

(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
24. Dezember 2020 (24.12.2020)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2020/254615 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

B23K 26/0622 (2014.01) B23K 26/26 (2014.01)
B23K 26/06 (2014.01) B23K 26/324 (2014.01)
B23K 26/082 (2014.01) C03B 23/20 (2006.01)
B23K 26/242 (2014.01) B23K 103/00 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2020/067163

(22) Internationales Anmeldedatum:
19. Juni 2020 (19.06.2020)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2019 116 803.1
21. Juni 2019 (21.06.2019) DE

(71) Anmelder: TRUMPF LASER- UND SYSTEMTECH-
NIK GMBH [DE/DE]; Johann-Maus-Str. 2, 71254 Ditzin-
gen (DE).

(72) Erfinder: DR. KUMKAR, Malte; Am Wäldchen 10,
99425 Weimar (DE). ZIMMERMANN, Felix; Gleiwitzer
Straße 47, 71229 Leonberg (DE).

(74) Anwalt: NORDMEYER, Philipp; df-mp Dörries Frank-
Molnia & Pohlman, Patentanwälte Rechtsanwälte PartG
mbB, Theatinerstraße 16, 80333 München (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, BY,
BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM,
DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN,
KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD,
ME, 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,
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, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI,

(54) Title: METHOD AND DEVICE FOR PROCESSING A WORKPIECE WITH A HIGHLY DYNAMIC MOVEMENT OF THE
LASER BEAM BETWEEN DIFFERENT SPATIAL REGIONS

(54) Bezeichnung: VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR BEARBEITUNG EINES WERKSTÜCKS MIT
HOCHDYNAMISCHER BEWEGUNG DES LASERSTRAHLES ZWISCHEN UNTERSCHIEDLICHEN RÄUMLICHEN
BEREICHEN

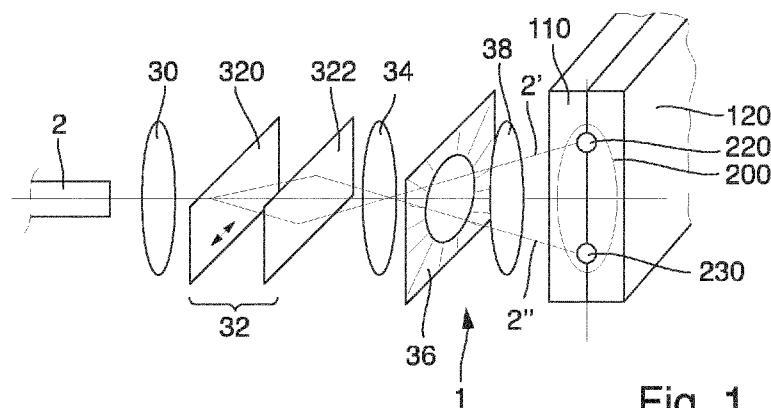


Fig. 1

(57) Abstract: The invention relates to a method for processing at least one workpiece (110, 120). The workpiece (110, 120) is supplied with a processing beam (2), preferably a pulsed laser beam, particularly preferably an ultrashort pulse laser beam, wherein the processing beam (2, 2', 2'') is moved in a highly dynamic manner between at least two different spatial regions (220, 230) in order to form a processing zone (200).

(57) Zusammenfassung: Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Bearbeiten mindestens eines Werkstücks (110, 120), wobei das Werkstück (110, 120) mit einem Bearbeitungsstrahl (2), bevorzugt einen gepulsten Laserstrahl, besonders bevorzugt einem Ultrakurzpuls-Laserstrahl, beaufschlagt wird, wobei der Bearbeitungsstrahl (2, 2', 2'') zur Ausbildung einer Prozesszone (200) hochdynamisch zwischen mindestens zwei unterschiedlichen räumlichen Bereichen (220, 230) bewegt wird.



WO 2020/254615 A1

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)

**VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR BEARBEITUNG
EINES WERKSTÜCKS MIT HOCHDYNAMISCHER BEWEGUNG
DES LASERSTRAHLES ZWISCHEN UNTERSCHIEDLICHEN RÄUMLICHEN BEREICHEN**

5 Technisches Gebiet

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Bearbeiten mindestens eines Werkstücks mit wärmeakkumulierenden Prozessen, insbesondere zum Verschweißen zweier Werkstücke mittels eines Bearbeitungsstrahls, wobei mindestens eines der Werkstücke transparent für den Bearbeitungsstrahl ist. Die Erfindung betrifft insbesondere auch das Verschweißen zweier
10 transparenter Werkstücke wie beispielsweise Gläser, Keramiken oder anderer kristalliner oder polymerbasierter Materialien unter Verwendung eines gepulsten Laserstrahls.

Stand der Technik

Zum Laserschweißen von Werkstücken aus transparenten Materialien und insbesondere zum Verschweißen von Werkstücken aus Glas oder Keramik ist es bekannt, gepulste Laser und
15 insbesondere Ultrakurzpulslaser zu verwenden. Der gepulste Laserstrahl wird in, auf oder unterhalb eines Werkstück fokussiert, in welchem aufgrund der Absorption der Laserenergie das Material eines oder beider der Werkstücke einer Prozesszone aufgeschmolzen wird und entsprechend der Spalt zwischen den beiden Werkstücken durch die Schmelze überbrückt wird, so dass auf diese Weise nach dem erneuten Erstarren des Materials eine Schweißnaht zwischen den beiden
20 Werkstücken ausgebildet wird, ohne dass ein weiterer Materialeinsatz notwendig wäre. Mit anderen Worten findet eine Verschweißung unter Verwendung der bereits in den Werkstücken vorhandenen Materialien statt.

Aufgrund der Transparenz zumindest eines, beider oder aller Werkstücke für den Bearbeitungsstrahl kann eine Verschweißung auch in einem Bereich zwischen den aneinander
25 anliegenden Werkstücken erreicht werden. Dabei wird der Bearbeitungsstrahl durch eines der transparenten Werkstücke hindurch zwischen den Werkstücken fokussiert, so dass ein Aufschmelzen des Materials an der zwischen den Werkstücken liegenden Grenzfläche erreicht werden kann.

Beim Verschweißen von transparenten Materialien miteinander kann es dabei aufgrund der in die

Prozesszone eingebrachten Energie und den damit einhergehenden hohen Temperaturen innerhalb des Materials zu Spannungen und/oder zu Rissen kommen, welche die Qualität der gefügten Materialien zumindest im Bereich der Schweißnaht reduzieren können.

Es ist daher bekannt, Laserschweißprozesse zum Fügen von transparenten Materialien iterativ zu optimieren, wobei unterschiedliche Bearbeitungsparameter wie beispielsweise die Pulsdauer und/oder die Pulsenergie des gepulsten Laserstrahls und/oder die relative Vorschubgeschwindigkeit zwischen Prozesszone beziehungsweise Bearbeitungsstrahl und den Werkstücken variiert werden können, um in einer nachfolgenden Qualitätskontrolle, beispielsweise mittels eines Mikroskops durch mikroskopische Untersuchungen an den Schweißnähten und den übrigen Bereichen der miteinander gefügten Werkstücke nach Abschluss des eigentlichen Schweißprozesses, das Qualitätsniveau zu ermitteln und dann die entsprechenden Prozessparameter durch deren Variation iterativ zu optimieren.

Der Bearbeitungsstrahl wird dabei durch entsprechende Optiken und eine damit einhergehende Strahlformung in das Material eines der Werkstücke, in beide Werkstücke und/oder in den Bereich einer Grenzfläche zwischen den beiden aneinander anliegenden Werkstücken fokussiert, wobei auch die Lage und Form des auf diese Weise ausgebildeten Fokus Teil des Optimierungsprozesses sein kann.

Eine Herausforderung bei der Optimierung ist es, durch den Laserstrahl induzierte Spannungen in den Fügepartnern zu reduzieren, welche eine stabile Verbindung der Fügepartner verhindern können.

Andere Laserbearbeitungsprozesse, die auf Wärmeakkumulation basieren wie z.B. die Modifikation von Werkstückoberflächen oder Volumina sowie Laser-Lift-Off Verfahren sehen sich auch mit dem Problem der durch den Laserstrahl induzierten Spannungen im Werkstück konfrontiert.

Darstellung der Erfindung

Ausgehend von dem Stand der Technik ist es eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens zum Bearbeiten mindestens eines Werkstücks anzugeben, wobei das Verfahren und die Vorrichtung die Qualität des bearbeiteten Werkstücks beziehungsweise der bearbeiteten Werkstücke weiter verbessern soll.

Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen ergeben sich aus den Unteransprüchen, der vorliegenden Beschreibung sowie den beigefügten Figuren.

Entsprechend wird ein Verfahren zum Bearbeiten mindestens eines Werkstücks vorgeschlagen, wobei das Werkstück mit einem Bearbeitungsstrahl, bevorzugt einem gepulsten Laserstrahl, besonders bevorzugt einem Ultrakurzpuls-Laserstrahl, beaufschlagt wird, wobei der Bearbeitungsstrahl zur Ausbildung einer Prozesszone hochdynamisch zwischen mindestens zwei unterschiedlichen räumlichen Bereichen bewegt wird.

Durch die hochdynamische Bewegung des Bearbeitungsstrahls in mindestens zwei räumliche Bereiche der Prozesszone ist es möglich, die Energie des Bearbeitungsstrahls über eine größere Fläche beziehungsweise ein größeres Volumen des Materials des Werkstücks zu verteilen, um auf diese Weise das Auftreten von starken Temperaturspannungen in dem Material des Werkstücks zu reduzieren beziehungsweise diese zu verteilen und eine effizientere Bearbeitung des Materials zu erreichen.

Der aus dem Stand der Technik bekannte rein lokale Eintrag von Wärmeenergie in einem einzigen Fokus in das Material des Werkstücks wird damit durch das vorgeschlagene Verfahren hochdynamisch auf ein größeres Volumen und/oder eine größere Oberfläche verteilt.

Unter Prozesszone wird vorliegend ein begrenztes Materialvolumen in dem Werkstück beziehungsweise ein mindestens zwei Werkstücke überlappendes begrenztes Materialvolumen verstanden, in welches mittels der Laserpulse des Bearbeitungsstrahls Energie eingetragen wird. In dem die Prozesszone ausbildenden Materialvolumen findet damit ein Energieeintrag statt, der zu einer Wärmeakkumulation und damit zu einer Materialänderung in dem Materialvolumen führt. Die räumlichen Bereiche, in welche der Bearbeitungsstrahl bewegt wird, sind bevorzugt so weit voneinander entfernt, dass eine Überlappung der jeweiligen Foki nicht stattfindet und daher der herkömmliche rein lokale Eintrag von Wärmeenergie vermieden wird. Gleichzeitig liegen die Foki aber dennoch so nah aneinander, dass der Energieeintrag durch den in die unterschiedlichen räumlichen Bereiche bewegten Bearbeitungsstrahl zu einer Energieakkumulation in der Prozesszone führt.

Mit anderen Worten sind die einzelnen räumlichen Bereiche zwar voneinander beabstandet, aber soweit miteinander gekoppelt, dass eine Wärmeakkumulation erreicht wird.

Beispielsweise kann das Materialvolumen in der Prozesszone durch den akkumulierten Wärmeeintrag aufschmelzen und nach dem erneuten Erstarren eine permanente Materialänderung in dem Werkstück oder in den Werkstücken hervorrufen.

Die Prozesszone kann entsprechend durch die Positionierung der räumlichen Bereiche, in welche

der Bearbeitungsstrahl bewegt wird, definiert werden. Durch eine Relativbewegung von Laseroptik und Werkstück und/oder durch eine aktive Beeinflussung der Laseroptik kann sich die Prozesszone relativ zum Werkstück durch diese bewegen. Dies kann zur Ausbildung einer sich räumlich erstreckenden Materialmodifikation, beispielsweise zur Ausbildung einer Schweißnaht, verwendet werden.

Mit dem vorgeschlagenen Verfahren können unter anderem Wärmediffusionseffekte in dem Material des Werkstücks beziehungsweise der Werkstücke besser berücksichtigt werden. Mit anderen Worten kann die mittels des Bearbeitungsstrahls in die Prozesszone eingebrachte Energie und damit die Temperaturerhöhung teilweise in umliegende Volumina des Werkstücks diffundieren während die Beaufschlagung des Werkstücks mit dem Bearbeitungsstrahl gerade in einem anderen der räumlichen Bereiche der Prozesszone stattfindet, so dass der bezüglich des eigentlichen durch den Bearbeitungsstrahl eingebrachten Fokus entstehende Temperaturgradient in dem Material des Werkstücks abgeschwächt wird und damit das Auftreten von Temperaturspannungen reduziert werden kann.

