

(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
30. Dezember 2015 (30.12.2015)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2015/197746 A2

- (51) Internationale Patentklassifikation:
B23K 37/00 (2006.01)
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2015/064342
- (22) Internationales Anmeldedatum:
25. Juni 2015 (25.06.2015)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität:
10 2014 109 065.9 27. Juni 2014 (27.06.2014) DE
- (71) Anmelder: **TRUMPF WERKZEUGMASCHINEN
GMBH + CO. KG** [DE/DE]; Johann-Maus-Strasse 2,
71254 Ditzingen (DE).
- (72) Erfinder: **POPP, Andreas**; Liegnitzer Strasse 68, 71701
Schwieberdingen (DE).
- (74) Anwalt: **TRUMPF PATENTABTEILUNG**; TRUMPF
GmbH & Co. KG, TH501 Patente und Lizenzen, 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,
BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DK, DM,
DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR,
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, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN,
TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

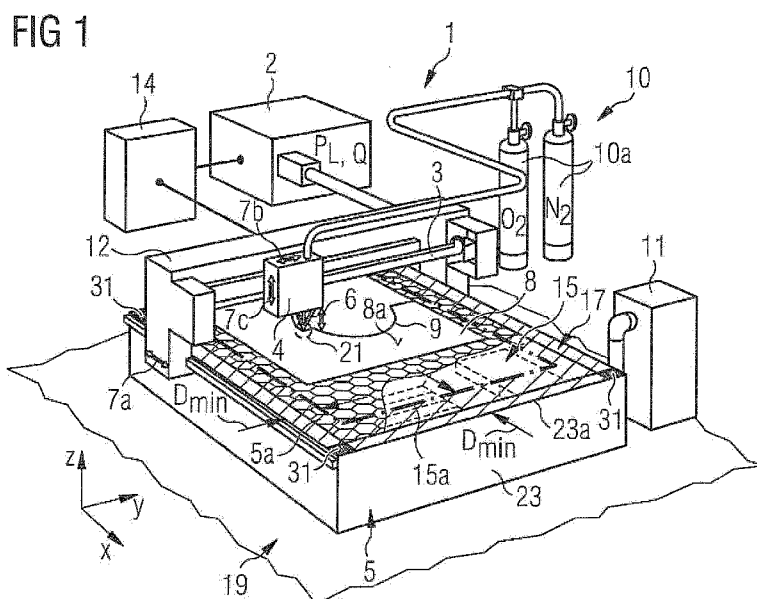
- (84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW,
GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST,
SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG,
KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH,
CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB,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

Veröffentlicht:

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu
veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz
2 Buchstabe g)

(54) Title: LASER MACHINING SYSTEM AND MONITORING METHOD OF THE LASER MACHINING SYSTEM

(54) Bezeichnung : LASERBEARBEITUNGSANLAGE UND ÜBERWACHUNGSVERFAHREN DER
LASERBEARBEITUNGSANLAGE



(57) Abstract: The invention relates to a laser machining system (1) for machining a workpiece (8) with a laser beam (6), in which a laser protection concept is used that is based on the absorption of laser light in the ambient atmosphere. A corresponding laser machining system (1) correspondingly comprises a laser system for providing a laser beam for interaction with the workpiece (8), said laser beam being adjusted to a wavelength that is absorbed in the ambient air (170). Furthermore, the laser machining system (1) has a workpiece mounting unit (5) for mounting the workpiece (8), which is designed to provide free inspection to a user into a machining zone (21) from an access zone for persons (19). The intermediate space (17) between the machining zone and the access zone for persons is thus filled with ambient air. Furthermore, the laser machining system may comprise a humidity sensor (31) for monitoring the humidity that is necessary for the required absorption.

(57) Zusammenfassung:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



Es wird eine Laserbearbeitungsanlage (1) zum Bearbeiten eines Werkstücks (8) mit einem Laserstrahl (6) offenbart, bei der ein Laserschutzkonzept eingesetzt wird, dass auf der Absorption von Laserlicht in der Umgebungsatmosphäre basiert. Eine entsprechende Laserbearbeitungsanlage (1) weist entsprechend ein Lasersystem zum Bereitstellen eines Laserstrahls für die Wechselwirkung mit dem Werkstück (8) auf, welcher auf eine in der Umgebungsluft (170) absorbierte Wellenlänge eingestellt ist. Ferner weist die Laserbearbeitungsanlage (1) eine Werkstücklagerungseinheit (5) zum Lagern des Werkstücks (8) auf, die zur offenen Einsichtnahme eines Benutzers in eine Prozesszone (21) aus einer Personenzugangszone (19) heraus ausgebildet ist. Der Zwischenraum (17) zwischen der Prozesszone und der Personenzugangszone wird somit von Umgebungsluft ausgefüllt. Ferner kann die Laserbearbeitungsanlage einen Feuchtesensor (31) aufweisen, der eine für die benötigte Absorption erforderliche Luftfeuchtigkeit überwacht.

