilungselements 108 als bzw. mit Polarisations-Strahlteilungselement wird auf die DE 10 2020 207 715 A1 und die DE 10 2019 217 577 A1 verwiesen.

Mittels des Strahlteilungselements 108 lassen sich insbesondere die Teilstrahlen 118 mit unterschiedlichen Polarisationszuständen ausbilden. Durch Fokussierung dieser Teilstrahlen 118 mittels der Fokussieroptik 120 können die Fokuselemente 122 beispielsweise jeweils aus Strahlen mit einem bestimmten Polarisationszustand ausgebildet werden. Den Fokuselementen 122 lässt sich dadurch jeweils ein bestimmter Polarisationszustand zuordnen.

Insbesondere kann es vorgesehen sein, dass die Fokuselemente 122 durch Polarisationsstrahlteilung mittels des Strahlteilungselements 108 derart ausgebildet werden, dass diese an der Oberfläche 104 einen asymmetrischen

Querschnitt aufweisen (vgl. Fig. 7b). Hierzu werden beispielsweise Teilstrahlen 118 mit unterschiedlichen Polarisationszuständen in unterschiedliche Teilbereiche fokussiert. Eine dem asymmetrischen Querschnitt zugeordnete Querschnittsebene ist quer und insbesondere senkrecht zur Haupt-Propagationsrichtung 128 und/oder tangential zur Oberfläche 104 orientiert, d.h. parallel zu einer Tangentialebene der Oberfläche 104 an der Position des Fokuselements 122.

Es kann vorgesehen sein, dass das Strahlteilungselement 108 ein weiteres Strahlformungselement (nicht gezeigt) aufweist und/oder dass dem Strahlteilungselement 108 ein weiteres Strahlformungselement zugeordnet ist und/oder dass das Strahlteilungselement 108 Strahlformungseigenschaften aufweist, um den Querschnitt der Fokuselemente hinsichtlich Form und Intensitätsprofil zu definieren. Beispielsweise kann hierzu ein "beam shaper" vorgesehen sein. Dadurch lassen sich beispielsweise die Fokuselemente 122 im Querschnitt mit rechteckiger oder quadratischer Form bzw. Intensitätsprofil erzeugen.

Die den jeweiligen Fokuselementen 122 zugeordnete Haupt-Propagationsrichtung 128 ist eine Haupt-Propagationsrichtung und/oder mittlere Propagationsrichtung von Laserstrahlen oder Teilstrahlen, aus welchen die Fokuselemente 122 gebildet sind. Insbesondere ist die Haupt-Propagationsrichtung 128 quer und insbesondere senkrecht zur Oberfläche 104 und/oder zu einer Längsmittelachse 136 des Werkstücks 102 orientiert.

Die Oberfläche 104 des beispielsweise zylinderförmig ausgebildeten Werkstücks 102 ist entlang einer Längsrichtung 138 zumindest abschnittsweise eben ausgebildet, d.h. die Krümmung der Oberfläche 104 beträgt in Längsrichtung 138 zumindest näherungsweise Null. Insbesondere ist die dem Werkstück 102 und/oder der Oberfläche 104 zugeordnete Längsrichtung 138 parallel zur Längsmittelachse 136 orientiert.

Entlang einer zur Längsrichtung 138 senkrecht orientierten Umfangsrichtung 140 weist die Oberfläche 104 eine von Null verschiedene und insbesondere eine maximale Krümmung auf. Beispielsweise ist die dem Werkstück 102 und/oder

der Oberfläche 104 zugeordnete Umfangsrichtung 140 senkrecht zur Längsrichtung 138 und senkrecht zur radialen Richtung des Radius R orientiert.

Im Betrieb der Vorrichtung 100 ist es vorgesehen, dass zur Laserbearbeitung des Werkstücks 102 die Oberfläche 104 mit einer Mehrzahl von Fokuselementen 122 beaufschlagt wird. Insbesondere werden die Fokuselemente 122 derart an der Oberfläche 104 angeordnet, dass durch lineare und/oder nichtlineare Wechselwirkung des Materials 106 mit den Fokuselementen 122 das Material 106 an der Oberfläche 104 modifiziert wird.

Wie beispielsweise in Fig. 5a gezeigt kann es vorgesehen sein, dass die Fokuselemente 122, mit welchen das Material 106 an der Oberfläche 104 beaufschlagt wird, zumindest näherungsweise in einer Ebene angeordnet werden, welche beispielsweise senkrecht zur Längsrichtung 138 und/oder Längsmittelachse 136 orientiert ist. Beispielsweise ist eine Raumkoordinate (bei dem gezeigten Beispiel die y-Koordinate) der Fokuselemente 122 konstant. Die Fokuselemente sind beispielsweise entlang der Umfangsrichtung 140 beabstandet an der Oberfläche 104 positioniert.

Es kann auch vorgesehen sein, dass, wie beispielsweise in Fig. 5b gezeigt, Fokuselemente 122 vorgesehen sind, welche entlang der Umfangsrichtung 140 beabstandet positioniert sind und welche entlang der Längsrichtung 138 beabstandet positioniert sind. Beispielsweise liegen die Fokuselemente 122 in mehreren parallelen Ebenen, welche in Längsrichtung 138 beabstandet sind. Beispielsweise sind die Fokuselemente gitterartig auf der Oberfläche 104 positioniert.

Das Werkstück 102 ist derart angeordnet und/oder gelagert, dass die Oberfläche 104 während der Laserbearbeitung in Umfangsrichtung 140 und/oder in Längsrichtung 138 relativ zu den Fokuselementen 122 bewegt werden kann. Beispielsweise kann das Werkstück 102 parallel zur Längsmittelachse 136 bewegt werden und/oder um die Längsmittelachse 136 gedreht werden.

Bei dem in Fig. 6 gezeigten Beispiel ist es vorgesehen, dass die Oberfläche 104 zur Laserbearbeitung mit mehreren zueinander in Längsrichtung 138

beabstandeten Fokuselementen 122 beaufschlagt wird. Durch entsprechende Relativbewegung der Oberfläche 104 zu den Fokuselementen 122 lassen sich dadurch beispielsweise an der Oberfläche 104 längliche Materialmodifikationen 142 ausbilden, welche in Umfangsrichtung 140 zueinander beabstandet sind.

Die längliche Materialmodifikation 142 ist oder umfasst insbesondere eine Rille 143 und/oder eine Furche und/oder eine Vertiefung und/oder eine Materialabtragung.

Beispielsweise erstrecken sich die länglichen Materialmodifikationen 142 an der Oberfläche 104 jeweils entlang einer Längsmittelachse 144, welche parallel oder quer zur Längsrichtung 138 und/oder Längsmittelachse 136 des Werkstücks 102 orientiert ist.

Eine geometrische Form und/oder ein Intensitätsprofil der Fokuselemente 122 ist bei dem in Fig. 6 gezeigten Beispiel insbesondere Bessel-artig und/oder quasi-nichtbeugend und/oder länglich ausgebildet (vgl. Fig. 9). Die Fokuselemente 122 sind parallel zu einer Längsmittelachse 145 länglich ausgebildet, entlang welcher sie sich erstrecken. Insbesondere ist die Längsmittelachse 145 zumindest näherungsweise parallel zur Haupt-Propagationsrichtung 128 der den jeweiligen Fokuselementen 122 zugeordneten Laserstrahlen orientiert.

Die jeweilige Längsmittelachse 145 der Fokuselemente 122 ist nicht notwendigerweise geradlinig oder näherungsweise geradlinig ausgebildet, sondern kann grundsätzlich auch gekrümmt sein.

Die Fokuselemente 122 sind bei dem in Fig. 6 gezeigten Beispiel derart angeordnet, dass die Längsmittelachse 145 quer und insbesondere senkrecht zur Oberfläche 104 orientiert ist (der Verlauf der Oberfläche 104 parallel zur Längsrichtung 138 ist in Fig. 9 durch die gestrichelte Linie angedeutet).

Fig. 7a zeigt eine simulierte Intensitätsverteilung eines Querschnitts eines Fokuselements 122, wobei eine zugeordnete Querschnittsebene senkrecht zur Haupt-Propagationsrichtung 128 und/oder senkrecht zur Längsmittelachse 145 und/oder tangential zur Oberfläche 104 orientiert ist. Der Querschnitt des

Fokuselements 122 ist symmetrisch und beispielsweise kreisförmig ausgebildet. Es lassen sich dadurch beispielsweise die länglichen Materialmodifikationen 142 und/oder Rillen 143 an der Oberfläche 104 mit einer kreisförmigen Querschnittskontur 146 ausbilden, d.h. die Querschnittskontur 146 liegt zumindest abschnittsweise auf einem Kreis.

Bei der in Fig. 7b gezeigten Variante weist der Querschnitt des Fokuselements 122 eine asymmetrische und beispielsweise elliptische Form auf. Es lassen sich dadurch die länglichen Materialmodifikationen 142 und/oder Rillen 143 an der Oberfläche beispielsweise mit einer sinusförmigen Querschnittskontur 146 ausbilden.