Das Absorptionsverhalten innerhalb der Prozesszone beziehungsweise des aufgeschmolzenen Materialvolumens in der Prozesszone hängt dabei von der Intensitätsverteilung und natürlich von der insgesamt eingetragenen, mittleren Laserenergie ab. Die initiale Absorption der Laserenergie durch das Material in der Prozesszone findet dabei zunächst jeweils im Fokus des in den jeweiligen räumlichen Bereich bewegten Bearbeitungsstrahls statt.

Dabei liegt dem Verfahren die Erkenntnis zu Grunde, dass bei der Laserbearbeitung transparenter Materialien, beispielsweise dem Verschweißen von Werkstücken aus Glas mittels der Bearbeitungsstrahlen, beispielsweise gepulster Laserstrahlen, durch die erreichbaren hohen Intensitäten im jeweiligen Strahlfokus nichtlineare Absorptionseffekte im transparenten Material erreicht werden können. Werden entsprechende Repetitionsraten für den gepulsten Bearbeitungsstrahl verwendet, akkumuliert sich die mittels der jeweiligen Pulse in die separaten räumlichen Bereiche der Prozesszone eingetragene Energie, sodass es durch entsprechende Wärmeakkumulationseffekte zu einem lokalen Aufschmelzen des Materials kommt. Dadurch entsteht in der Nähe des geometrischen Fokus des in den jeweiligen räumlichen Bereich bewegten Bearbeitungsstrahls ein absorbierendes Plasma zunächst in der Größe des jeweiligen Fokusvolumens.

An der Plasmaoberfläche, welche die Prozesszone begrenzt und insbesondere in dem Bereich der Plasmaoberfläche, welche in Richtung der jeweils auf das Plasma auftreffenden Bearbeitungsstrahls orientiert ist und auf welche der Bearbeitungsstrahl auftrifft, tritt jedoch eine

verstärkte Absorption auf. Damit kann das Plasmavolumen aufgrund der erhöhten Absorption des Bearbeitungsstrahls und dem sich dadurch ergebenden Energieeintrag in das Plasmavolumen an der Plasmaoberfläche weiter Energie absorbieren, so dass das Volumen des Plasmas weiter anwachsen kann, wobei sich dieses Anwachsen des Plasmavolumens hauptsächlich entlang des Bearbeitungsstrahls gerichtet und in Richtung auf die Strahlquelle zu erstreckt. Mit anderen Worten kann sich das Plasma in einer länglichen Form entlang des Bearbeitungsstrahls ausbreiten. Daraus kann eine langgezogene Blase, die durch das Plasma geformt ist, ausgebildet werden.

Auf diese Weise kann sich ein Absorptionsvolumen ausbilden, welches das ursprüngliche Fokusvolumen um ein Vielfaches übersteigen kann.

Die nichtlineare Absorption des Bearbeitungsstrahls an dem Plasma kann von der hohen Elektronentemperatur in dem Plasma herrühren. Die Elektronen können Energie an die Atomrümpfe abgeben, was zu Gitterschwingungen und einer zusätzlichen Erwärmung des Materials durch Wärmeakkumulation führen kann.

Bevorzugt kann der Bearbeitungsstrahl unterschiedliche räumliche Bereiche der Prozesszone beaufschlagen. Auf diese Weise kann eine möglichst breite Beaufschlagung der Prozesszone erreicht werden, so dass in den einzelnen Foki der Bearbeitungsstrahlen die in den Materialien auftretenden Temperaturen lokal reduziert sein können, aber in der Prozesszone dennoch die notwendige Temperatur zum Aufschmelzen des jeweiligen Materials erzeugt wird.

Bevorzugt kann der Bearbeitungsstrahl jeweils sequentiell und/oder zufällig und/oder chaotisch unterschiedliche räumliche Bereiche der Prozesszone beaufschlagen. Mit anderen Worten bewegen sich die Foki des Bearbeitungsstrahls jeweils derart durch die Prozesszone, dass unterschiedliche räumliche Bereiche der Prozesszone im Zeitablauf von einem oder auch mehreren Bearbeitungsstrahlen beaufschlagt werden. Damit kann auch das Eintragen von zu hohen Energien an einem einzigen Ort vermieden werden, so dass die Akkumulierung von Spannungen reduziert werden kann.

Bevorzugt kann ein von einer Strahlquelle ausgehender Bearbeitungsstrahl mittels eines akusto-optischen Deflektors bewegt und/oder in mindestens zwei separate Bearbeitungsteilstrahlen aufgeteilt werden. Durch die Verwendung eines akusto-optischen Deflektors kann die Aufteilung und Ablenkung des Bearbeitungsstrahls mit einer hohen Dynamik und einer beliebigen Sequenz vorgenommen werden, so dass der Eintrag von zu hohen Energien an einem einzigen Ort vermieden werden kann, so dass die Akkumulierung von Spannungen reduziert werden kann.

Besonders bevorzugt kann der akusto-optische Deflektor mit einer sequentiell und/oder zufällig und/oder chaotisch variierenden Schallwelle beaufschlagt werden. Damit kann entsprechend eine Beaufschlagung der unterschiedlichen räumlichen Bereiche in der Prozesszone so erreicht werden, dass der Eintrag von zu hohen Energien an einem einzigen Ort vermieden werden kann, so dass die Akkumulierung von Spannungen reduziert werden kann.

Besonders bevorzugt können zwei um 90° gegeneinander gedrehte akusto-optische Deflektoren vorgesehen sein, mittels welchen eine Ablenkung des Bearbeitungsstrahls in einer auf den Bearbeitungsstrahl senkrechten Ebene durchgeführt wird. Damit können die Bearbeitungsstrahlen räumlich sehr flexibel in die Prozesszone eingebracht werden.

Bevorzugt kann der Bearbeitungsstrahl jeweils mittels eines Strahlformers geformt werden, bevor er die unterschiedlichen räumlichen Bereiche beaufschlagt. Damit lässt sich eine vorteilhafte Strahlform erreichen, mittels derer die Akkumulation von Spannungen im Material der Werkstücke reduziert werden kann

Unter einer hochdynamischen Bewegung des Bearbeitungsstrahls wird hierin unter anderem eine solche verstanden, bei welcher der Bearbeitungsstrahl zwischen den jeweiligen räumlichen Bereichen der Prozesszone mit einer Frequenz von mindestens 100 kHz bewegt wird. Mit anderen Worten beaufschlagt der Bearbeitungsstrahl die unterschiedlichen räumlichen Bereiche der Prozesszone in der genannten Frequenz. Bevorzugt findet die Bewegung des Bearbeitungsstrahls mit einer Frequenz von 100 kHz bis zu 10 MHz statt.

Unter einer hochdynamischen Bewegung des Bearbeitungsstrahls wird hierin in einer alternativen Betrachtung unter anderem entsprechend eine solche verstanden, bei welcher die Bewegung von einem mit dem Bearbeitungsstrahl beaufschlagten räumlichen Bereich der Prozesszone zu einem anderen mit dem Bearbeitungsstrahl beaufschlagten räumlichen Bereich der Prozesszone höchstens 10µs dauert. Bevorzugt dauert die Bewegung des Bearbeitungsstrahls zwischen 10µs und 0,1µs von einem räumlichen Bereich zu einem anderen räumlichen Bereich der Prozesszone.

Besonders vorteilhaft wird unter einer hochdynamischen Bewegung des Bearbeitungsstrahls hierin in einer weiteren alternativen Betrachtung unter anderem eine solche verstanden, bei welcher es die Bewegung von einem mit dem Bearbeitungsstrahl beaufschlagten räumlichen Bereich der Prozesszone zu einem anderen mit dem Bearbeitungsstrahl beaufschlagten räumlichen Bereich der Prozesszone ermöglicht, dass zunächst mindestens ein Laserpuls, bevorzugt ein vorgegebener Pulszug und/oder alle Laserpulse eines Bursts, in einem Bereich der Prozesszone in das Material des Werkstücks eingebracht wird/werden, dann der Bearbeitungsstrahl hochdynamisch in den

nächsten räumlichen Bereich der Prozesszone bewegt wird und dann in diesem räumlichen Bereich der Prozesszone ein weiterer Laserpuls, bevorzugt ein vorgegebener weiterer Pulszug und/oder alle Laserpulse eines weiteren Bursts in das Material des Werkstücks eingebracht wird.

Mit anderen Worten können durch die hochdynamische Bewegung des Bearbeitungsstrahls jeweils
5 Laserpulse, bevorzugt die Laserpulse eines vorgegebenen Pulszugs und/oder alle Laserpulse von Bursts, nacheinander in die unterschiedlichen räumlichen Bereiche der Prozesszone definiert eingebracht werden.

Damit wird die Bewegung des Bearbeitungsstrahls bevorzugt entsprechend solange unterbrochen, bis der Laserpuls, bevorzugt der vorgegebene Pulszug und/oder die Laserpulse eines Bursts in den
10 räumlichen Bereich der Prozesszone eingebracht wurden und wird erst dann zu dem nächsten räumlichen Bereich der Prozesszone bewegt.

In dieser alternativen Betrachtung ist die hochdynamische Bewegung des Bearbeitungsstrahls bevorzugt synchronisiert mit der Bereitstellung der Laserpulse und/oder Pulszüge und/oder Bursts, so dass die hochdynamische Bewegung des Bearbeitungsstrahls nur in den Pausen zwischen den
15 Laserpulsen und/oder Pulszügen und/oder Bursts stattfindet.

Damit können entsprechend die bereits oben beschriebenen vorteilhaften Effekte erreicht werden, die zu einer Verbesserung der Qualität des bearbeiteten Werkstücks und/oder des Fügeprozesses zweier oder mehrerer Werkstücke miteinander führen.

Die Frequenz der Bewegung der hochdynamischen Bearbeitung kann auch höher liegen und
20 beispielsweise über 10 MHz liegen.

Die hochdynamische Bewegung des Bearbeitungsstrahls zwischen den unterschiedlichen räumlichen Bereichen zur Bearbeitung kann beispielsweise mittels eines akusto-optischen Deflektors (AOD), bevorzugt mittels zwei unter einem Winkel, bevorzugt senkrecht zueinander, und senkrecht zu der Strahlrichtung angeordnete AODs erreicht werden, so dass eine schnelle
25 Bewegung des Bearbeitungsstrahls erreicht werden kann. Durch die Verwendung zweier unter einem Winkel oder bevorzugt senkrecht zueinander angeordneter AODs kann eine Ablenkung in der senkrecht zu dem Bearbeitungsstrahl stehenden (zweidimensionalen) Ebene erreicht werden, so dass die hochdynamische Bewegung des Bearbeitungsstrahls über die Oberfläche oder durch das Volumen des Werkstücks beziehungsweise der Werkstücke stattfinden kann. Bei der
30 Verwendung nur eines AOD kann eine Bewegung entlang einer (eindimensionalen) Linie erreicht werden.

In einer alternativen Ausgestaltung kann mittels eines AODs eine Bewegung des Laserstrahls in einer Raumrichtung und mittels eines zweiten AODs eine Strahlformung oder Strahlteilung erreicht werden.

5 In einer weiteren alternativen Ausgestaltung kann mittels eines ersten AODs und eines zweiten AODs eine Strahlablenkung in zwei Raumrichtungen und ein oder zwei weiterer AODs eine Strahlteilung in einer beziehungsweise zwei Richtungen erreicht werden.

Die Bewegung des Bearbeitungsstrahls und/oder dessen Formung kann auch mittels eines SLM (spatial light modulator) oder einer diffraktiven Optik erreicht werden.

10 Mittels der hochdynamischen Bewegung des Bearbeitungsstrahls können die einzelnen räumlichen Bereiche in einer vorgegebenen Reihenfolge mit dem Bearbeitungsstrahl beaufschlagt werden. Mit anderen Worten kann ein vorgegebenes Muster an räumlichen Bereichen hochdynamisch mit dem Bearbeitungsstrahl abgefahren werden. Die räumlichen Bereiche können auch mit einem chaotischen oder zufälligen Muster hochdynamisch abgefahren werden.

15 Die einzelnen räumlichen Bereiche der Prozesszone können beispielsweise um 1 – 10 μm zueinander versetzt angeordnet sein. Mit anderen Worten kann nach jedem Laserpuls oder jedem Laserpulszug oder jedem Burst der Bearbeitungsstrahl innerhalb der Prozesszone um 1 – 10 μm zueinander versetzt werden, um dann eine Beaufschlagung mit dem nächsten Laserpuls oder dem nächsten Laserpulszug oder dem nächsten Burst durchzuführen.