Laserbearbeitungsanlage und Überwachungsverfahren der Laserbearbeitungsanlage

Die vorliegende Erfindung betrifft eine Laserbearbeitungsanlage zur Bearbeitung eines Werkstücks mit einem Laserstrahl. Ferner betrifft die Erfindung ein Überwachungsverfahren einer Laserbearbeitungsanlage zum Schutz eines Bedieners vor Laserstrahlung.

Es ist bekannt, Laserbearbeitungsanlagen mit Schutzgehäusen zu umgeben, die während des Betriebs der Laserbearbeitungsanlagen nicht geöffnet werden dürfen. Jegliche Strahlung wird innerhalb des Schutzgehäuses gehalten, sodass keine Gefährdung von Benutzern der Laserbearbeitungsanlagen vorliegt.

Allgemein werden Laser für die Materialbearbeitung so ausgelegt, dass sie in der umgebenden Atmosphäre (Umgebungsluft) sehr geringe Absorptionsverluste aufweisen. Die geringen Absorptionsverluste in der Atmosphäre werden für die Freistrahübertragung von CO₂-Lasern sowie für offene, d.h. mit Luft gefüllte, Festkörperlaserresonatoren von z.B. Scheibenlasern und Stablasern oder den offenen Laseraufbau von Diodenlasern benötigt. Bei der Verwendung eines monolithischen Faserlasers (engl. All-fiber fiber laser) propagiert bei Laserbearbeitungsanlagen der Laserstrahl zumindest bei der Fokussierung und vor dem Auftreffen auf der Werkstückoberfläche im Freistrah.

Aus JP 04-251690 A ist es bekannt, in einer Laserbearbeitungsmaschine einen Flüssigkeitsnebel auf die Bearbeitungsstelle zu sprühen, um reflektierte Laserstrahlung zu absorbieren. Ferner ist es aus JP 60-216597 A bekannt, beim Einsatz eines CO₂-Lasers einen Bereich zwischen einem Bearbeitungskopf und einem zu schützenden Objekt mit einem Gas zu füllen, das die Laserstrahlung absorbiert.

Einem Aspekt dieser Offenbarung liegt die Aufgabe zugrunde, den Schutz von Personen, beispielsweise von Benutzern, in der Nähe von Laserbearbeitungsanlagen zu vereinfachen. Ferner liegt die Aufgabe zugrunde, die Benutzung von Laserbearbeitungsanlagen zu vereinfachen. Insbesondere liegt die Aufgabe zugrunde, beispielsweise das Entnehmen von mit dem Laser bearbeiteten Teilen aus der Laserbearbeitungsanlage zu erleichtern.

Zumindest eine dieser Aufgaben wird gelöst durch eine Laserbearbeitungsanlage nach Anspruch 1, durch einen Laserbearbeitungskopf nach Anspruch 15 und durch ein Verfahren zur Überwachung einer Laserbearbeitungsanlage nach Anspruch 16. Weiterbildungen sind in den Unteransprüchen angegeben.

In einem Aspekt weist eine Laserbearbeitungsanlage zum Bearbeiten eines Werkstücks mit einem Laserstrahl ein Lasersystem und eine Werkstücklagerungseinheit auf. Das Lasersystem ist zum Bereitstellen eines Laserstrahls für eine Wechselwirkung mit dem Werkstück in einer von Umgebungsluft umgebenen Prozesszone ausgebildet, wobei der Laserstrahl auf eine von der Umgebungsluft absorbierte Wellenlänge eingestellt ist. Die Werkstücklagerungseinheit ist zum Lagern des Werkstücks ausgebildet, wobei die Werkstücklagerungseinheit zur offenen Einsichtnahme eines Benutzers in die Prozesszone aus einer während des Betriebs der Laserbearbeitungsanlage zugänglichen Personenzugangszone heraus ausgebildet ist, indem die Umgebungsluft einen Zwischenraum zwischen der Prozesszone und der Personenzugangszone ausfüllt.

In einigen Ausführungsformen erlaubt das auf Absorption in der Umgebungsluft basierende Laserschutzkonzept einen direkten Zugang zur Werkstücklagerungseinheit, beispielsweise deren Werkstückauflage, und insbesondere eine Einsichtnahme zur Kontrolle der Prozesszone, ohne dass Elemente eines Schutzgehäuses entfernt werden müssen. Dies erlaubt es, Arbeitsabläufe bei der Lagerung und Entnahme von Werkstücken zu vereinfachen und zu beschleunigen sowie die Laserbearbeitung selbst effizient zu überwachen. Dies beruht unter anderem darauf, dass in dem sich von der Prozesszone zu der Personenzugangszone erstreckenden Zwischenraum kein festes Schutzelement zum Schutz vor (Laser-)Strahlung angeordnet ist, welche durch Reflexionen oder Streuung des Laserstrahls in der Laserbearbeitungsanlage entstehen kann.