Insbesondere weist der Querschnitt des Fokuselements im Fall einer asymmetrischen Form eine Vorzugsrichtung 147 auf. Unter dieser Vorzugsrichtung 147 ist insbesondere eine Richtung zu verstehen, in welcher eine Erstreckungslänge der Fokusverteilung 124 lokal oder global maximiert ist. Beispielsweise ist unter der Vorzugsrichtung 147 eine Haupt-Erstreckungsrichtung der Fokusverteilung 124 zu verstehen.

Im Fall des beispielsweise in Fig. 7b gezeigten Fokuselements mit elliptischem Querschnitt ist die Vorzugsrichtung 147 parallel zu einer großen Halbachse einer zugeordneten Ellipse orientiert.

Bei den Graustufendarstellungen der in den Fig. 7a und 7b gezeigten Intensitätsverteilungen stehen hellere Bereiche für höhere Intensitäten.

Wie in den Fig. 7a und 7b illustriert lässt sich durch Anpassung des Querschnitts der Fokuselemente 122 eine Querschnittskontur 146 und/oder eine Querschnittsgeometrie der mit den Fokuselementen erzeugten länglichen Materialmodifikationen 142 und/oder Rillen 143 definieren.

Fig. 8a zeigt eine simulierte Intensitätsverteilung von mehreren zueinander beabstandeten Fokuselementen 122, wobei eine zugeordnete Querschnittsebene parallel zur Haupt-Propagationsrichtung 128 und/oder senkrecht zur Oberfläche

104 des Werkstücks 102 orientiert ist. Die gezeigten Fokuselemente 122 weisen eine gaußförmige Form und/oder ein gaußförmiges Intensitätsprofil auf.

Die Haupt-Propagationsrichtung 128 ist bei dem in Fig. 8a gezeigten Beispiel parallel zur z-Achse orientiert.

In Fig. 8b ist eine simulierte Phasenverteilung gezeigt, welche den in Fig. 8a gezeigten Fokuselementen 122 zugeordnet ist. Die Graustufenskala reicht von Weiß (Phase +Pi) bis Schwarz (Phase -Pi).

Fig. 9 zeigt eine simulierte Intensitätsverteilung von mehreren zueinander beabstandeten Fokuselementen 122, wobei eine zugeordnete Querschnittsebene parallel zur Haupt-Propagationsrichtung 128 und/oder senkrecht zur Oberfläche 104 des Werkstücks 102 orientiert ist. Die gezeigten Fokuselemente 122 weisen eine längliche Form und/oder eine längliche Intensitätsverteilung auf. Insbesondere basiert die Form bzw. Intensitätsverteilung der Fokuselemente auf einem Bessel-artigen und/oder quasi-nichtbeugenden Strahlprofil.

Die Fokuselemente 122 erstrecken sich jeweils entlang der zugeordneten Längsmittelachse 144, welche quer und insbesondere senkrecht zur Oberfläche 104 des Werkstücks 102 orientiert ist.

Die Strahlformungseinrichtung 126 und/oder das Strahlteilungselement 108 können derart eingerichtet sein, dass die ausgebildeten Fokuselemente 122 ein Intensitätsprofil aufweisen, welches ausgehend von einem Intensitätsmaximum 148 bezüglich einer Haupterstreckungsrichtung 150 und/oder Haupterstreckungsachse einen abrupten Intensitätsabfall aufweist (Fig. 10a und 10b). Derartige Strahlen werden auch als abrupt-selbstfokussierende Strahlen (abruptly autofocusing beams) bezeichnet.

Die Haupterstreckungsrichtung 150 ist insbesondere zumindest näherungsweise parallel zur Haupt-Propagationsrichtung 128 und/oder zu einer Längsmittelachse 145 des Fokuselements 122 orientiert.

Beispielsweise können zur Laserbearbeitung des Werkstücks 102 mehrere zueinander beabstandete Fokuselemente 122 mit einer abrupt-selbstfokussierenden Intensitätsprofil ausgebildet werden.

Bei der in den Fig. 10a und 10b gezeigten Ausführungsform weist das Intensitätsprofil ausgehend von dem Intensitätsmaximum 148 in Haupterstreckungsrichtung 150 eine Intensitätsabfallflanke 152 auf.

Charakteristisch für das Intensitätsprofil ist, dass an der Intensitätsabfallflanke 152 die Intensität ausgehend von dem Intensitätsmaximum 148 auf einen Wert von $1/e^2$ näherungsweise 3-Fach schneller abfällt als dies bei einem gaußförmigen Intensitätsprofil der Fall wäre.

Das Intensitätsmaximum 148 ist insbesondere ein Hauptmaximum und/oder globales Maximum des Intensitätsprofils dieses Ausführungsbeispiels des Fokuselements 122. Insbesondere weist das Intensitätsprofil ein oder mehrere Nebenmaxima 154 auf, welche ausgehend von dem Intensitätsmaximum 148 entgegen der Haupterstreckungsrichtung 150 auf das Intensitätsmaximum 148 folgen. Insbesondere weisen die Nebenmaxima 154 mit zunehmendem Abstand vom Intensitätsmaximum 148 bezüglich der Haupterstreckungsrichtung 150 jeweils geringere maximale Intensitätswerte auf.

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.

Die Vorrichtung 100 funktioniert wie folgt:

Zur Durchführung der Laserbearbeitung an dem Werkstück 102 wird mittels der Laserquelle 112 der Eingangslaserstrahl 110 bereitgestellt und in das Strahlteilungselement 108 eingekoppelt, wobei gegebenenfalls eine Strahlformung des Eingangslaserstrahls 110 mittels der

Strahlformungseinrichtung 126 vor dessen Einkopplung in das Strahlteilungselement 108 erfolgen kann.

Der Eingangslaserstrahl 110 wird mittels des Strahlteilungselements 108 in die Teilstrahlen 118 aufgeteilt, wobei mittels des Strahlteilungselements zudem eine Polarisation der Teilstrahlen 118 und/oder eine weitere Strahlformung erfolgen kann. Die Fokussieroptik 120 fokussiert die Teilstrahlen 118, um die Fokuselemente 122 auszubilden.

Die Fokusverteilung und/oder Positionierung der ausgebildeten Fokuselemente 122 lässt sich mittels des Strahlteilungselements 108 und/oder der Strahlformungseinrichtung 126 definieren. Zur Laserbearbeitung des Werkstücks 102 werden beispielsweise mehrere Fokuselemente 122 zueinander beabstandet an der Oberfläche 104 oder im Bereich der Oberfläche 104 angeordnet, sodass das Material 106 des Werkstücks 102 dort mit den Fokuselementen 122 wechselwirkt. Die Fokuselemente 122 können hierbei in Umfangsrichtung 140 und/oder in Längsrichtung 138 der Oberfläche 104 bzw. des Werkstücks 102 beabstandet positioniert werden (vgl. Fig. 5a, 5b und 6).

Aufgrund der Wechselwirkung zwischen den Fokuselementen 122 und dem Material 106 des Werkstücks 102 wird das Material 106 modifiziert, d.h. die den Fokuselementen 122 zugeordnete Laserstrahlung wechselwirkt mit dem Material 106, um dieses zu modifizieren und insbesondere abzutragen. Insbesondere kann die Wechselwirkung lineare und/oder nichtlineare Absorptionsprozesse umfassen.

Durch die an den Fokuselementen 122 absorbierte Energie der Laserstrahlung erwärmt sich das Material 106 entsprechend der Form und/oder des Intensitätsprofils des jeweiligen Fokuselements. Hierbei kann das Material 106 in einen temporären Plasmazustand übergehen. Insbesondere kann ein Teil des Materials 106 aus dem Verbund des Materials 106 herausgelöst werden, beispielsweise schmelzen oder verdampfen.

Die Wechselwirkung zwischen den Fokuselementen 122 und dem Material 106 ermöglicht insbesondere Bearbeitungsprozesse, welche beispielsweise als

Laserbohren, Perkussionsbohren oder Laserablation bekannt sind. Zudem können durch die Wechselwirkung auch Materialmodifikationen in das Material 106 ein- oder aufgebracht werden.

Während der Beaufschlagung des Materials 106 mit den Fokuselementen 122 wird das Material 106 insbesondere relativ zu den Fokuselementen 122 bewegt, wobei die Relativbewegung insbesondere eine Translationsbewegung parallel zur Längsmittelachse 136 und/oder zur Längsrichtung 138 umfassen kann, und/oder eine Rotationsbewegung um die Längsmittelachse 136 und/oder entlang der Umfangsrichtung 140. Dies ermöglicht beispielsweise eine Ausbildung von Rillen 143 an der Oberfläche 104, welche sich beispielsweise parallel oder quer zur Längsrichtung 136 erstrecken und/oder entlang der Umfangsrichtung 140 zueinander beabstandet sind.