20 Die Bearbeitung der Werkstücke kann beispielsweise in Form eines Fügens, insbesondere eines Verschweißens, der Werkstücke miteinander stattfinden. Dabei wird durch das Einbringen des Bearbeitungsstrahls in die Prozesszone ein Aufschmelzen des Materials des oder der Werkstücke erreicht und nach dem erneuten Erstarren des Materials entsprechend eine Schweißnaht ausgebildet.

25 Mittels des vorgeschlagenen Verfahrens können auch weitere Modifikationen auf der Oberfläche der in das Material des Werkstücks oder der Werkstücke eingebracht werden.

Bevorzugt wird ein Verfahren zum Verschweißen mindestens zweier Werkstücke vorgeschlagen, wobei mindestens eines der Werkstücke transparent für einen Bearbeitungsstrahl, bevorzugt für einen gepulsten Laserstrahl, besonders bevorzugt für einen Ultrakurzpuls-Laserstrahl, ist, wobei in den Werkstücken in einer mit dem Bearbeitungsstrahl beaufschlagten Prozesszone eine
30 Schweißnaht ausgebildet wird.

Dadurch, dass der Bearbeitungsstrahl jeweils unterschiedliche räumliche Bereiche der Prozesszone beaufschlagt ist es möglich, innerhalb der Prozesszone eine Verteilung der Intensität der eingebrachten Laserenergie so bereitzustellen, dass die durch den Bearbeitungsstrahl induzierten Spannungen im Material der Werkstücke reduziert oder zumindest soweit umverteilt werden können, dass eine Verbesserung der Qualität der gefügten Werkstücke erreicht werden kann und eine große Prozesszone sich bilden kann.

In der Prozesszone können auf diese Weise entsprechend mehrere Absorptionsbereiche mittels des Bearbeitungsstrahls adressiert werden, so dass eine gezieltere Initiierung beziehungsweise Führung der durch den Bearbeitungsstrahl induzierten Temperatur und damit der jeweils aufgeschmolzen Bereiche erreicht werden kann.

In den herkömmlichen Fügeverfahren wird eine Schweißnaht linear und durchgehend eingebracht, so dass sich entlang dieser durch laserinduzierte Schmelzbereiche eingebrachten Modifikation auch die temperaturinduzierten Spannungen in den Materialien der Fügepartner akkumulieren. Gemäß dem vorgeschlagenen Verfahren kann durch das Beaufschlagen unterschiedlicher räumlicher Bereiche der Prozesszone durch den in die unterschiedlichen räumlichen Bereiche bewegten Bearbeitungsstrahl das Akkumulieren der temperaturinduzierten Spannungen reduziert werden, da der Temperatureintrag nicht durchgehend stattfindet, sondern durch die Beaufschlagung der unterschiedlichen räumlichen Bereiche unterbrochen wird.

Mit anderen Worten wird die für das Aufschmelzen des Materials in der Prozesszone notwendige Temperatur nicht ausgehend von einem einzigen Fokus aus in das Material eingebracht, sondern an räumlich voneinander getrennten beziehungsweise zueinander beabstandeten räumlichen Bereichen innerhalb der Prozesszone, welche dennoch soweit thermisch miteinander gekoppelt sind, dass eine Wärmeakkumulation in dem Material stattfinden kann.

Damit können durch die hochdynamische Ablenkung des Bearbeitungstrahls, welcher jeweils unterschiedliche räumliche Bereiche der Prozesszone beaufschlagt und entsprechend zu räumlich voneinander separierten Absorptionsgebieten innerhalb der Prozesszone führt, welche sich aber dennoch thermisch beeinflussen, die in dem Material der Werkstücke auftretenden akkumulierten Spannungen reduziert werden beziehungsweise diese räumlich so verteilt werden, dass ihr Einfluss auf die Stabilität der Fügung reduziert ist. Damit kann das Auftreten von durch den Bearbeitungsstrahl induzierten Spannungen in den Fügepartnern reduziert werden und damit eine erhöhte Festigkeit der Fügung erreicht werden.

Weiterhin kann auch mit gegenüber den herkömmlichen Verfahren erhöhten Energien geschweißt

werden, da sich die Spannungen im Material nicht so sehr akkumulieren. Auf diese Weise kann auch der Durchsatz erhöht werden.

Mittels der Beaufschlagung jeweils unterschiedlicher räumlicher Bereiche der Prozesszone mittels des hochdynamischen Bearbeitungsstrahls kann entsprechend die laserinduzierte Wärme, welche
5 in das Material eingetragen wird, individuell und an die Materialien der Fügepartner sowie an die übrigen Prozessparameter wie beispielsweise die Geometrie der herzustellenden Schweißnaht angepasst werden.

Bevorzugt kann die von dem Bearbeitungsstrahl beaufschlagte Prozesszone und die Werkstücke zur Ausbildung der Schweißnaht relativ zueinander bewegt werden. Durch das Aufbringen einer
10 relativen Bewegung der Prozesszone bezüglich des Werkstücks während des Schweißprozesses ergibt sich nach dem Erstarren des vorher aufgeschmolzenen Materials entsprechend eine sich in der Bewegungsrichtung erstreckende Schweißnaht.

Bevorzugt wird der Bearbeitungsstrahl in mindestens zwei separate Bearbeitungsteilstrahlen aufgeteilt und mindestens zwei Bearbeitungsteilstrahlen beaufschlagen dann jeweils
15 unterschiedliche räumliche Bereiche der Prozesszone.

Die Bearbeitungsteilstrahlen können, wie oben zu dem (einzelnen) Bearbeitungsstrahl beschrieben, ebenfalls jeweils hochdynamisch in unterschiedliche räumliche Bereiche der Prozesszone bewegt werden.

Die Beaufschlagung der unterschiedlichen räumlichen Bereiche der Prozesszone kann dann
20 entsprechend hochdynamisch stattfinden.

Mit anderen Worten kann eine hochdynamische Bewegung der mindestens zwei Bearbeitungsteilstrahlen stattfinden, so dass jeweils mindestens zwei unterschiedliche räumliche Bereiche der Prozesszone gleichzeitig mit den Bearbeitungsteilstrahlen beaufschlagt werden und dann, beispielsweise nach dem Beaufschlagen der beiden räumlichen Bereiche mit einem
25 Laserpuls oder einem Laserpulszug oder einem Burst, die Bearbeitungsteilstrahlen hochdynamisch bewegt werden und entsprechend mindestens zwei weitere räumliche Bereiche der Prozesszone mit den Bearbeitungsteilstrahlen beaufschlagt werden.

Die oben genannte Aufgabe wird auch durch eine Vorrichtung mit den Merkmalen des unabhängigen Vorrichtungsanspruchs gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen ergeben sich aus den
30 sich darauf beziehenden Unteransprüchen, der vorliegenden Beschreibung sowie den beigefügten Figuren.

Entsprechend wird eine Vorrichtung zur Bearbeitung mindestens eines Werkstücks vorgeschlagen, wobei eine Strahlquelle zur Bereitstellung eines Bearbeitungsstrahls, bevorzugt eines gepulsten Laserstrahls, besonders bevorzugt eines Ultrakurzpuls-Laserstrahls, und ein optisches System zur Beaufschlagung mindestens eines Werkstücks mit dem Bearbeitungsstrahl vorgesehen sind, wobei
5 das optische System dazu ausgebildet und eingerichtet ist, den Bearbeitungsstrahl zur Ausbildung einer Prozesszone hochdynamisch zwischen mindestens zwei unterschiedlichen räumlichen Bereichen des mindestens einen Werkstücks zu bewegen.

Mittels der vorgeschlagenen Vorrichtung können die oben zum Verfahren genannten vorteilhaften Wirkungen erreicht werden.

10 Die oben bezüglich des Verfahrens beschriebenen Ausgestaltungen können auch in der Vorrichtung in ihrer jeweiligen vorrichtungsmäßigen Ausprägung mit aufgenommen werden, um die zum Verfahren beschriebenen Vorteile zu erreichen und um die Vorrichtung weiterzubilden.

Kurze Beschreibung der Figuren

Bevorzugte weitere Ausführungsformen der Erfindung werden durch die nachfolgende
15 Beschreibung der Figuren näher erläutert. Dabei zeigen:

Figur 1 eine schematische Darstellung eines Ausschnitts einer Vorrichtung zur Bearbeitung eines Werkstücks in einem ersten Ausführungsbeispiel;

Figur 2 eine schematische Darstellung der Beaufschlagung unterschiedlicher räumlicher Bereiche einer Prozesszone mittels Laserpulsen;

20 Figur 3 eine schematische Darstellung eines Ausschnitts einer Vorrichtung zur Durchführung eines Verfahrens zum Verschweißen von zwei Werkstücken in einem weiteren Ausführungsbeispiel; und

Figur 4 eine schematische Darstellung eines Ausschnitts einer Vorrichtung zur Durchführung eines Verfahrens zum Verschweißen von zwei Werkstücken in einem weiteren
25 Ausführungsbeispiel.

Detaillierte Beschreibung bevorzugter Ausführungsbeispiele

Im Folgenden werden bevorzugte Ausführungsbeispiele anhand der Figuren beschrieben. Dabei werden gleiche, ähnliche oder gleichwirkende Elemente in den unterschiedlichen Figuren mit

identischen Bezugszeichen versehen, und auf eine wiederholte Beschreibung dieser Elemente wird teilweise verzichtet, um Redundanzen zu vermeiden.

In Figur 1 ist schematisch ein Ausschnitt einer Vorrichtung 1 zur Bearbeitung eines Werkstücks, hier zur Bearbeitung zweier Werkstücke 110, 120, gezeigt. Die Vorrichtung 1 dient zur

5 Durchführung eines Verfahrens zur Bearbeitung der Werkstücke 110, 120, wobei die Bearbeitung beispielsweise eine Modifikation der Oberfläche des Werkstücks oder ein Lift-off Verfahren sein kann. Mittels des vorgeschlagenen Verfahrens können auch weitere Modifikationen in das Material des Werkstücks oder das Material der Werkstücke 110, 120 eingebracht werden.

Bevorzugt ist die Bearbeitung zum Verschweißen mindestens zweier Werkstücke 110, 120
10 vorgesehen.

Ein Bearbeitungsstrahl 2 wird von einer hier nicht gezeigten Strahlquelle bereit gestellt, wobei die Strahlquelle bevorzugt in Form eines gepulsten Lasers, bevorzugt eines ultrakurzgepulsten Lasers, bereitgestellt wird.

Die Parameter der Strahlquelle und der nachgelagerten Optik können dabei beispielsweise wie folgt
15 gewählt sein:

- Wellenlänge zwischen 200 nm und 5000 nm
- Repetitionsrate zwischen 100 Hz und 50 MHz (optional Bursts wobei die Repetitionsrate der Pulse im Burst zwischen 1 MHz und 50GHz liegen kann)
- Laserpulsdauer zwischen 10 fs und 50 ps
- 20 – Fokussierung so, dass Fluenz in den jeweiligen räumlichen Bereichen $>0.01 \text{ J/cm}^2$ (Modifikationsschwelle im Volumen typischerweise zwischen 1-5 J/cm²)
- Relativer Vorschub des/der Werkstücke zum Bearbeitungsstrahl zwischen 0.01 und 1000 mm/s

Der von der entsprechend nicht gezeigten Strahlquelle beispielsweise in Form des genannten
25 gepulsten Lasers ausgehende Bearbeitungsstrahl 2 wird in der Vorrichtung 1 zum Durchführen der Bearbeitung des Materials des Werkstücks 110 oder der Werkstücke 110, 120 in einem ersten optischen Element 30, welches in dem gezeigten Ausführungsbeispiel als Linse 30 symbolisiert ist, so aufbereitet, dass ein im Strahlengang nachfolgender akusto-optischer Deflektor 32 geeignet betrieben werden kann.

Das erste optische Element 30 kann entsprechend eine Strahlaufweitung, eine Kollimierung, eine Fokussierung, eine räumliche und/oder zeitliche Strahlformung etc. bereitstellen, welche dazu geeignet ist, den Bearbeitungsstrahl 2 so aufzubereiten, dass der akusto-optische Deflektor 32 geeignet betrieben werden kann.

5 Unter einem akusto-optischen Deflektor, welcher in dem in Figur 1 gezeigten Ausführungsbeispiel als ein aus zwei einzelnen akusto-optischen Deflektoren 320, 322 kombiniert zusammengesetzter akusto-optischer Deflektor 32 sehr schematisch gezeigt ist, wird vorliegend ein aktives optisches Element verstanden, in welchem durch das Einbringen von Schallwellen eine Ablenkung eines eintreffenden Bearbeitungsstrahls erreicht werden kann. Ein akusto-optischer Deflektor wird auch
10 als AOD bezeichnet.

Ein akusto-optischer Deflektor kann beispielsweise in Form eines transparenten Kristallquaders vorgesehen sein, beispielsweise in Form eines Quarzglases oder eines anderen Kristalls, in welchen mittels eines Akustokopplers, beispielsweise mittels eines Piezokristalls, Körperschall eingetragen wird. Durch die in dem durchsichtigen Quader durch den Körperschall ausgebildeten
15 Dichteschwankungen wird entsprechend ein optisches Gitter ausgebildet, an welchem eine Beugung des einfallenden Lichtes stattfindet.

Mit anderen Worten kann in dem akusto-optischen Deflektor 32 eine Beugung des Lichts an den im Kristall durch die Schallwellen erzeugten Dichteschwankungen ausgebildeten optischen Gitter stattfinden.

20 Damit ist die tatsächliche Ablenkung des einfallenden Lichts beziehungsweise die Beugung des einfallenden Lichtes des von der Strahlquelle ausgehenden Bearbeitungsstrahls abhängig von der Frequenz der in den akusto-optischen Deflektor 32 eingebrachten akustischen Schwingung beziehungsweise von der Wellenlänge der akustischen Welle und damit von der auf diese Weise ausgebildeten Gitterkonstanten der in dem Quader ausgebildeten Dichteschwankungen. Durch eine
25 Variation der eingebrachten Frequenz der eingebrachten akustischen Schwingung und damit der Gitterkonstanten kann entsprechend die tatsächliche Ablenkung des einfallenden Lichtstrahls des Bearbeitungsstrahls variiert werden.

Über die Amplitude der in den akusto-optischen Deflektor 32 eingebrachten akustischen Schwingung hingegen kann auch eine Intensitätsmodulation dahingehend erreicht werden, dass bei
30 einer stärkeren Amplitude die entsprechenden Dichteschwankungen stärker ausgeprägt sind und damit die Beugungsordnungen stärker ausgeprägt werden.

Mit anderen Worten kann in dem akusto-optischen Deflektor 32 über den Eintrag von Schallenergie sowohl eine variable Winkelablenkung des Lichtstrahls als auch eine Variation der Intensität der einzelnen Beugungsordnungen erreicht werden.

Gemäß dem Ausführungsbeispiel in Figur 1 ist der akusto-optische Deflektor 32 (beziehungsweise die Kombination der beiden akusto-optischen Deflektoren 320, 322) entsprechend nach dem ersten optischen Element 30 angeordnet. Der durch das erste optische Element 30 aufbereitete Bearbeitungsstrahl 2 wird damit von dem akusto-optischen Deflektor 32 beziehungsweise den beiden akusto-optischen Deflektoren 320, 322 entsprechend der jeweiligen Einstellungen und insbesondere der eingebrachten Frequenz und der eingebrachten Amplitude abgelenkt.

Ein durch eine erste Einstellung des akusto-optischen Deflektors 32 abgelenkter Bearbeitungsstrahl 2' und ein durch eine andere Einstellung des akusto-optischen Deflektors 32 abgelenkter Bearbeitungsstrahl 2'' sind in der Figur 1 schematisch für die jeweils erste Beugungsordnung gezeigt. Die in höheren Beugungsordnungen sind in der Figur aus Gründen der Vereinfachung nicht gezeigt.

Die beiden abgelenkten Bearbeitungsstrahlen 2', 2'' in der Figur 1 symbolisieren damit zwei der vielen durch den akusto-optischen Detektor 32 möglichen Ablenkungen, die jeweils nacheinander in einen räumlichen Bereich 220, 222 der Prozesszone 200 in das Material der Werkstücke 110, 120 eingebracht werden. Durch das Einbringen anderer Frequenzen in den oder die AODs 32 können natürlich auch andere Ablenkungen erreicht werden, so dass auch andere räumliche Bereiche der Prozesszone 200 mit dem dann abgelenkten Bearbeitungsstrahl beaufschlagt werden können.

Die Bewegung der abgelenkten Bearbeitungsstrahlen 2', 2'' so, dass sie in die unterschiedlichen räumlichen Bereiche 220, 230 der Prozesszone 200 eingebracht werden, kann hochdynamisch erfolgen. Dies lässt sich besonders gut mittels des akusto-optischen Deflektors 32 (beziehungsweise der beiden nacheinander geschalteten akusto-optischen Deflektoren 320, 322) erreichen, da durch diese Bauelemente ein Bewegen mit besonders hohen Frequenzen ermöglicht wird. Dabei muss unterschieden werden zwischen der (Anregungs-) Frequenz der akustischen Welle, die in dem akusto-optischen Deflektor 32 die Gitterbildung übernimmt, und der Frequenz Bewegung des Bearbeitungsstrahls. Die Frequenz der Bewegung des Bearbeitungsstrahls entspricht einer Frequenz der Änderung der Anregungsfrequenz, also einer Frequenz des Umschaltens von einer Anregungsfrequenz zu einer nachfolgenden Anregungsfrequenz.

Unter einer hochdynamischen Bewegung des Bearbeitungsstrahls, beispielsweise mittels eines oder mehrerer AODs 32, 320, 322 wird unter anderem eine solche verstanden, bei welcher der

abgelenkte Bearbeitungsstrahl zwischen den jeweiligen räumlichen Bereichen der Prozesszone mit einer Frequenz von mindestens 100 kHz bewegt wird (entsprechend ändert sich die Anregungsfrequenz eines AODs mit dieser Frequenz). Bevorzugt findet die Bewegung des abgelenkten Bearbeitungsstrahls mit einer Frequenz von 100 kHz bis zu 10 MHz statt. Über eine entsprechende Ansteuerung des oder der AODs 32, 320, 322 mit den genannten Frequenzen kann damit eine Bewegung des abgelenkten Bearbeitungsstrahls erreicht werden.

Die Bewegung von einem mit dem abgelenkten Bearbeitungsstrahl 2' beaufschlagten räumlichen Bereich 220 der Prozesszone 200 zu einem anderen mit dem abgelenkten Bearbeitungsstrahl 2'' beaufschlagten räumlichen Bereich 230 der Prozesszone 200 dauert bevorzugt höchstens 10µs. Mit anderen Worten dauert die Änderung der Anregungsfrequenz des AODs 32 höchstens 10µs. Besonders bevorzugt dauert die Bewegung des abgelenkten Bearbeitungsstrahls 2', 2'' zwischen 10µs und 0,1µs von einem räumlichen Bereich 220 zu einem anderen räumlichen Bereich 230 der Prozesszone 200.

Der in der Figur 1 gezeigte akusto-optischen Deflektor 32 ist entsprechend zweiteilig aufgebaut und es sind zwei im Strahlengang nacheinander angeordnete akusto-optische Deflektoren 320, 322 vorgesehen, die in dem gezeigten Ausführungsbeispiel um 90° zueinander gedreht sind, um auf diese Weise eine Ablenkung des Bearbeitungsstrahls 2 in der senkrecht zu dem Bearbeitungsstrahl 2 liegenden Ebene (also einer X/Y-Ebene) zu erreichen. Natürlich können die beiden akusto-optischen Deflektoren 32 auch um einen anderen Winkel zueinander ausgerichtet sein – allerdings ermöglicht die Ausrichtung um 90° eine einfachere Ansteuerung, wobei die Auslenkung dann entsprechend der gewünschten X/Y Auslenkung stattfinden kann.

Die mittels des aus den einzelnen AODs 320, 322 zusammengesetzten akusto-optischen Deflektors 32 abgelenkten Bearbeitungsstrahlen 2', 2'' werden mittels eines zweiten optischen Elementes 34, welches in der gezeigten Ausführungsform ebenfalls schematisch in Form einer Linse gezeigt ist, für die weitere Verarbeitung aufbereitet. Beispielsweise können die Bearbeitungsstrahlen 2', 2'' mittels des zweiten optischen Elements 34 für eine Propagation ins Fernfeld kollimiert werden.

Das zweite optische Element 34 kann entsprechend beispielsweise eine Kollimierung der von dem akusto-optischen Deflektor 32 ausgehenden Bearbeitungsstrahlen 2', 2'' erreichen.

Bevorzugt ist in einer solchen Anordnung zweier akusto-optischer Deflektoren eine Halbwellenplatte zwischen den beiden akusto-optischen Deflektoren vorgesehen.

Da in dem akusto-optischen Deflektor 32 keine vollständige Auskopplung des eintreffenden Bearbeitungsstrahls 2 ausschließlich in die durch den jeweiligen Beugungswinkel der ersten Beugungsordnung separierten Bearbeitungsstrahl 2', 2'', sondern auch in der nullten Beugungsordnung, also kollinear zu dem von der Strahlquelle eintreffenden Bearbeitungsstrahl 2, ebenfalls noch eine Strahlintensität vorliegt, ist zur Eliminierung der nullten Beugungsordnung, eine Blende 36 vorgesehen. Die Blende 36 kann auch dazu dienen, Strahlen in höheren Beugungsordnungen zu eliminieren, um eine saubere Auskopplung nur der ersten Beugungsordnung zu erreichen.

Mit anderen Worten ist durch die Blende 36 ein Strahlreinigungselement in den Strahlengang eingebracht, mittels dessen unerwünschte Anteile aus dem Strahl entfernt werden können.

Mittels eines im Strahlengang nach dem zweiten optischen Element 34 und der Blende 36 angeordneten dritten optischen Elements 38, welches in der Figur 1 ebenfalls in Form einer Linse dargestellt ist, werden dann die eine Beabstandung von der nullten Beugungsordnung aufweisenden, also einen Ortsversatz aufweisenden Bearbeitungsstrahlen 2', 2'' erneut fokussiert. Mit anderen Worten wird durch das dritte optische Element 38 eine Fokussierung der mit einem Ortsversatz versehenen Bearbeitungsstrahlen 2', 2'' in das Material des Werkstücks 110, 120 beziehungsweise in die in den Werkstücken 110, 120 liegende Prozesszone 200 erreicht.

Durch die Anwendung des akusto-optischen Deflektors 32 kann entsprechend ein sehr schnelles Bewegen des Bearbeitungsstrahls 2', 2'' erreicht werden, wobei der Bearbeitungsstrahl 2', 2'' dann entsprechend in unterschiedliche räumliche Bereiche 220, 230 der Prozesszone 200 eingebracht werden kann.

In Figur 2 wird in einem sehr schematischen Diagramm die Beaufschlagung unterschiedlicher räumlicher Bereiche 220, 230 der Prozesszone 200 mit Laserpulsen 250 gezeigt. Dabei sind die Laserpulse 250 in dem Diagramm sehr schematisch zusammengefasst zu voneinander getrennten Bursts 252. Die Bursts 252 dauern jeweils eine Zeitdauer TB.

In der Figur 2 wird jeweils ein Burst 252 in einen anderen räumlichen Bereich 220, 230, 240 der Prozesszone 200 eingebracht. Die einzelnen Bursts 252 werden zeitlich nacheinander in die unterschiedlichen räumlichen Bereiche 220, 230, 240 eingebracht.

In den Pausen TP zwischen den Bursts 252 wird der Bearbeitungsstrahl durch eine entsprechende Ansteuerung eines AOD 32 so umgelenkt, dass aufeinanderfolgende Bursts 252 in unterschiedlichen räumlichen Bereichen 220, 230, 240 in das Werkstück eingebracht werden.

Bevorzugt sind die Bursts 252 des Bearbeitungsstrahls 2 und die Ansteuerung der AODs so miteinander synchronisiert, dass eine Änderung der Anregungsfrequenz der AODs in den jeweiligen Pulspausen TP zwischen den Bursts 252 stattfindet. Entsprechend wird zunächst die neue Anregungsfrequenz für die AODs eingestellt und dann erst wieder ein Laserpuls oder ein Burst oder ein Pulszug durch die AODs geschickt.

Mit anderen Worten können durch die hochdynamische Bewegung des Bearbeitungsstrahls jeweils Laserpulse, bevorzugt die Laserpulse eines vorgegebenen Pulszugs und/oder alle Laserpulse von Bursts, nacheinander in die unterschiedlichen räumlichen Bereiche 220, 230, 240 der Prozesszone 200 definiert eingebracht werden.