Bei einer bevorzugten Ausführungsform sind mehrere entlang der Umfangsrichtung 140 beabstandete Fokuselemente 122 vorgesehen, was insbesondere eine parallele Ausbildung von in Umfangsrichtung 140 beabstandeten länglichen Materialmodifikationen 142 ermöglicht (Fig. 1 und 5a). Zusätzlich können bei dieser Ausführungsform mehrere in Längsrichtung 138 beabstandete Fokuselemente 122 vorgesehen sein (Fig. 5b). Es lassen sich dadurch insbesondere längere räumliche Abschnitte in Längsrichtung einer länglichen Materialmodifikation 142 in einem Arbeitsschritt ausbilden. Vorzugsweise weisen die Fokuselemente 122 bei dieser Ausführungsform eine gaußförmige Form und/oder ein gaußförmiges Intensitätsprofil auf.

Bei der in Fig. 6 gezeigten Variante ist ein Fokuselement 122 vorgesehen oder es sind mehrere in Längsrichtung 138 beabstandete Fokuselemente 122 vorgesehen, wobei dann die Fokuselemente 122 insbesondere in einer zur Oberfläche 104 senkrecht orientierten Ebene liegen, d.h. in einer Ebene, welche senkrecht zu einer Tangentialebene an die Oberfläche 104 an den jeweiligen Positionen der Fokuselemente 122 orientiert ist. Insbesondere überlappen sich die in Längsrichtung 138 beabstandeten Fokuselemente 122 zumindest teilweise.

Insbesondere ist es vorgesehen, dass an der Oberfläche 104 mehrere längliche Materialmodifikationen 142 ausgebildet werden, welche sich parallel oder quer

zur Längsrichtung 138 erstrecken und/oder welche in Umfangsrichtung 140 beabstandet sind.

Bei dem in Fig. 6 gezeigten Ausführungsbeispiel sind die Fokuselemente 122 vorzugsweise länglich ausgebildet, wobei die Längsmittelachse 145 quer und insbesondere senkrecht zur Oberfläche 104 orientiert ist (vgl. Fig. 9). Insbesondere sind jeweilige Mittelbereiche 155 der Fokuselemente 122 an der Oberfläche 104 oder im Bereich der Oberfläche 104 positioniert. Unter dem Mittelbereich ist insbesondere ein bezüglich der Längsmittelachse 145 in einer Mitte des länglichen Fokuselements 122 angeordneter Bereich zu verstehen.

Zur Ausbildung der länglichen Materialmodifikationen 142 wird, wie in Fig. 6 angedeutet, die Oberfläche 104 relativ zu den jeweiligen Positionen der Fokuselemente 122 in Längsrichtung 138 und in Umfangsrichtung 140 bewegt. Insbesondere umfasst die Relativbewegung zwischen den Fokuselementen 122 und der Oberfläche 104 eine Überlagerung einer Relativbewegung in Längsrichtung 138 und in Umfangsrichtung 140. Beispielsweise wird das zylinderförmige Werkstück 102 hierzu parallel zur Längsmittelachse 136 bewegt und um die Längsmittelachse gedreht. Insbesondere bewegt sich ein bestimmtes Fokuselement 122 an der Oberfläche 104 auf einer spiralförmigen Trajektorie 156 (angedeutet in Fig. 6).

Es ist dann vorgesehen, dass Laserstrahlen bzw. Teilstrahlen, aus welchen die Fokuselemente 122 gebildet sind oder welche den Fokuselementen 122 zugeordnet sind, gepulste Laserstrahlen sind. Die den Fokuselementen 122 zugeordneten Laserpulse sind mit der Relativbewegung der Oberfläche 104 derart synchronisiert, dass zu unterschiedlichen Zeiten auf die Oberfläche 104 auftreffende Laserpulse jeweils bestimmten auszubildenden länglichen Materialmodifikationen 142 und insbesondere benachbarten und/oder beabstandeten auszubildenden länglichen Materialmodifikationen 142 zugeordnet sind.

Beispielsweise ist ein auf die Oberfläche 104 treffender zeitlich erster Laserpuls eines bestimmten Fokuselements 122 einer ersten länglichen Materialmodifikation 142a zugeordnet, ein zweiter Laserpuls einer zu der ersten

länglichen Materialmodifikation 142a in Umfangsrichtung 140 beabstandeten zweiten länglichen Materialmodifikation 142b und ein dritter Laserpuls einer zu der zweiten länglichen Materialmodifikation 142b in Umfangsrichtung 140 beabstandeten dritten länglichen Materialmodifikation 142c zugeordnet, usw. Es wird dadurch bei jedem vollständigen Umlauf einer bestimmten länglichen Materialmodifikation 142 um die Längsmittelachse 136 mittels der Fokuselemente 122 jeweils ein Abschnitt der Materialmodifikation 142 ausgebildet.

Ein zur Längsrichtung 138 und/oder Längsmittelachse 144 parallel orientierter Vorschub beträgt beispielsweise je vollständigem Umlauf des Werkstücks 102 10 nm bis 500 nm.

Das Werkstück wird beispielsweise mit ca. 100 Hz um die Längsmittelachse 136 rotiert.

Beispielsweise beträgt ein Durchmesser des zylinderförmig ausgebildeten Werkstücks mindestens 0,1 mm und/oder höchstens 1.000 mm, bevorzugt mindestens 0,5 mm und/oder höchstens 20 mm.

Ein Abstand zwischen an der Oberfläche 104 benachbarten länglichen Materialmodifikationen 142 beträgt beispielsweise mindestens 1 µm und/oder höchstens 100 µm.

Es ist grundsätzlich auch möglich, dass die länglichen Materialmodifikationen vollständig nacheinander ausgebildet werden. Beispielsweise wird zuerst die längliche Materialmodifikation 142a durch Relativbewegung der Oberfläche 104 zu den Fokuselementen 122 parallel zur Längsrichtung 138 ausgebildet, anschließend die Oberfläche 104 in Umfangsrichtung 140 bewegt und die nächste längliche Materialmodifikation 142b ausgebildet, dann die längliche Materialmodifikation 142c, usw.

Bezugszeichenliste

x_0	Position in x-Richtung
y_0	Position in y-Richtung
z_0	Position in z-Richtung
I_0	Intensität
R	Radius
100	Vorrichtung
102	Werkstück
104	Oberfläche
106	Material
108	Strahlteilungselement
110	Eingangslaserstrahl
112	Laserquelle
114	Strahlquerschnitt
116	Wellenfront
118	Teilstrahlen
118a	Teilstrahl
118b	Teilstrahl
120	Fokussieroptik
122	Fokuselement
124	Fokusverteilung
126	Strahlformungseinrichtung
128	Haupt-Propagationsrichtung
130	Strahlformungselement
132	Zwischenbild
134	Fernfeldoptik
136	Längsmittelachse
138	Längsrichtung
140	Umfangsrichtung
142	längliche Materialmodifikation
142a,b,c	längliche Materialmodifikation
143	Rille
144	Längsmittelachse

145 Längsmittelachse
146 Querschnittskontur
147 Vorzugsrichtung
148 Intensitätsmaximum
150 Haupterstreckungsrichtung
152 Intensitätsabfallflanke
154 Nebenmaximum
155 Mittelbereich
156 Trajektorie

Patentansprüche

1. Verfahren zur Laserbearbeitung eines Werkstücks (102), welches eine gekrümmte Oberfläche (104) aufweist, bei dem mittels eines Eingangslaserstrahls (110) mindestens ein Fokuselement (122) bereitgestellt wird, die Oberfläche (104) des Werkstücks (102) mit dem mindestens einen Fokuselement (122) beaufschlagt wird und das mindestens eine Fokuselement (122) relativ zu der Oberfläche (104) bewegt wird, wobei das mindestens eine Fokuselement (122) parallel zu einer Längsmittelachse (145) des mindestens einen Fokuselements (122) eine längliche Form aufweist, die Längsmittelachse (145) des mindestens einen Fokuselements (122) quer und insbesondere senkrecht zu der Oberfläche (104) des Werkstücks (102) orientiert ist und wobei mittels des mindestens einen Fokuselements (122) ein Material (106) des Werkstücks (102) an der Oberfläche (104) abgetragen und/oder modifiziert wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das mindestens eine Fokuselement (122) eine Bessel-artige Form und/oder ein Bessel-artiges Intensitätsprofil aufweist.

3. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das mindestens eine Fokuselement (122) parallel zu seiner Längsmittelachse (145) eine räumliche Ausdehnung von mindestens 5 µm und/oder höchstens 1000 µm und bevorzugt von mindestens 10 µm und/oder höchstens 500 µm aufweist.

4. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass mehrere Fokuselemente (122) bereitgestellt werden, welche parallel zu einer Längsrichtung (138) des Werkstücks (102) beabstandet sind, wobei die Oberfläche (104) parallel zur Längsrichtung (138) eben ausgebildet ist und wobei insbesondere die Oberfläche (104) des Werkstück (102) gleichzeitig mit den Fokuselementen (122) beaufschlagt wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass zur Bereitstellung der Fokuselemente (122) der Eingangslaserstrahl (110) mittels eines Strahlteilungselements (108) in eine Mehrzahl von Teilstrahlen (118) aufgeteilt wird und aus dem Strahlteilungselement (108) ausgekoppelte Teilstrahlen (118) fokussiert werden, um die Fokuselemente (122) auszubilden.

6. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass durch Relativbewegung zwischen dem mindestens einen Fokuselement (122) und der Oberfläche (104) an der Oberfläche (104) mehrere längliche Modifikationen (142) und insbesondere mehrere Rillen (143) ausgebildet werden, welche in einer Umfangsrichtung (140) des Werkstücks (102) zueinander beabstandet sind, wobei die Oberfläche (104) des Werkstücks (102) entlang der Umfangsrichtung (140) gekrümmt ist.

7. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine Relativbewegung zwischen dem mindestens einen Fokuselement (122) und der Oberfläche (140) des Werkstücks (102) eine Bewegung parallel zu einer Längsrichtung (138) des Werkstücks (102) umfasst, wobei die Oberfläche (104) parallel zur Längsrichtung (138) eben ausgebildet ist.

8. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine Relativbewegung zwischen dem mindestens einen Fokuselement (122) und der Oberfläche (140) des Werkstücks (102) eine Bewegung in einer Umfangsrichtung (140) des Werkstücks (102) umfasst, wobei die Oberfläche (104) des Werkstücks (102) entlang der Umfangsrichtung (140) gekrümmt ist.

9. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Eingangslaserstrahl (110) ein gepulster Laserstrahl ist und dass eine Relativbewegung zwischen dem mindestens einen Fokuselement (122) und der Oberfläche (104) derart angepasst ist, dass Laserpulse, aus welchen das mindestens eine Fokuselement (122) zu unterschiedlichen Zeitpunkten gebildet ist, jeweils in einer Umfangsrichtung

(140) des Werkstücks (102) beabstandet auf die Oberfläche (104) treffen, um an der Oberfläche (104) in Umfangsrichtung (140) beabstandete längliche Modifikationen (142) und insbesondere Rillen (143) auszubilden, wobei die Oberfläche (104) des Werkstücks (102) entlang der Umfangsrichtung (140) gekrümmt ist.

10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass die Relativbewegung zwischen dem mindestens einen Fokuselemente (122) und der Oberfläche (104) derart synchronisiert ist, dass mittels zeitlich aufeinanderfolgender Laserpulse an der Oberfläche (104) jeweils zumindest Abschnitte von länglichen Modifikationen (142) und insbesondere Rillen (143) ausgebildet werden, welche in Umfangsrichtung (140) des Werkstücks (102) zueinander beabstandet sind.

11. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine geometrische Form und/oder ein Intensitätsprofil des mindestens einen Fokuselements (122) in einem Querschnitt einstellbar ist oder eingestellt wird, um eine Geometrie einer mittels des mindestens einen Fokuselements (122) ausgebildeten Modifikation (142) und/oder eines mittels des mindestens einen Fokuselements (122) bewirkten Abtrags des Materials (106) des Werkstücks (102) an der Oberfläche (104) zu definieren, wobei der Querschnitt tangential zur Oberfläche (104) des Werkstücks (102) und/oder senkrecht zu einer jeweiligen Längsmittelachse (145) des mindestens einen Fokuselements (122) orientiert ist.

12. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass die geometrische Form des mindestens einen Fokuselements (122) in dem Querschnitt eine Vorzugsrichtung (147) aufweist, entlang welcher das mindestens eine Fokuselement (122) in dem Querschnitt eine größte räumliche Ausdehnung aufweist, und/oder dass die geometrische Form des mindestens einen Fokuselements (122) in dem Querschnitt asymmetrisch und insbesondere elliptisch ist.

13. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Material (106) des Werkstücks (102) mittels des

mindestens einen Fokuselements (122) an der Oberfläche (104) abgetragen wird und/oder strukturiert wird, und/oder dass an der Oberfläche (104) des Werkstücks (102) mindestens eine längliche Modifikation (142) und insbesondere mindestens eine Rille (143) ausgebildet wird, wobei insbesondere eine Längsmittelachse (144) der mindestens einen länglichen Modifikation (142) zumindest komponentenweise parallel zu einer Längsrichtung (138) des Werkstücks (102) orientiert ist, entlang welcher die Oberfläche (104) eben ist.

14. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch zumindest eines der Folgenden:

- das Werkstück (102) und/oder die Oberfläche (104) des Werkstücks (102) sind zylinderförmig ausgebildet;

- die Oberfläche (104) des Werkstücks (102) ist konvex gekrümmt;

- dem Werkstück (102) und/oder der Oberfläche (104) des Werkstücks (102) ist eine Längsrichtung (138) zugeordnet ist, wobei die Oberfläche (104) entlang der Längsrichtung (138) eben ist

- dem Werkstück (102) und/oder der Oberfläche (104) des Werkstücks (102) ist eine Umfangsrichtung (140) zugeordnet, wobei die Oberfläche (104) entlang der Umfangsrichtung (140) gekrümmt ist;

- das Werkstück (102) weist eine zur Längsrichtung (138) parallele Längsmittelachse (136) auf, wobei eine Drehung des Werkstücks (102) um die Längsmittelachse (136) eine Relativbewegung zwischen dem mindestens einen Fokuselement (122) und der Oberfläche (104) in Umfangsrichtung (140) der Oberfläche (104) bewirkt.

15. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine dem mindestens einen Fokuselement (122) zugeordnete Haupt-Propagationsrichtung (128) von Laserstrahlen und/oder Teilstrahlen (118), aus welchen das mindestens eine Fokuselement (122)

gebildet ist, quer und insbesondere senkrecht zu der Oberfläche (104) des Werkstücks (102) orientiert ist, und/oder dass eine dem mindestens einen Fokuselement (122) zugeordnete Haupt-Propagationsrichtung (128) von Laserstrahlen und/oder Teilstrahlen (118), aus welchen das mindestens eine Fokuselement (122) gebildet ist, zumindest näherungsweise parallel zur Längsmittelachse (145) des mindestens einen Fokuselements (122) orientiert ist.

16. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Werkstück (102) an der Oberfläche (104) ein für den Eingangslaserstrahl (110) und/oder für einen Laserstrahl, aus welchem das mindestens eine Fokuselement (122) ausgebildet ist, opakes Material (106) aufweist.

17. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Eingangslaserstrahl (110) und/oder ein Laserstrahl, aus welchem das mindestens eine Fokuselement (122) ausgebildet ist, ein gepulster Laserstrahl und insbesondere ein Ultrakurzpulslaserstrahl ist.

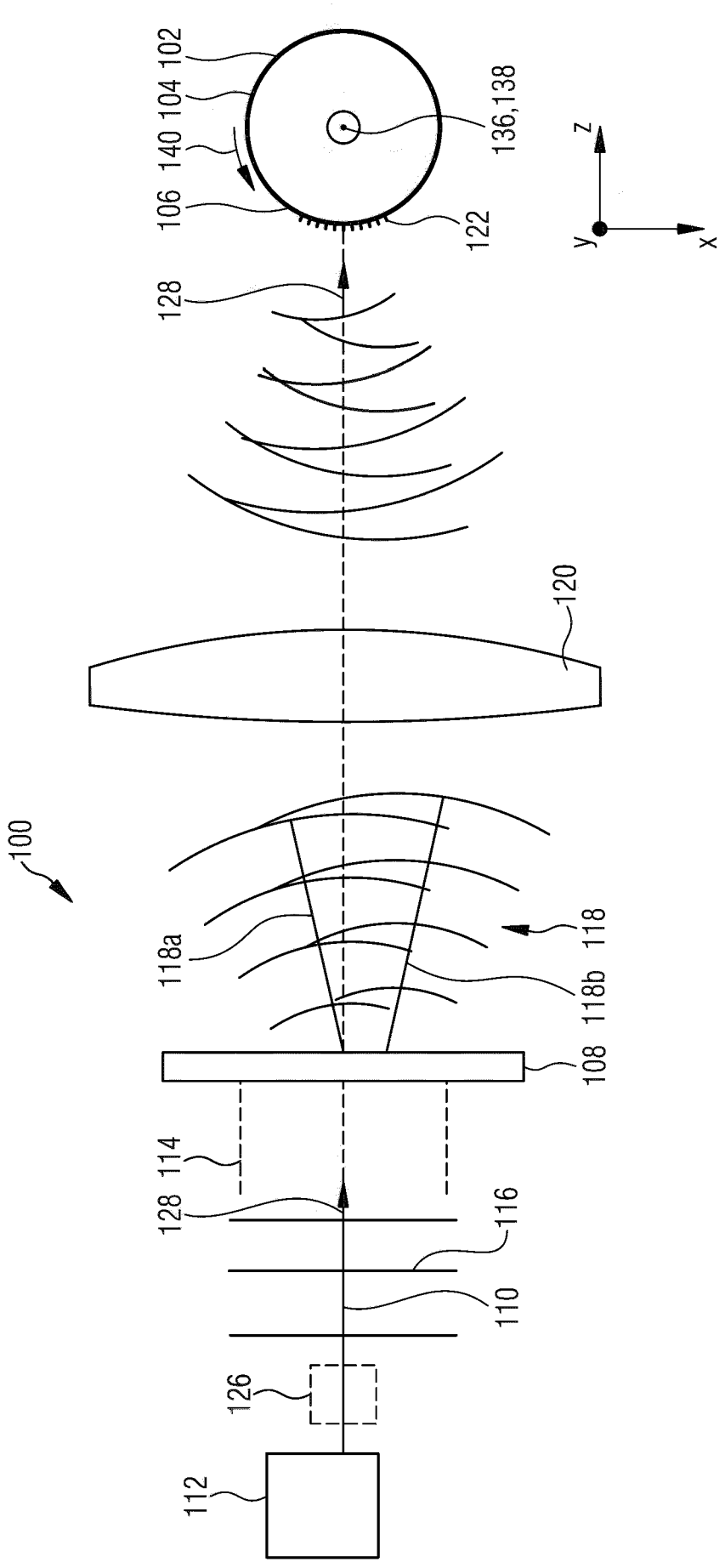

102
104
140
106
136,138
122
z
y
x
128
120
100
118a
118
118b
108
114
128
116
110
126
112