Damit wird die Bewegung des Bearbeitungsstrahls bevorzugt entsprechend solange unterbrochen, bis der Laserpuls, bevorzugt der vorgegebene Pulszug und/oder die Laserpulse eines Bursts in den räumlichen Bereich 220 der sich bildenden Prozesszone 200 eingebracht wurden und wird erst dann zu dem nächsten räumlichen Bereich 230 der Prozesszone 200 bewegt.

In Figur 3 ist schematisch ein Ausschnitt einer Vorrichtung 1 zur Durchführung eines Verfahrens zum Verschweißen zweier ebenfalls schematisch gezeigter Werkstücke 110, 120 mittels eines Bearbeitungsstrahls 2 gezeigt.

Bei den Werkstücken 110, 120 kann es sich um transparente Werkstücke handeln, wobei zumindest das in Strahlrichtung oben liegende Werkstück 110 transparent für den Bearbeitungsstrahl sein muss, wenn an einer Grenzfläche 100 zwischen dem oberen Werkstück 110 und dem unteren Werkstück 120 eine Verschweißung durchgeführt werden soll.

Die eigentliche Verschweißung ist hier schematisch in Form einer Schweißnaht 210 gezeigt, welche in dem gezeigten Ausführungsbeispiel eine im Wesentlichen lineare und durchgängige Erstreckung aufweist. Es sind aber auch anders geformte Schweißnähte zum Fügen der Werkstücke 110, 120 denkbar, beispielsweise in einer gebogenen oder geschwungenen Form oder durch die Ausbildung von einzelnen Segmenten oder Schweißpunkten.

Hierin wird unter einem transparenten Werkstück ein solches verstanden, welches für den Bearbeitungsstrahl 2 transparent ist. Mit anderen Worten kann der Bearbeitungsstrahl 2 ohne signifikante Abschwächung oder Streuung durch ein transparentes Werkstück hindurchtreten.

Die Lage einer zwischen den Werkstücken 110, 120 mittels des Bearbeitungsstrahls 2 erzeugten Schweißnaht 210 sowie die Struktur der Vorrichtung 1 oder 3 zur Durchführung des Verfahrens zum Verschweißen der Werkstücke 220, 230 wird in Bezug auf die Figur 4 noch einmal detailliert

gezeigt.

In Figur 3 ist schematisch ein Bearbeitungsstrahl 2 gezeigt, welcher von einer in der Figur nicht gezeigten Strahlquelle ausgeht und welcher in Form eines gepulsten Laserstrahls vorgesehen sein kann. Besonders bevorzugt kann ein Ultrakurzpulslaser zur Bereitstellung des Bearbeitungsstrahls 2 verwendet werden.

Beispielsweise kann hierfür ein gepulster Laserstrahl mit Wellenlängen von 1030nm oder 1064nm oder 515nm oder 532nm mit Pulsen im Femtosekundenbereich oder Pikosekundenbereich und mit Frequenzen der Repetitionsrate von 100kHz bis zu mehreren MHz verwendet werden. Der Laser zur Erzeugung des gepulsten Laserstrahls kann auch im Burstmodus betrieben werden.

Der von der hier nicht gezeigten Strahlquelle beispielsweise in Form des genannten Lasers ausgehende Bearbeitungsstrahl 2 wird in der Vorrichtung 1 zum Durchführen der Verschweißung in einem ersten optischen Element 30, welches in dem gezeigten Ausführungsbeispiel als Linse 30 symbolisiert ist, so aufbereitet, dass ein im Strahlengang nachfolgender akusto-optischer Deflektor 32 geeignet betrieben werden kann. Das erste optische Element 30 kann entsprechend eine Strahlaufweitung, eine Kollimierung, eine Fokussierung, eine Strahlformung im Zeitbereich etc. bereitstellen, welche dazu geeignet ist, den Bearbeitungsstrahl 2 so aufzubereiten, dass der akusto-optische Deflektor 32 geeignet betrieben werden kann.

Unter einem akusto-optischen Deflektor, welcher in dem Ausführungsbeispiel beim Bezugszeichen 32 sehr schematisch gezeigt ist, wird vorliegend ein aktives optisches Element verstanden, in welchem durch das Einbringen von Schallwellen eine Ablenkung eines eintreffenden Bearbeitungsstrahls erreicht werden kann. Ein akusto-optischer Deflektor wird auch als AOD bezeichnet.

Ein akusto-optischer Deflektor kann beispielsweise in Form eines transparenten Kristallquaders vorgesehen sein, beispielsweise in Form eines Quarzglases oder eines anderen Kristalls, in welchen mittels eines Akustokopplers, beispielsweise mittels eines Piezokristalls, Körperschall eingetragen wird. Durch die in dem durchsichtigen Quader durch den Körperschall ausgebildeten Dichteschwankungen wird entsprechend ein optisches Gitter ausgebildet, an welchem eine Beugung des einfallenden Lichtes stattfindet.

Mit anderen Worten kann in dem akusto-optischen Deflektor 32 eine Beugung des Lichts an den im Kristall durch die Schallwellen erzeugten Dichteschwankungen ausgebildetem optischen Gitter stattfinden.

Damit ist die tatsächliche Ablenkung des einfallenden Lichts beziehungsweise die Beugung des einfallenden Lichtes des von der Strahlquelle ausgehenden Bearbeitungsstrahls abhängig von der Frequenz der in den akusto-optischen Deflektor 32 eingebrachten akustischen Schwingung beziehungsweise von der Wellenlänge der akustischen Welle und damit von der auf diese Weise ausgebildeten Gitterkonstanten der in dem Quader ausgebildeten Dichteschwankungen. Durch eine Variation der eingebrachten Frequenz der eingebrachten akustischen Schwingung und damit der Gitterkonstanten kann entsprechend die tatsächliche Ablenkung des einfallenden Lichtstrahls des Bearbeitungsstrahls variiert werden.

Über die Amplitude der in den akusto-optischen Deflektor 32 eingebrachten akustischen Schwingung hingegen kann auch eine Intensitätsmodulation dahingehend erreicht werden, dass bei einer stärkeren Amplitude die entsprechenden Dichteschwankungen stärker ausgeprägt sind und damit die Beugungsordnungen stärker ausgeprägt werden.

Mit anderen Worten kann in dem akusto-optischen Deflektor 32 über den Eintrag von Schallenergie sowohl eine variable Winkelablenkung des Lichtstrahls als auch eine Variation der Intensität der einzelnen Beugungsordnungen erreicht werden.

Gemäß dem Ausführungsbeispiel in Figur 3 ist der akusto-optische Deflektor 32 entsprechend nach dem ersten optischen Element 30 angeordnet. Der durch das erste optische Element 30 aufbereitete Bearbeitungsstrahl 2 wird damit vom akusto-optischen Deflektor 32 in Bearbeitungsteilstrahlen, die in der Figur 3 schematisch in Form der Bearbeitungsteilstrahlen 20, 22 der ersten Beugungsordnung gezeigt sind, aufgeteilt und abgelenkt. Die in höheren Beugungsordnungen sind nicht gezeigt.

Die mittels des akusto-optischen Deflektors 32 abgelenkten Bearbeitungsteilstrahlen 20, 22 werden mittels eines zweiten optischen Elementes 34, welches in der gezeigten Ausführungsform ebenfalls schematisch in Form einer Linse gezeigt ist, für die weitere Verarbeitung aufbereitet. Beispielsweise können die Bearbeitungsteilstrahlen 20, 22 mittels des zweiten optischen Elements 34 für eine Propagation ins Fernfeld kollimiert werden.

Das zweite optische Element 34 kann entsprechend beispielsweise eine Kollimierung der von dem akusto-optischen Deflektor 32 ausgehenden Bearbeitungsteilstrahlen 20, 22 erreichen.

Anstelle des in der Figur 3 gezeigten einen akusto-optischen Deflektors 32 können auch zwei im Strahlengang nacheinander angeordnete akusto-optische Deflektoren vorgesehen sein, die beispielsweise um 90° zueinander gedreht sind, um auf diese Weise eine Ablenkung in der

senkrecht zu dem Bearbeitungsstrahl 2 liegenden Ebene zu erreichen. Natürlich können die beiden akusto-optischen Deflektoren 32 auch um einen anderen Winkel zueinander ausgerichtet sein – allerdings ermöglicht die Ausrichtung um 90° eine einfachere Ansteuerung.

Bevorzugt ist in einer solchen Anordnung zweier akusto-optischer Deflektoren eine Halbwellenplatte zwischen den beiden akusto-optischen Deflektoren vorgesehen.

Da in dem akusto-optischen Deflektor 32 keine vollständige Auskopplung des eintreffenden Bearbeitungsstrahls 2 ausschließlich in die durch den jeweiligen Beugungswinkel der ersten Beugungsordnung separierten Teilstrahlen 20, 22 erfolgt, sondern auch in der nullten Beugungsordnung, also kollinear zu dem von der Strahlquelle eintreffenden Bearbeitungsstrahl 2, ebenfalls noch eine Strahlintensität vorliegt, ist zur Eliminierung der nullten Beugungsordnung, eine Blende 36 vorgesehen. Die Blende 36 kann auch dazu dienen, Teilstrahlen in höheren Beugungsordnungen zu eliminieren, um eine saubere Auskopplung nur der ersten Beugungsordnung zu erreichen.

Mittels eines im Strahlengang nach dem zweiten optischen Element 34 und der Blende 36 angeordneten dritten optischen Elements 38, welches in der Figur 3 ebenfalls in Form einer Linse dargestellt ist, werden dann die eine Beabstandung von der nullten Beugungsordnung aufweisenden, also einen Ortsversatz aufweisenden Bearbeitungsteilstrahlen 20, 22 erneut fokussiert. Mit anderen Worten wird durch das dritte optische Element 38 eine Fokussierung der mit einem Ortsversatz versehenen Bearbeitungsteilstrahlen 20, 22 erreicht.

Die Bearbeitungsteilstrahlen 20, 22 werden auf einen Strahlformer 40 fokussiert, welcher beispielsweise in Form eines phasensensitiven Elementes, beispielsweise eines Spatial Light Modulators (SLM) der auch als räumlicher Modulator für Licht bezeichnet wird, vorgesehen ist. Über einen solchen SLM kann die räumliche Struktur kurzer Laserpulse geformt werden. Insbesondere können damit Laserpulse in Besselform oder in Form mehrerer Gauß-Spots geformt werden.

Der Strahlformer 40 kann auch ein anderes aktives optisches Element sein, um den Bearbeitungsstrahl zu formen.

Mittels des Strahlformers 40 können die Bearbeitungsteilstrahlen 20, 22 in ihrer Strahlstruktur so geformt werden, dass sie beispielsweise eine vorgegebene räumliche Struktur aufweisen. Mittels des Strahlformers 40 können auch die Muster oder Strukturen für die Beaufschlagung der unterschiedlichen räumlichen Bereiche der Prozesszone mit dem Bearbeitungsstrahl 2 oder den Bearbeitungsteilstrahlen 20, 22 vorgegeben werden.

Mittels des Strahlformers 40 können die Bearbeitungsteilstrahlen 20, 22 auch in weitere, in dem schematischen Ausführungsbeispiels nicht gezeigte, Bearbeitungsteilstrahlen aufgeteilt werden oder es können aus jedem der Bearbeitungsteilstrahlen 20, 22 vorgegebene Muster oder Patterns erzeugt werden.

5 Nach dem Strahlformer 40 treten die durch den Strahlformer 40 entsprechend geformten Bearbeitungsteilstrahlen dann durch einen weiteres optisches Element 42 hindurch, das in dem in Figur 3 gezeigten Ausführungsbeispiel wiederum in Form einer Linse gezeigt ist. Mittels des weiteren optischen Elements 42 findet eine Fokussierung jedes der einzelnen der Bearbeitungsteilstrahlen, welche entweder nur durch den akusto-optischen Deflektor 32 oder auch
10 zusätzlich durch den Strahlformer 40 aufgeteilt wurden, in die sich bildende Prozesszone 200 statt.

Die einzelnen optischen Elemente 30 bis 38, 40 und 42 können in einem gemeinsamen optischen System 400 organisiert sein. Bis auf den akusto-optischen Deflektor 32 sind alle weiteren optischen Elemente optional.

Die sich bildende Prozesszone 200 liegt zumindest teilweise in einem oder in beiden der
15 Werkstücke 110, 120. Durch die Fokussierung der einen Ortsversatz aufweisenden Bearbeitungsteilstrahlen 20, 22 in die sich Prozesszone 200 mittels des weiteren optischen Elements 42 findet entsprechend auch eine Fokussierung der Bearbeitungsteilstrahlen 20, 22 in unterschiedliche räumliche Bereiche 220, 230 der sich Prozesszone 200 statt. Mit anderen Worten wird der eine der Bearbeitungsteilstrahlen 20 in einen ersten räumlichen Bereich 220 der
20 Prozesszone 200 fokussiert, wohingegen ein anderer der Bearbeitungsteilstrahlen 22 in einen zweiten räumlichen Bereich 230 der Prozesszone 200 fokussiert wird.

Der von dem ersten Bearbeitungsteilstrahl 20 beaufschlagte räumliche Bereich 220 ist dabei beabstandet von dem von dem zweiten Bearbeitungsteilstrahl 22 beaufschlagten räumlichen Bereich 230, da die Bearbeitungsteilstrahlen 20, 22 ebenfalls einen Ortsversatz zueinander
25 aufweisen. Die beiden von den Bearbeitungsteilstrahlen 20, 22 beaufschlagten Bereiche 220, 230 sind aber bevorzugt nur so weit voneinander beabstandet, dass eine thermische Kopplung der beiden Bereiche 220, 230 vorliegt. Damit kann erreicht werden, dass das in der Prozesszone 200 vorliegende Material eines oder beider der Werkstücke 110, 120 durch den Eintrag der Laserenergie durch die Bearbeitungsteilstrahlen 20, 22 trotz der räumlichen Beabstandung der
30 beiden Bereiche 220, 230 aufgeschmolzen wird.

Die Vorrichtung 3 umfasst entsprechend das optische System 400, durch welches hindurch der gepulste Bearbeitungsstrahl 2 dann in Form der Bearbeitungsteilstrahlen 20, 22 auf die Werkstücke

110,120 auftritt. Die Bearbeitungsteilstrahlen 20, 22 werden in die räumlichen Bereiche 220, 230 in einer in einem oder beiden Werkstücken 110, 120 liegenden Prozesszone 200 fokussiert, wodurch die Intensität der Bearbeitungsteilstrahlen 20, 22 in den in der Prozesszone 200 liegenden Foki jeweils am höchsten ist, in den jeweils umgebenden Bereichen hingegen niedriger. Die

5 Materialbearbeitung in der Prozesszone 200 findet dadurch statt, dass es aufgrund der hohen Intensität der Bearbeitungsteilstrahlen 20, 22 ihren jeweiligen Foki zu einem Aufschmelzen des in der Prozesszone 200 vorliegenden Materials kommt. Dadurch kann beim nachfolgenden Abkühlen beispielsweise ein Verschweißen zweier vorher in der Prozesszone 200 getrennt vorliegender und nun durch das Aufschmelzen stoffschlüssig miteinander verbundener Materialbereiche erreicht
10 werden.

Bei der Verwendung eines gepulsten Bearbeitungsstrahls 2, insbesondere bei der Verwendung eines Ultrakurzpulslasers, werden durch die sehr hohen erreichbaren Intensitäten in den durch das optische System 400 bereitgestellten Foki im Glasmaterial des mindestens einen Werkstücks 110, 120 nichtlineare Absorptionseffekte erreicht. Beim Verwenden geeigneter Repetitionsraten des
15 gepulsten Bearbeitungsstrahls 2 kommt es zu Wärmeakkumulationseffekten im Glasmaterial, wodurch es zu einem lokalen Aufschmelzen des Glasmaterials in der Prozesszone 200 kommt.

Dabei liegt dem Verfahren die Erkenntnis zu Grunde, dass beim Verschweißen von Werkstücken 110, 120 aus Glas mittels eines gepulsten Bearbeitungsstrahls 2, beispielsweise eines gepulsten Laserstrahls, bevorzugt eines Ultrakurzpulslasers, durch die erreichbaren hohen Intensitäten im
20 jeweiligen Strahlfokus nichtlineare Absorptionseffekte im Glas erreicht werden können. Werden entsprechende Repetitionsraten für den gepulsten Bearbeitungsstrahl verwendet, akkumuliert sich die mittels der jeweiligen Pulse in die Prozesszone 200 eingetragene Energie, sodass es durch entsprechende Wärmeakkumulationseffekte zu einem lokalen Aufschmelzen des Glasmaterials kommt. Dadurch entsteht in der Nähe des jeweiligen geometrischen Fokus der gepulsten
25 Bearbeitungsteilstrahlen 20, 22 ein hochabsorbierendes Plasma zunächst in der Größe des Fokusvolumens.

Um ein Verbinden der Werkstücke 110 und 120 zu erreichen, wird die sich bildende Prozesszone 200 entsprechend so in die Werkstücke 110, 120 gelegt, dass sie nahe der Grenzfläche 100 angeordnet ist oder die Grenzfläche 100 umfasst. Dazu werden mittels des entsprechend
30 ausgebildeten und eingerichteten optischen Systems 400 die Bearbeitungsteilstrahlen 20, 22 entsprechend aufbereitet und in die sich bildende Prozesszone 200 hinein fokussiert.

In der Prozesszone 200 findet dann das Aufschmelzen des Materials eines, mehrerer oder aller Werkstücke 110, 120 statt, um dann nach dem erneuten Erstarren des vormals aufgeschmolzenen

Materials eine Verschweißung der Werkstücke 110, 120 durch das aufgeschmolzene und dann erstarrte Material zu erreichen.

Die Positionierung der einzelnen räumlichen Bereiche 220, 230 in der Prozesszone 200 kann dadurch variiert werden, dass unterschiedliche Ablenkungen der Bearbeitungsteilstrahlen 20, 22 in dem akusto-optischen Deflektor 32 dadurch erreicht werden, dass in den akusto-optischen Deflektor 32 variierte Schallwellen eingekoppelt werden. Dabei können sowohl die Frequenzen als auch die Intensitäten der in den akusto-optischen Deflektor 32 eingekoppelten Schallwellen variiert werden.

Durch eine entsprechende Abfolge von in den akusto-optischen Deflektor 32 eingekoppelten Frequenzen kann dann eine entsprechende Abfolge von Ablenkungen der Bearbeitungsteilstrahlen 20, 22 erreicht werden, welche wiederum in einer Abfolge unterschiedlicher Ortsversätze der Bearbeitungsteilstrahlen, welche wiederum in einer Abfolge der Beaufschlagung unterschiedlicher räumlicher Bereiche 220, 230 der Prozesszone 200 resultiert.

Damit kann über die Steuerung der in den akusto-optischen Deflektor 32 eingekoppelten Schallwellen erreicht werden, dass die Prozesszone 200 in einer Abfolge von unterschiedlichen voneinander beabstandeten Bereichen 220, 230 mit den Bearbeitungsteilstrahlen 20, 22 beaufschlagt wird.

Mit anderen Worten kann das Volumen der Prozesszone 200 mittels des akusto-optischen Deflektors 32 abgescannt werden.

Die Abfolge der in den akusto-optischen Deflektor 32 eingekoppelten unterschiedlichen Frequenzen kann aus einer festgelegten Sequenz bestehen und/oder in vorgegebenen Grenzen chaotisch und/oder zufällig ausgebildet sein.

Mit anderen Worten fungiert der akusto-optische Deflektor 32 in dem gezeigten Ausführungsbeispiel wie ein Scanner, mittels dessen eine Aufteilung des ursprünglich von der Strahlquelle ausgehenden Bearbeitungsstrahls 2 in zwei Bearbeitungsteilstrahlen 20, 22 ermöglicht wird, welche über die nachfolgende Optik entsprechend in ihrer Strahlform aufbereitet werden und dann in mittels des akusto-optischen Deflektors 32 bestimmten räumlichen Bereichen 220, 230 der Prozesszone 200 auftreffen. Durch eine Variation der Ablenkung der Teilstrahlen 20, 22 in dem akusto-optischen Deflektor 32 kann auch die Position der räumlichen Bereiche 220, 230 in der Prozesszone 200 variiert werden.

Durch eine entsprechende Ausbildung des akusto-optischen Deflektors 32 und der nachfolgenden

Optik, insbesondere der Form der Blende 36 und der Ausprägung des Strahlformers 40 kann weiterhin erreicht werden, dass mittels des akusto-optischen Deflektors 32 die unterschiedlichen räumlichen Bereiche 220, 230 der Prozesszone 200 nacheinander oder sequenziell oder gleichzeitig angesprochen werden.

- 5 Die hohe Dynamik des akusto-optischen Deflektors 32 ermöglicht weiterhin ein schnelles Schalten der jeweiligen Ablenkung der Teilstrahlen 20, 22 derart, dass die räumlichen Bereiche 220, 230 der Prozesszone 200 schnell verschoben werden können beziehungsweise nacheinander unterschiedliche Muster beziehungsweise Patterns abgefahren werden können.

- 10 Dabei kann eine sequentiell oder chaotisch oder zufällig oder in anderer Art und Weise gestaltete Steuerung des akusto-optischen Deflektors 32 dazu führen, dass zwar hinreichend viel Energie in die sich bildende Prozesszone 200 eingetragen wird, um die für das Aufschmelzen des oder der Werkstücke 110, 120 notwendigen Temperaturen zu erreichen, welche zu einem Aufschmelzen des Materials beispielsweise an einer Grenzfläche zwischen den Werkstücken 110, 120 führt. Gleichzeitig wird aber das durchgehende und unterbrechungsfreie Auftreten von hohen lokalen
15 Temperaturen über einen zu langen Zeitraum hinweg vermeiden, so dass der Eintrag von temperaturinduzierten Spannungen in die Werkstücke 110, 120 und insbesondere in an die Prozesszone 200 oder an den Schmelzbereich angrenzenden Bereiche der Werkstücke 110, 120 reduziert wird.

- Die auf die Werkstücke 110, 120 auftreffenden Bearbeitungsteilstrahlen 20, 22 sind in der
20 Verschiebungsrichtung X relativ zu den Werkstücken 110, 120 verschiebbar, um in den Werkstücken 110, 120 eine linear oder gebogen geformte Schweißnaht 210 einzuziehen. Dabei können zur Ausbildung der Verschiebung entweder die Werkstücke 110, 120 oder die Bearbeitungsteilstrahlen 20, 22 oder auch beide gegenläufig entlang der Verschiebungsrichtung X verschoben werden. Es können auch andere Bewegungen parallel zu der durch die Grenzfläche
25 100 ausgebildeten Ebene durchgeführt werden, um entsprechend komplexere Formen von Schweißnähten 210 einzuziehen. Durch die Bewegung der Bearbeitungsteilstrahlen 20, 22 relativ zu den Werkstücken 110, 120 kann die Ausdehnung der Schweißnaht 210 in der Bewegungsrichtung X bestimmt werden.

- Da die mit dem akusto-optischen Deflektor 32 erreichbaren Scangeschwindigkeiten sehr hoch sind,
30 kann durch ein gezieltes Eintragen der Laserenergie und entsprechend ein gezieltes Eintragen der jeweiligen Laserpulse sowohl die notwendige Energie in das Material eingetragen werden, welche ein zuverlässiges Schmelzen und damit eine zuverlässige Verbindung der Werkstücke miteinander erreichen kann, gleichzeitig aber aufgrund des verteilten Eintrags der Energie und der Vermeidung

eines durchgängig linearen Einbringens der Laserenergie entlang der gewünschten Schweißnaht 210 die Vermeidung von Spannungen erreicht werden.

Dadurch, dass der ursprünglich von der Strahlquelle stammende Bearbeitungsstrahl 2 in mindestens zwei Bearbeitungsteilstrahlen 20, 22 aufgeteilt und die Beaufschlagung mit dem Bearbeitungsstrahl in unterschiedlichen räumlichen Bereichen 220, 230 der Prozesszone 200 stattfindet, und insbesondere eine dynamische Beaufschlagung der unterschiedlichen räumlichen Bereiche 220, 230 stattfindet, kann vermieden werden, dass die Schweißnaht 210 in die Fügepartner durch das Einbringen einer durchgehenden, konstanten und gleichförmigen Erhitzungszone, wie sie durch das Einbringen eines kontinuierlichen Strahls mit einem Laserstrahl in herkömmlichen Schweißverfahren stattfindet, erhöhte Spannungen einträgt. Vielmehr wird in dem vorgeschlagenen Verfahren die lokale Erhitzung immer wieder unterbrochen und in einen anderen räumlichen Bereich 220, 230 innerhalb der Prozesszone 200 verschoben, so dass der Wärmeeintrag an einem einzigen Fleck, welcher mit dem Fokus des Bearbeitungsteilstrahls 20, 22 übereinstimmt, unterbrochen wird und entsprechend auch an dem einen Fleck auch nicht durchgehend eingebracht wird.