Fig.1

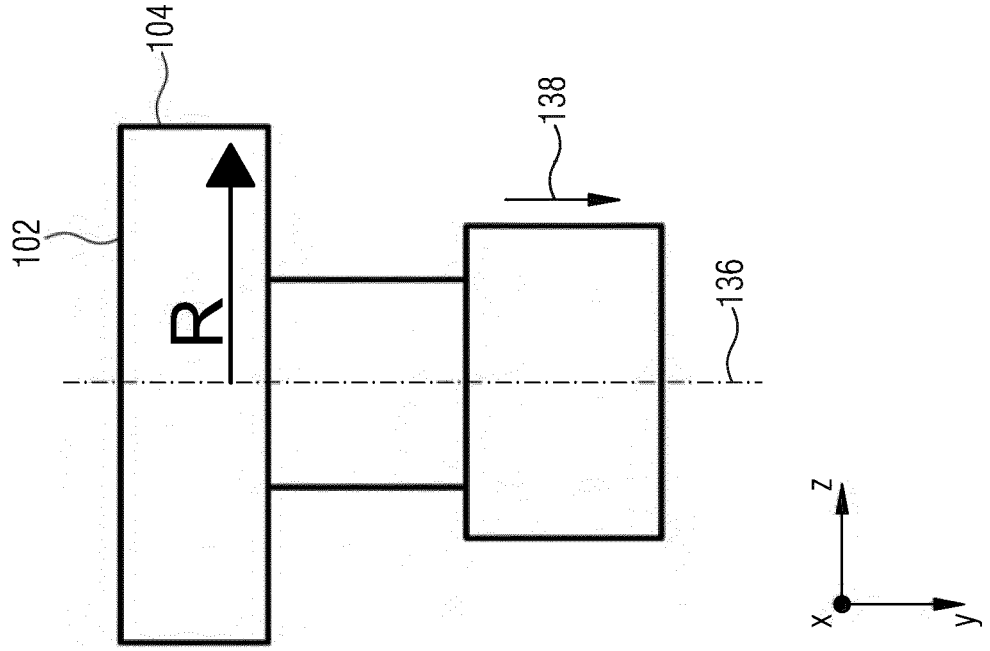


Fig.2b

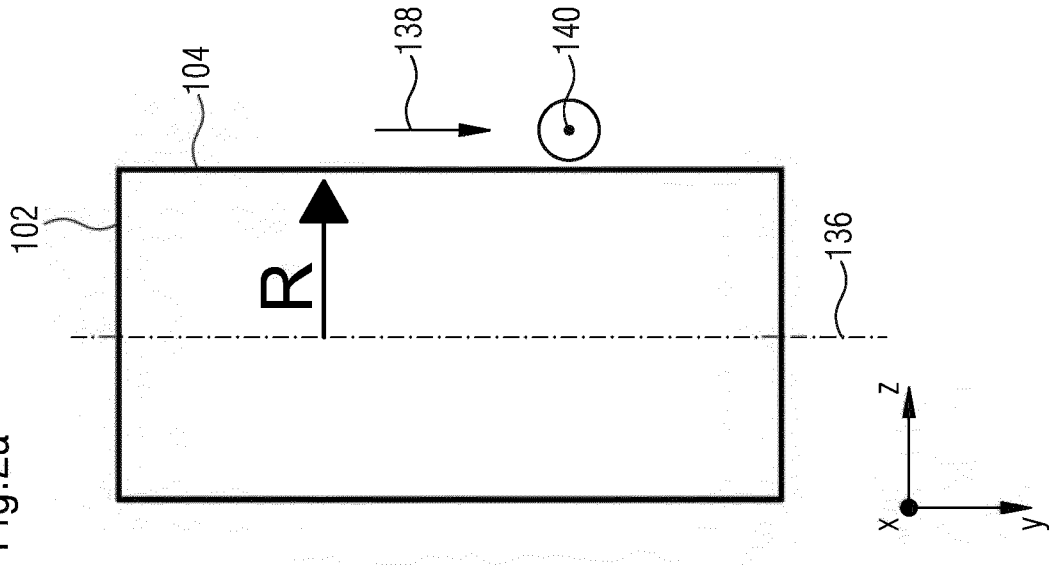


Fig.2a

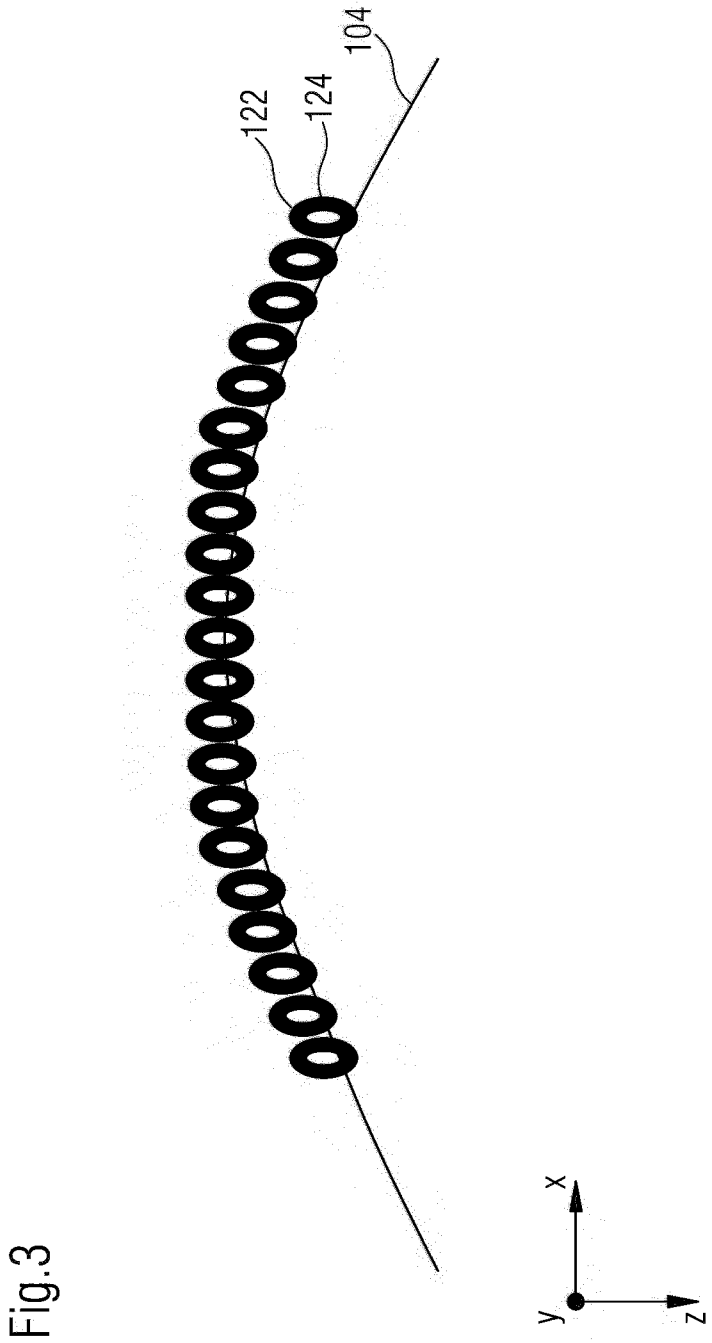


Fig.3

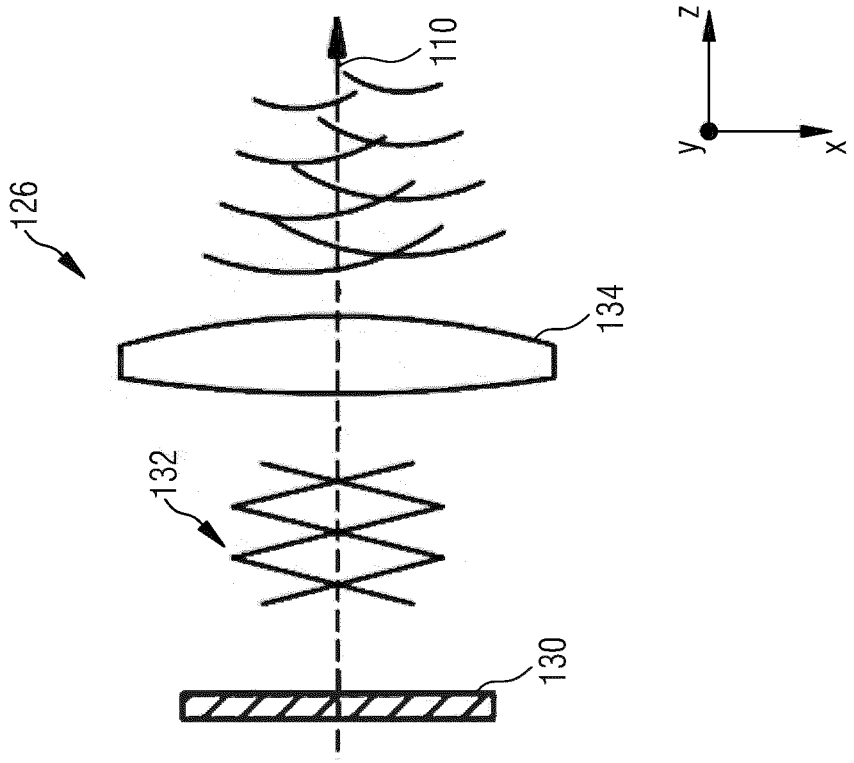


Fig.4

Fig.5b

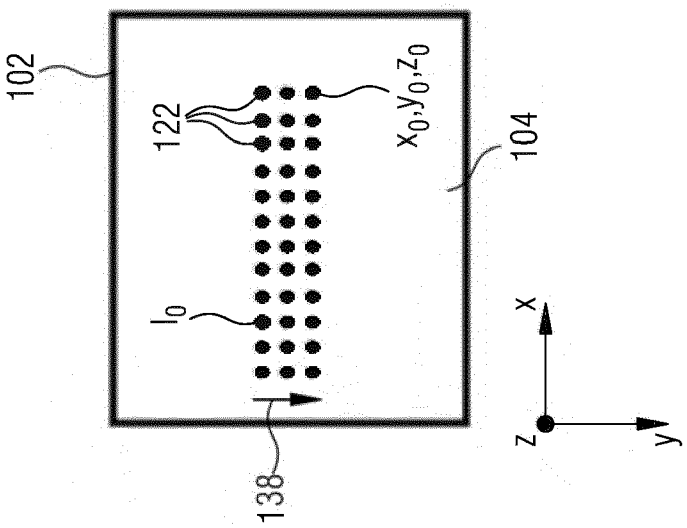
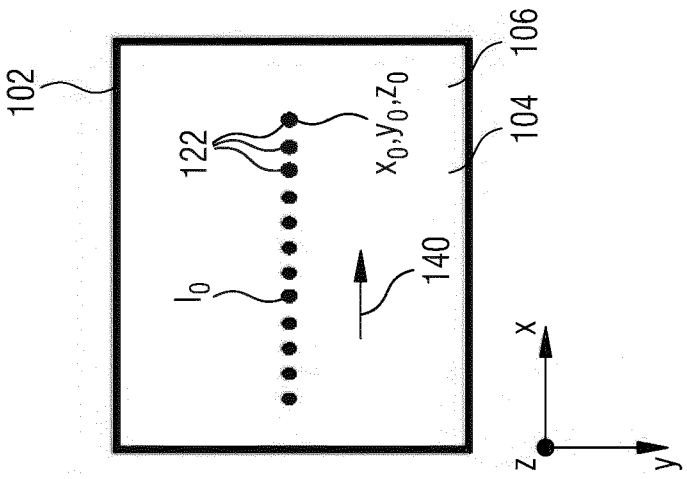