Mit anderen Worten wird die Prozesszone 200 in jeweils unterschiedlichen räumlichen Bereichen 220, 230, welche sich über den Zeitablauf hinweg und entlang der zu erzielenden Schweißnaht sequenziell und/oder chaotisch und/oder zufällig ändern, dennoch mit der notwendigen Energie zur Erzeugung der Schweißnaht versorgt.

Der Abstand der unterschiedlichen räumlichen Bereiche 220, 230 der Prozesszone 200 ist üblicherweise so gewählt, dass eine thermische Kopplung zwischen den unterschiedlichen räumlichen Bereichen 220, 230 vorliegt. Damit kann erreicht werden, dass in der Prozesszone 200 die für das Fügen der Werkstücke 110, 120 erforderliche Schmelze ausgebildet wird, ein hoher lokaler Energieeintrag entlang einer einzigen, durchgehenden, kontinuierlichen Schweißlinie hingegen vermieden wird.

In Figur 4 ist die Vorrichtung und das Verfahren zur Bearbeitung zweier Werkstücke 110, 120 noch einmal in einer zweiten Detaillierung dargestellt.

In der gezeigten Ausführungsform sind die Werkstücke 110, 120 aus Glas ausgebildet – beispielsweise in Form von zwei Glasscheiben – die an einer gemeinsamen und zwischen den beiden Werkstücken 110, 120 angeordneten Grenzfläche 100 aneinander angeordnet sind und an einem Abschnitt der Grenzfläche 100 miteinander verschweißt werden. Mit anderen Worten liegt zumindest ein Teil der Unterseite 114 des in der Figur 3 gezeigten oberen Werkstücks 110 an der

Oberseite 122 des unteren Werkstücks 120 an. Die Oberseite 122 des unteren Werkstücks 120 und die Unterseite 114 des oberen Werkstücks 110 bilden entsprechend gemeinsam die Grenzfläche 100 aus, in der die Verschweißung vorgenommen werden soll beziehungsweise vorgenommen wurde.

- 5 Die beiden Werkstücke 110 und 120 können im Bereich der Ausbildung der Grenzfläche 100 aneinander angesprengt sein, um bereits vor der Verschweißung eine vorläufige Positionierung und Fixierung der beiden Werkstücke 110 und 120 gegeneinander zu erreichen.

Aufgrund der Beschaffenheit ihres Werkstoffs, nämlich Glas, sind die beiden Werkstücke 110, 120 im Wesentlichen transparent für den gepulsten Bearbeitungsstrahl 2 beziehungsweise die
10 Bearbeitungsteilstrahlen 20, 22, mit denen die Verschweißung der beiden Werkstücke 110, 120 durchgeführt werden soll. Damit können die gepulsten Bearbeitungsteilstrahlen 20, 22, die zur Durchführung der Verschweißung vorgesehen sind, durch die Werkstücke 110 und 120 hindurchtreten und insbesondere auch durch das obere Werkstück 110 hindurch zu der Grenzfläche 100 hin gelangen. Damit ist eine Verschweißung der Werkstücke 110 und 120
15 innerhalb des durch die beiden Werkstücke 110, 120 gemeinsam ausgebildeten Werkstückvolumens möglich.

Eine solche Verschweißung innerhalb eines durch mindestens zwei Werkstücke ausgebildeten Werkstückvolumens ist bei für einen Bearbeitungsstrahl opaken Werkstoffen nicht möglich.

Das untere Werkstück 120 kann aber auch für den Bearbeitungsstrahl 2 beziehungsweise die
20 Bearbeitungsteilstrahlen 20, 22 opak ausgeführt sein. Die Bearbeitungsteilstrahlen 20, 22 können aber dennoch durch das obere, für die Bearbeitungsteilstrahlen 20, 22 transparente, Werkstück 110 aus Glas hindurch an die zwischen den beiden Werkstücken 110, 120 liegende Grenzfläche 100 gelangen, um dort eine Verschweißung vorzunehmen.

Der Aufbau des optischen Systems 400 entspricht im Übrigen dem zur Figur 3 beschriebenen.

- 25 Soweit anwendbar, können alle einzelnen Merkmale, die in den Ausführungsbeispielen dargestellt sind, miteinander kombiniert und/oder ausgetauscht werden, ohne den Bereich der Erfindung zu verlassen.

Bezugszeichenliste

	1	Vorrichtung zum Durchführen einer Verschweißung von Werkstücken
	100	Grenzfläche
	110	(oberes) Werkstück
5	112	obere Oberfläche des oberen Werkstücks
	114	untere Oberfläche des oberen Werkstücks
	120	(unteres) Werkstück
	122	obere Oberfläche des unteren Werkstücks
	124	untere Oberfläche des unteren Werkstücks
10	2	Bearbeitungsstrahl
	2'	abgelenkter Bearbeitungsstrahl
	2''	abgelenkter Bearbeitungsstrahl
	20	Bearbeitungsteilstrahl
	22	Bearbeitungsteilstrahl
15	200	Prozesszone
	210	Schweißnaht
	220	räumlicher Bereich der Prozesszone
	230	räumlicher Bereich der Prozesszone
	240	räumlicher Bereich der Prozesszone
20	250	Laserpulse
	252	Burst
	30	erstes optisches Element (Linse)
	32	akusto-optischer Deflektor
	34	zweites optisches Element (Linse)
25	36	Blende
	38	drittes optisches Element (Linse)
	40	Strahlformer
	42	weiteres optisches Element (Linse)
	400	optisches System
30	X	Verschiebungsrichtung
	TP	Pause
	TB	Burst

Ansprüche

1. Verfahren zum Bearbeiten mindestens eines Werkstücks (110, 120), wobei das Werkstück (110, 120) mit einem Bearbeitungsstrahl (2), bevorzugt einen gepulsten Laserstrahl, besonders bevorzugt einem Ultrakurzpuls-Laserstrahl, beaufschlagt wird, wobei der
5 Bearbeitungsstrahl (2, 2', 2'', 20, 22) zur Ausbildung einer Prozesszone (200) hochdynamisch zwischen mindestens zwei unterschiedlichen räumlichen Bereichen (220, 230) bewegt wird.
2. Verfahren gemäß Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Bearbeitungsstrahl (2)
10 zwischen den beiden räumlichen Bereichen (220, 230) mit einer Frequenz von 100kHz bis 10MHz bewegt wird und/oder dass der Bearbeitungsstrahl innerhalb von 10µs bis 0,1µs zwischen den beiden räumlichen Bereichen (220, 230) bewegt wird.
3. Verfahren gemäß Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** der
15 Bearbeitungsstrahl (2) mittels eines akusto-optischen Elements (32, 320, 322) bewegt wird, bevorzugt mittels zweier akusto-optischer Elemente, die unter einem Winkel zueinander orientiert sind.
4. Verfahren gemäß Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** das akusto-optische
20 Element (32) mit einer sequentiell und/oder zufällig und/oder chaotisch variierenden Schallwelle beaufschlagt wird.
5. Verfahren gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass**
25 der Bearbeitungsstrahl (2) ein gepulster Laserstrahl ist und die Bewegung zwischen den beiden räumlichen Bereichen (220, 230) in den Pulspausen (TP) durchgeführt wird.
6. Verfahren gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass**
mindestens zweier Werkstücke (110, 120) vorgesehen sind, wobei mindestens eines der
30 Werkstücke (110, 120) transparent für den Bearbeitungsstrahl (2) ist, und in den Werkstücken (110, 120) in der Prozesszone (200) eine Schweißnaht (210) ausgebildet wird, wobei der Bearbeitungsstrahl (2) hochdynamisch in mindestens zwei separate
Bearbeitungsteilstrahlen (20, 22) aufgeteilt wird und mindestens zwei
Bearbeitungsteilstrahlen (20, 22) jeweils unterschiedliche räumliche Bereiche (220, 230) der
35 Prozesszone (200) beaufschlagen und/oder wobei der Bearbeitungsstrahl (2) hochdynamisch bewegt wird und mindestens zwei abgelenkte Bearbeitungsstrahlen (2', 2'')

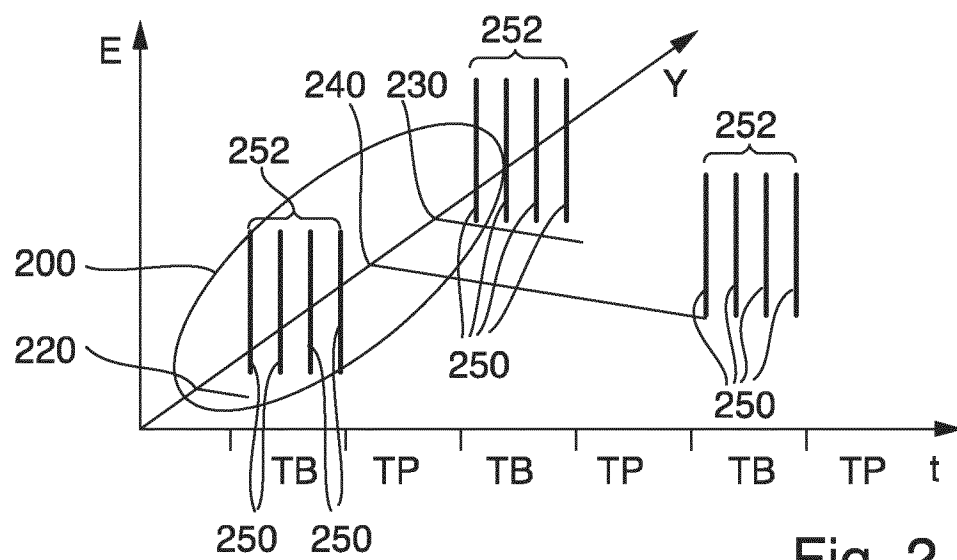
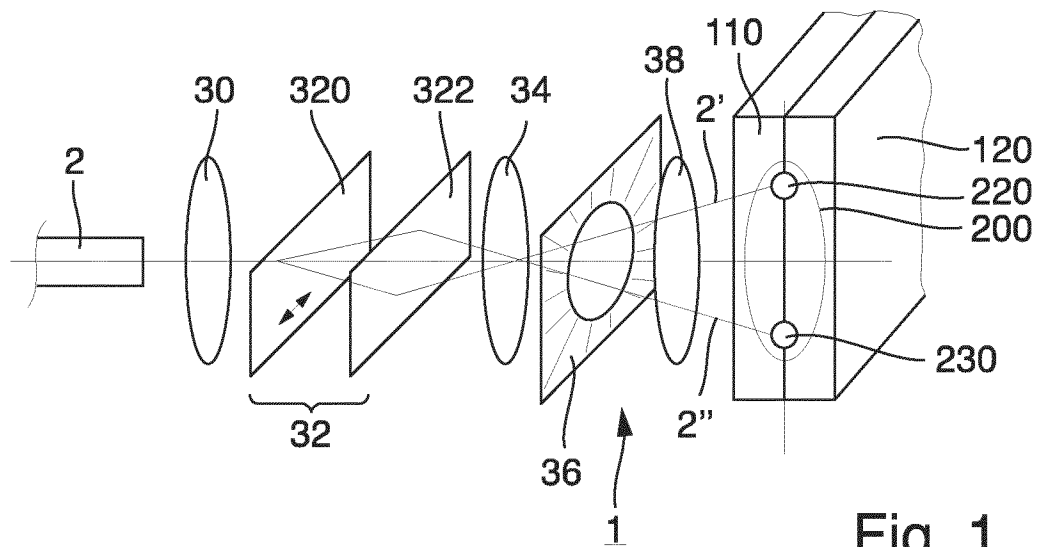
jeweils unterschiedliche räumliche Bereiche (220, 230) der Prozesszone (200) beaufschlagen.