Fig.5a



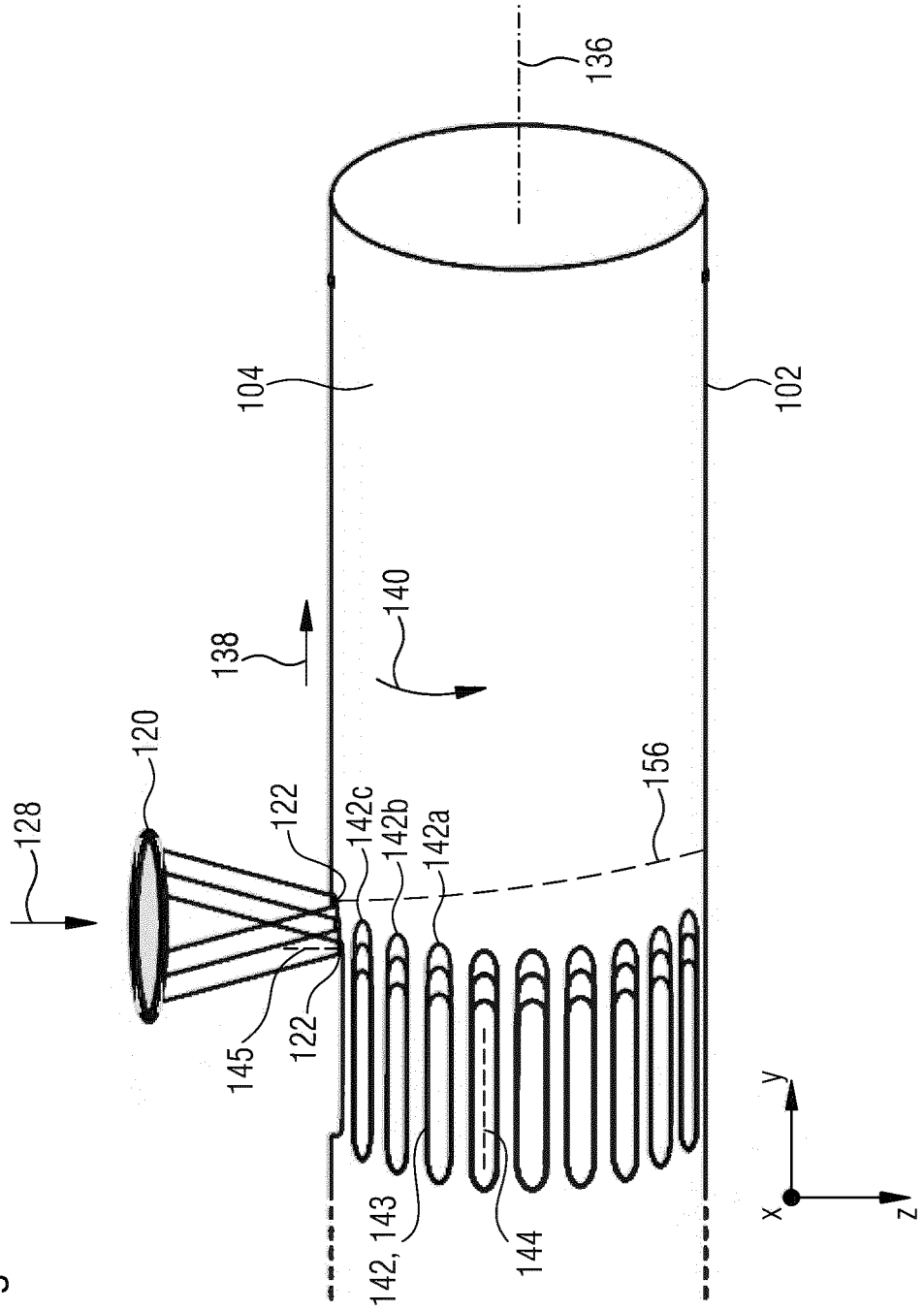

136
104
102
140
138
120
128
122
142c
142b
142a
156
145
122
142, 143
144
y
x
z

Fig.6

Fig.7a

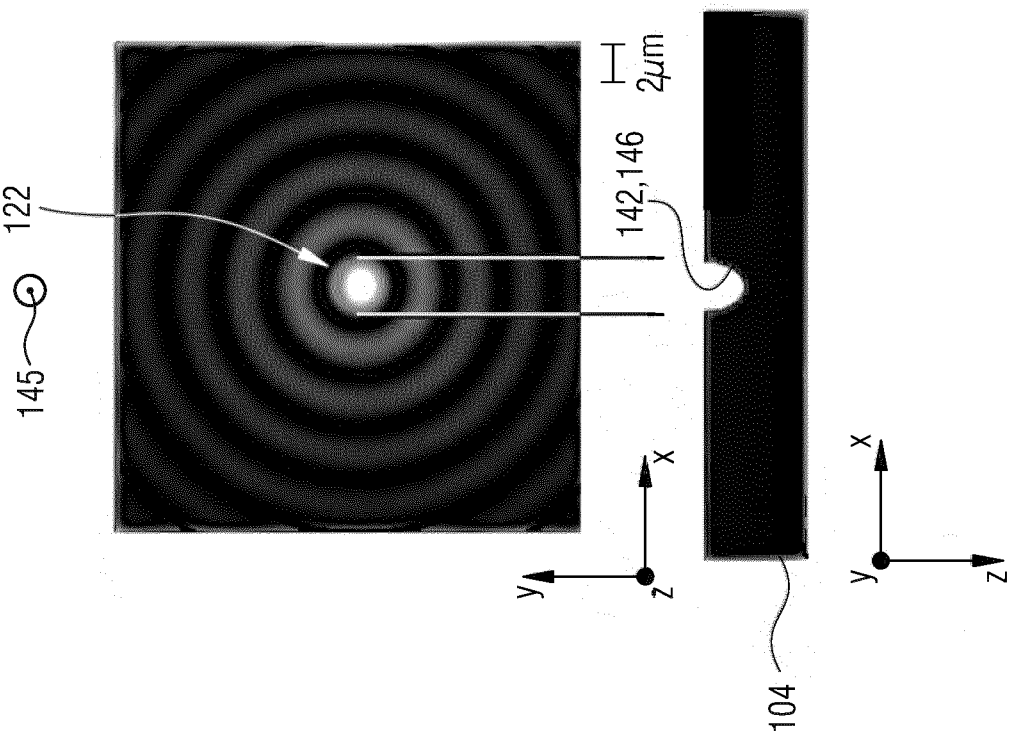


Fig.7b

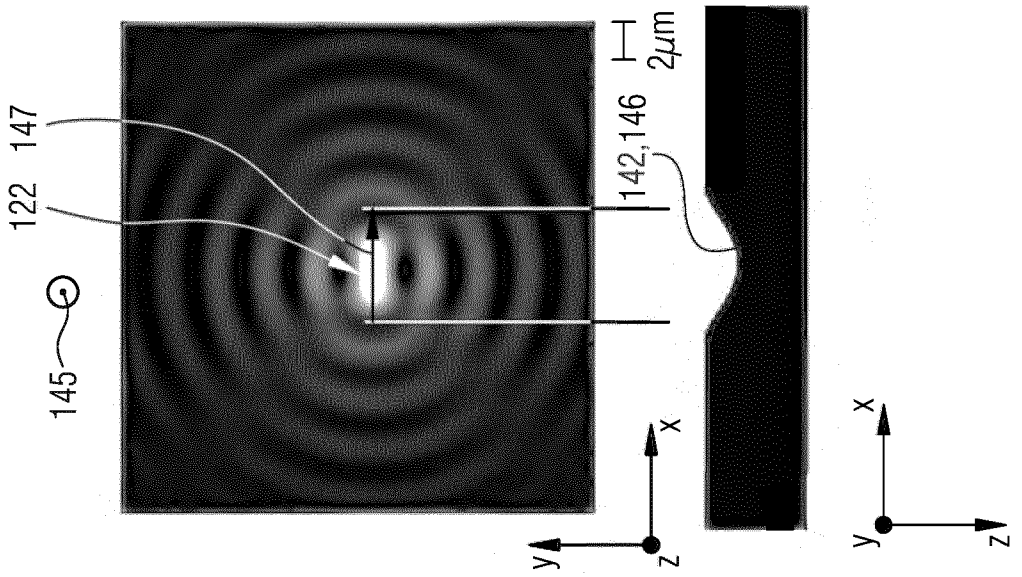


Fig.8b

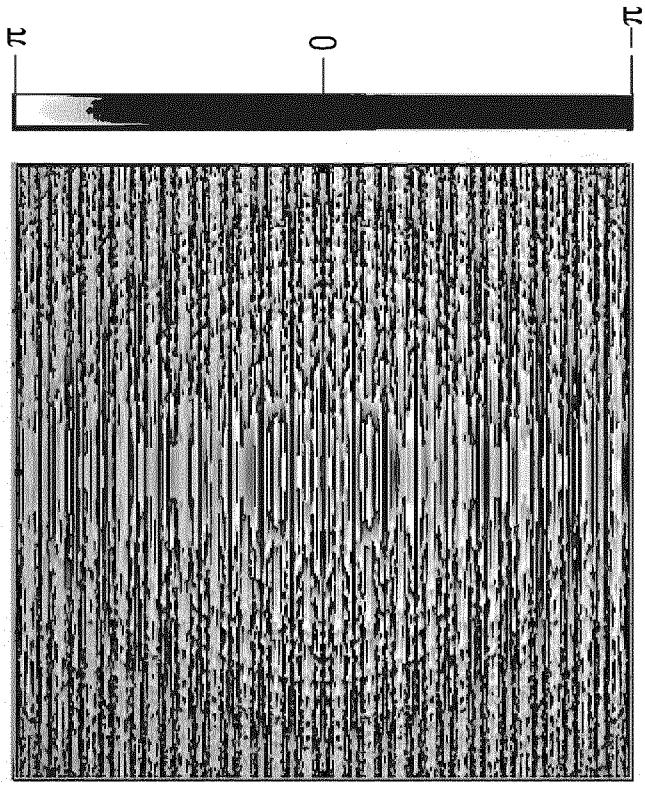
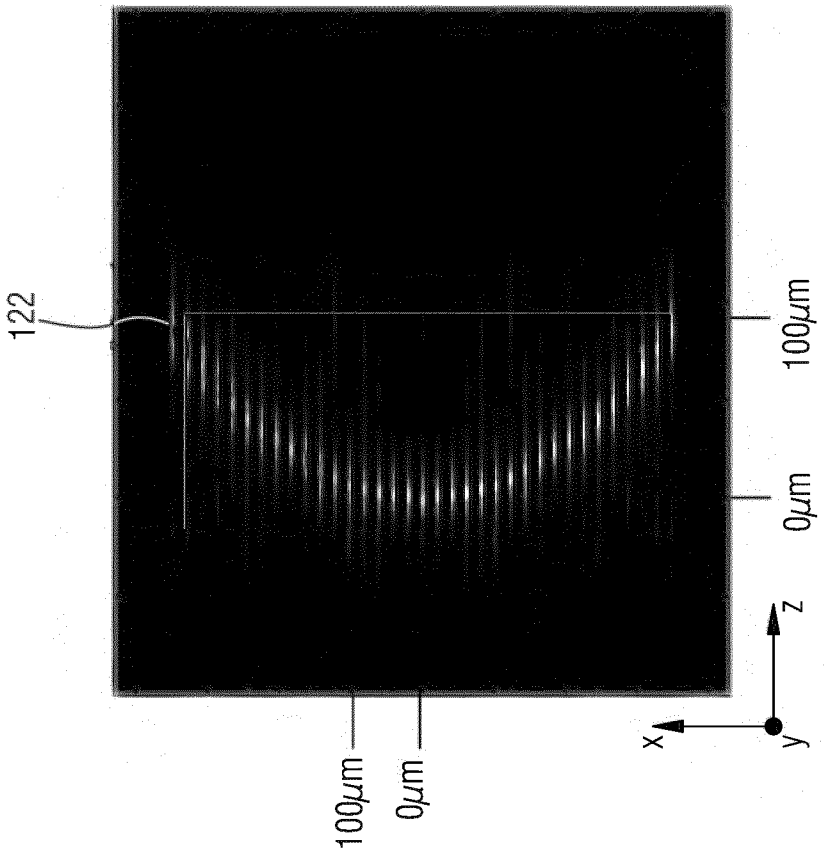