- 5 7. Verfahren gemäß Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** jeder der Bearbeitungsstrahlen (2', 2'', 20, 22) einen anderen räumlichen Bereich (220, 230) der Prozesszone (200) beaufschlagt.
- 10 8. Verfahren gemäß einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** zwei um 90° gegeneinander gedrehte akusto-optische Deflektoren vorgesehen sind, mittels welchen eine Ablenkung der Bearbeitungsstrahlen (2', 2'', 20, 22) in einer auf den Bearbeitungsstrahl (2) senkrechten Ebene durchgeführt wird.
- 15 9. Verfahren gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Bearbeitungsstrahl (2, 2', 2'', 20, 22) jeweils sequentiell und/oder zufällig und/oder chaotisch unterschiedliche räumliche Bereiche (220, 230) der Prozesszone (200) beaufschlagt.
- 20 10. Verfahren gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Bearbeitungsstrahlen (2', 2'', 20, 22) jeweils mittels eines Strahlformers (40) geformt werden, bevor sie die unterschiedlichen räumlichen Bereiche (220, 230) beaufschlagen.
- 25 11. Verfahren gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die von den Bearbeitungsteilstrahlen (20, 22) beaufschlagte, sich bildende Prozesszone (200) und die Werkstücke (110, 120) relativ zueinander bewegt werden.
- 30 12. Vorrichtung (1) zur Bearbeitung mindestens eines Werkstücks (110, 120), wobei eine Strahlquelle zur Bereitstellung eines Bearbeitungsstrahls (2), bevorzugt eines gepulsten Laserstrahls, besonders bevorzugt eines Ultrakurzpuls-Laserstrahls, und ein optisches System (400) zur Beaufschlagung mindestens eines Werkstücks (110, 120) mit dem Bearbeitungsstrahl (2) vorgesehen sind, wobei das optische System (400) dazu ausgebildet und eingerichtet ist, den Bearbeitungsstrahl (2) zur Ausbildung einer Prozesszone (200) hochdynamisch zwischen mindestens zwei unterschiedlichen räumlichen Bereichen (220, 230) zu bewegen.
13. Vorrichtung (1) gemäß Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet, dass** damit mindestens zwei Werkstücke (110, 120) verschweißbar sind, wobei mindestens eines der Werkstücke (110, 120) transparent für den Bearbeitungsstrahl (2) ist, wobei das optische System (400)

dazu ausgebildet und eingerichtet ist, den Bearbeitungsstrahl (2) in mindestens zwei separate Bearbeitungsteilstrahlen (20, 22) aufzuteilen und mit mindestens zwei Bearbeitungsteilstrahlen (20, 22) jeweils unterschiedliche räumliche Bereiche (220, 230) der Prozesszone (200) zu beaufschlagen.

- 5 14. Vorrichtung (1) gemäß Anspruch 12 oder 13, **dadurch gekennzeichnet, dass** das optische System (400) einen akusto-optischen Deflektor (32) zur hochdynamischen Bewegung des Bearbeitungsstrahls (2) aufweist.
- 10 15. Vorrichtung (1) gemäß Anspruch 14, **dadurch gekennzeichnet, dass** das optische System (400) zwei akusto-optische Deflektoren aufweist, mittels welchen eine Ablenkung der Bearbeitungsteilstrahlen (20, 22) in einer auf den Bearbeitungsstrahl (2) senkrechten Ebene ermöglicht wird.

1/2



2/2

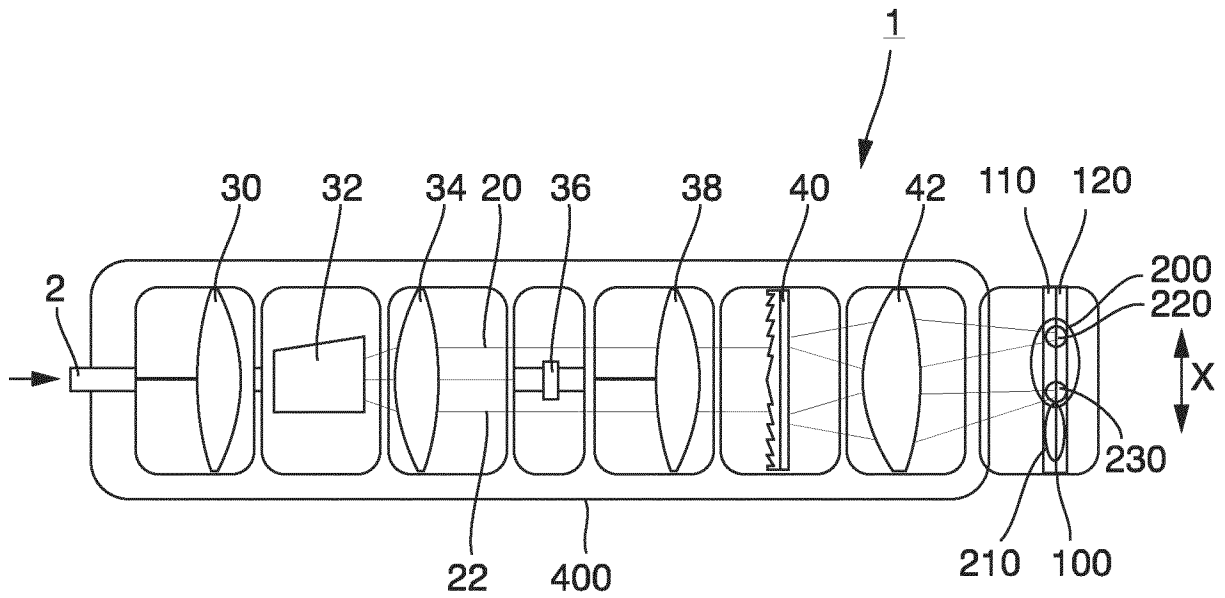


Fig. 3

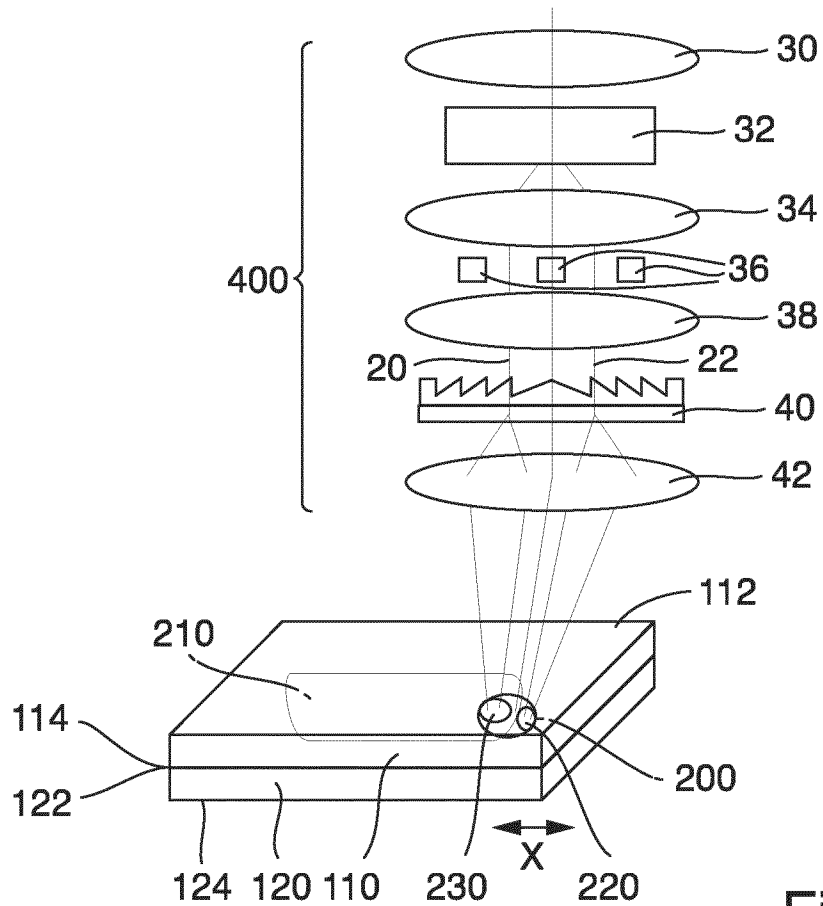


Fig. 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2020/067163

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

B23K 26/0622(2014.01)i; **B23K 26/06**(2014.01)i; **B23K 26/082**(2014.01)i; **B23K 26/242**(2014.01)i; **B23K 26/26**(2014.01)i; **B23K 26/324**(2014.01)i; **C03B 23/20**(2006.01)i; **B23K 103/00**(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; C03B

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	US 2018045232 A1 (D. A. CAPOSTAGNO ET AL) 15 February 2018 (2018-02-15)	1,2,9-12
Y	paragraphs [0027], [0120] - [0169]; figures 15-17	6,7,13
Y	DE 102010038554 A1 (OSRAM AG) 02 February 2012 (2012-02-02)	6,7,13
	paragraphs [0026] - [0036]; figures	
X	US 2019001442 A1 (M. UNRATH ET AL) 03 January 2019 (2019-01-03)	1-5,8-12,14,15
	paragraphs [0052] - [0060], [0200] - [0212]; figures 1,25-28	
X	EP 3395493 A1 (SCHERDEL INNOTECH FORSCHUNGS UND ENTW GMBH) 31 October 2018 (2018-10-31)	1,10,12
A	paragraphs [0043] - [0049]; figures	2



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

18 September 2020

Date of mailing of the international search report

05 October 2020

Name and mailing address of the ISA/EP

European Patent Office
p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk
Netherlands

Telephone No. (+31-70)340-2040

Facsimile No. (+31-70)340-3016

Authorized officer

Jeggy, Thierry

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/EP2020/067163

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
US	2018045232	A1	15 February 2018	CN	105855706	A	17 August 2016
				CN	107405725	A	28 November 2017
				CN	108406112	A	17 August 2018
				CN	205764438	U	07 December 2016
				EP	3256283	A2	20 December 2017
				JP	2018505058	A	22 February 2018
				KR	20170116123	A	18 October 2017
				US	2018045232	A1	15 February 2018
				WO	2016128704	A2	18 August 2016
DE	102010038554	A1	02 February 2012	CN	102884015	A	16 January 2013
				DE	102010038554	A1	02 February 2012
				EP	2523914	A1	21 November 2012
				JP	2013535393	A	12 September 2013
				KR	20130094308	A	23 August 2013
				US	2013126938	A1	23 May 2013
				WO	2012013521	A1	02 February 2012
US	2019001442	A1	03 January 2019	CN	108025396	A	11 May 2018
				JP	2018532595	A	08 November 2018
				KR	20180039747	A	18 April 2018
				TW	201718158	A	01 June 2017
				US	2019001442	A1	03 January 2019
				WO	2017044646	A1	16 March 2017
EP	3395493	A1	31 October 2018	DE	102017108681	A1	25 October 2018
				EP	3395493	A1	31 October 2018

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES		
INV.	B23K26/0622	B23K26/06
	B23K26/324	C03B23/20
ADD.	B23K103/00	
Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC		
B. RECHERCHIERTE GEBIETE		
Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)		
B23K C03B		
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	US 2018/045232 A1 (D. A. CAPOSTAGNO ET AL) 15. Februar 2018 (2018-02-15)	1,2,9-12
Y	Absätze [0027], [0120] - [0169]; Abbildungen 15-17	6,7,13
Y	DE 10 2010 038554 A1 (OSRAM AG) 2. Februar 2012 (2012-02-02) Absätze [0026] - [0036]; Abbildungen	6,7,13
X	US 2019/001442 A1 (M. UNRATH ET AL) 3. Januar 2019 (2019-01-03) Absätze [0052] - [0060], [0200] - [0212]; Abbildungen 1,25-28	1-5, 8-12,14, 15
X	EP 3 395 493 A1 (SCHERDEL INNOTECH FORSCHUNGS UND ENTW GMBH) 31. Oktober 2018 (2018-10-31)	1,10,12
A	Absätze [0043] - [0049]; Abbildungen	2
☐ 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
18. September 2020		05/10/2020
Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Bevollmächtigter Bediensteter Jeggy, Thierry

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2020/067163

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument		Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie		Datum der Veröffentlichung
US 2018045232	A1	15-02-2018	CN	105855706 A	17-08-2016
			CN	107405725 A	28-11-2017
			CN	108406112 A	17-08-2018
			CN	205764438 U	07-12-2016
			EP	3256283 A2	20-12-2017
			JP	2018505058 A	22-02-2018
			KR	20170116123 A	18-10-2017
			US	2018045232 A1	15-02-2018
			WO	2016128704 A2	18-08-2016

DE 102010038554	A1	02-02-2012	CN	102884015 A	16-01-2013
			DE	102010038554 A1	02-02-2012
			EP	2523914 A1	21-11-2012
			JP	2013535393 A	12-09-2013
			KR	20130094308 A	23-08-2013
			US	2013126938 A1	23-05-2013
			WO	2012013521 A1	02-02-2012

US 2019001442	A1	03-01-2019	CN	108025396 A	11-05-2018
			JP	2018532595 A	08-11-2018
			KR	20180039747 A	18-04-2018
			TW	201718158 A	01-06-2017
			US	2019001442 A1	03-01-2019
			WO	2017044646 A1	16-03-2017

EP 3395493	A1	31-10-2018	DE	102017108681 A1	25-10-2018
			EP	3395493 A1	31-10-2018