Fig.8a



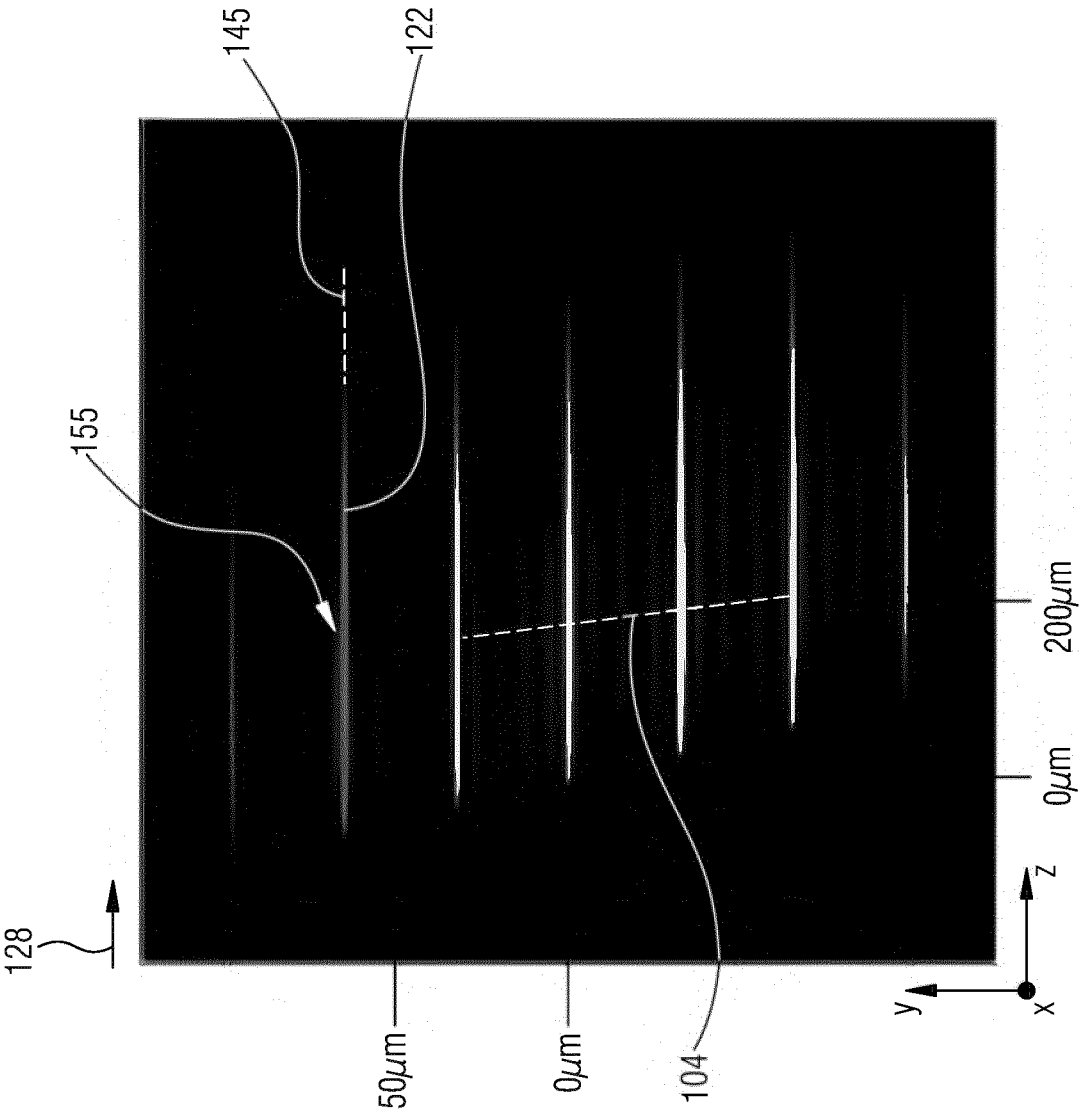


Fig.9

Fig.10b

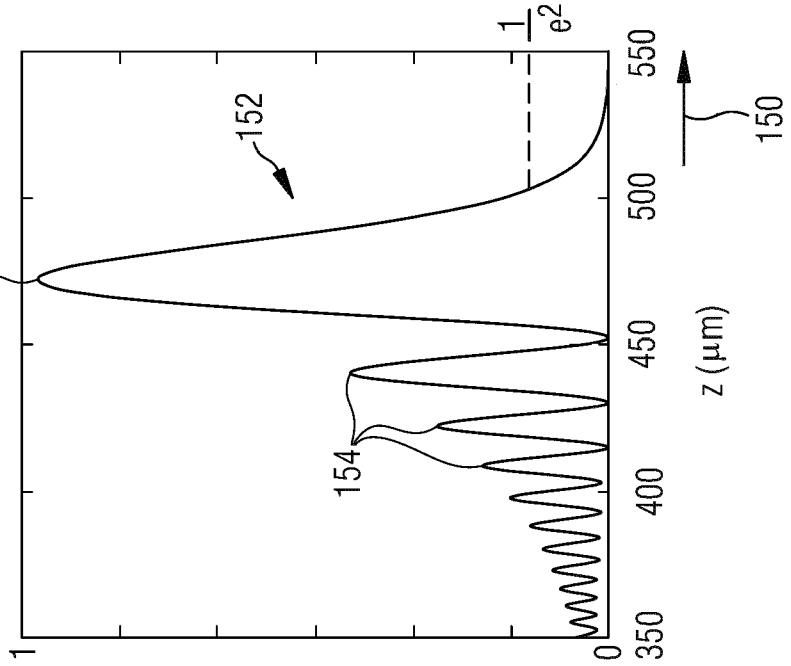
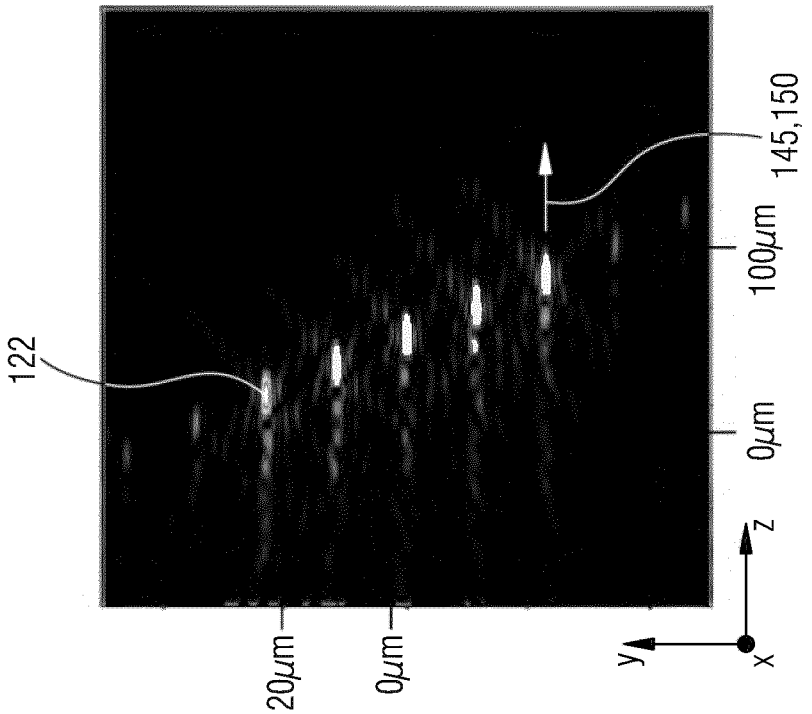


Fig.10a



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/EP2023/051198

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

B23K 26/06(2014.01)i; ***B23K 26/067***(2006.01)i; ***B23K 26/073***(2006.01)i; ***B23K 26/08***(2014.01)i; ***B23K 26/352***(2014.01)i; ***B23K 26/364***(2014.01)i; ***B21B 1/22***(2006.01)i; ***B21B 27/00***(2006.01)i; ***B23K 26/0622***(2014.01)i; ***B41C 1/05***(2006.01)i; *B23K 101/06*(2006.01)n; *B23K 101/08*(2006.01)n; *B23K 103/04*(2006.01)n; *B23K 103/10*(2006.01)n

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

B23K; B41C; B21B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	JP 2010115661 A (PANASONIC CORP) 27 May 2010 (2010-05-27) paragraphs [0044], [0050], [0052], [0057], [0058], [0074] - [0076], [0087], [0091], [0092], [0098], [0101]; claim 10; figures 1,3,4	1-17
X	WO 9429107 A1 (ZED INSTR LTD [GB]; SIMONSEN WARREN WAYNE [GB] ET AL.) 22 December 1994 (1994-12-22) page 1, lines 5-9; figures 1,8,11,12A,12B, 12C page 2, lines 26-35 page 6, lines 11-15	1-17
A	US 2020254569 A1 (LI XINGHUA [US] ET AL) 13 August 2020 (2020-08-13) paragraph [0009]; figures 1-5	1-17

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☑ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
20 April 2023	**02 May 2023**

Name and mailing address of the ISA/EP	Authorized officer
European Patent Office **p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk** **Netherlands**	**Kramer, Ellen**
Telephone No. **(+31-70)340-2040** Facsimile No. **(+31-70)340-3016**	Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/EP2023/051198

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
JP 2010115661 A	27 May 2010	JP 5188364 B2	24 April 2013
		JP 2010115661 A	27 May 2010
WO 9429107 A1	22 December 1994	AU 6851894 A	03 January 1995
		WO 9429107 A1	22 December 1994
US 2020254569 A1	13 August 2020	NONE	

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2023/051198

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES

INV. B23K26/06 B23K26/067 B23K26/073 B23K26/08 B23K26/352
B23K26/364 B21B1/22 B21B27/00 B23K26/0622 B41C1/05
ADD. B23K101/06 B23K101/08 B23K103/04 B23K103/10

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
B23K B41C B21B

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)
EPO-Internal, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	JP 2010 115661 A (PANASONIC CORP) 27. Mai 2010 (2010-05-27) Absätze [0044], [0050], [0052], [0057], [0058], [0074] - [0076], [0087], [0091], [0092], [0098], [0101]; Anspruch 10; Abbildungen 1,3,4	1-17
X	WO 94/29107 A1 (ZED INSTR LTD [GB]; SIMONSEN WARREN WAYNE [GB] ET AL.) 22. Dezember 1994 (1994-12-22) Seite 1, Zeilen 5-9; Abbildungen 1,8,11,12A,12B, 12C Seite 2, Zeilen 26-35 Seite 6, Zeilen 11-15	1-17
A	US 2020/254569 A1 (LI XINGHUA [US] ET AL) 13. August 2020 (2020-08-13) Absatz [0009]; Abbildungen 1-5	1-17

☐ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen ☒ Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :
"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist
"E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist
"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)
"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht
"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist
"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist
"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung;; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden
"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung;; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist
"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche	Absendedatum des internationalen Recherchenberichts
20. April 2023	02/05/2023

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde	Bevollmächtigter Bediensteter
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Kramer, Ellen

1

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2023/051198

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
JP 2010115661 A	27-05-2010	JP 5188364 B2	24-04-2013
		JP 2010115661 A	27-05-2010
WO 9429107 A1	22-12-1994	AU 6851894 A	03-01-1995
		WO 9429107 A1	22-12-1994
US 2020254569 A1	13-08-2020	KEINE	