In einigen Ausführungsformen kann der Zwischenraum aufgrund der lateralen Verschiebung der Prozesszone bei der Bewegung eines den Laserstrahl auf das Werkstück ausrichtenden Bearbeitungskopfs bezüglich der Werkstücklagerungseinheit während der Bearbeitung variieren. Jedoch ist die Laserbearbeitungsanlage derart ausgebildet, dass der Zwischenraum eine Mindestausbreitungslänge von reflektierter oder gestreuter Strahlung für alle Positionen eines Benutzers in der Personenzugangszone und alle möglichen Positionen der Prozesszone bereitstellt. Der Zwischenraum kann in seiner Ausdehnung und/oder die Gaszusammensetzung zu-

mindest eines Teilbereichs des Zwischenraums kann in ihrer Feuchtigkeit derart einstellbar sein, dass Strahlung aus der Prozesszone beim Ausbreiten durch den Zwischenraum eine derartige Absorption erfährt, dass ein Strahlungswert in der Personenzugangszone unter einem vorgegebenen Grenzwert liegt und beispielsweise die Anforderung der Laser Klasse 1 erfüllt. Beispielsweise begrenzt DIN EN 60825-1 die erlaubte Intensität im Wellenlängenbereich von $1,4\ \mu\text{m}$ bis $4\ \mu\text{m}$ auf $26\ \text{mW/cm}^2$ und im Wellenlängenbereich größer $4\ \mu\text{m}$ auf $1000\ \text{W/m}^2$.

In einigen Ausführungsformen kann sich die Personenzugangszone auch auf Bereiche oberhalb der Werkstücklagerungseinheit erstrecken, insbesondere dann, wenn sich ein Benutzer über die Werkstücklagerungseinheit beugen können soll. Das Bereitstellen einer derartigen Personenzugangszone ist beispielsweise dann möglich, wenn eine erforderliche Absorption schon sehr nahe am Bearbeitungskopf erreicht wird. In einigen Ausführungsformen kann eine zum Beispiel vertikal ausfahrbare Barriere am Rand der Werkstücklagerungseinheit dazu eingesetzt werden, unter bestimmten Bedingungen zu verhindern, dass sich ein Benutzer über die Werkstücklagerungseinheit beugen kann.

In einigen Ausführungsformen ist das Lasersystem zum Erzeugen eines Laserstrahls derart ausgebildet, insbesondere der Laserstrahl auf eine von der Umgebungsluft absorbierte Wellenlänge derart eingestellt, dass die reflektierte oder gestreute Strahlung in der Umgebungsluft mit einem Absorptionskoeffizienten von mindestens $0,02\ \text{cm}^{-1}$, beispielsweise von mindestens $0,03\ \text{cm}^{-1}$ für einen Mindestabstand von ca. 1 m, absorbiert wird. Ein höherer Absorptionskoeffizient verkürzt die erforderliche Mindestausbreitungslänge, d.h. den Mindestabstand, bei gleicher zu absorbierender Leistung.

In einigen Ausführungsformen ist die Werkstücklagerungseinheit derart dimensioniert und/oder die Laserbearbeitungsanlage weist eine zusätzliche Befeuchtungsvorrichtung auf, dass reflektierter oder gestreuter Strahlung vor dem Eintritt in die Personenzugangszone auf eine Intensität kleiner oder gleich z.B. (gemäß den Anforderungen der DIN EN 60825-1) $26\ \text{mW/cm}^2$ im Wellenlängenbereich von $1,4\ \mu\text{m}$ bis $4\ \mu\text{m}$ bzw. im Wellenlängenbereich größer $4\ \mu\text{m}$ auf kleiner oder gleich $1000\ \text{W/m}^2$ durch Absorption in der Umgebungsluft gedämpft wird.

In einigen Ausführungsformen weisen Laserbearbeitungsanlagen eine Steuerungseinheit zur Steuerung des Lasersystems und mindestens einen mit der Steuerungseinheit verbundenen

Feuchtesensor auf, der zur Messung eines Luftfeuchtigkeitswertes ausgebildet ist. Feuchtesensoren, die beispielsweise die absolute und/oder relative Luftfeuchtigkeit ausgeben, sind allgemein bekannt. Feuchtesensoren können mit Temperatursensoren ergänzt werden, um beispielsweise die noch mögliche Befeuchtung der Luft bis zur Sättigung zu bestimmen. Ein gemessener Luftfeuchtigkeitswert ist repräsentativ für die Gaszusammensetzung zumindest in einem dem Feuchtesensor zugeordneten Abschnitt des Zwischenraums. Der einem Feuchtesensor zugeordnete Abschnitt kann sich zumindest teilweise um die Prozesszone und/oder über den gesamten gasgefüllten Zwischenraum und/oder entlang eines Grenzbereichs zwischen Werkstücklagerungseinheit und Personenzugangszone erstrecken. Beispielsweise kann eine Mehrzahl von Feuchtesensoren entlang einer oder mehrerer Seiten der Werkstücklagerungseinheit vorgesehen sein, um lückenlos den Grenzbereich zur Personenzugangszone zu überwachen. Die Steuerungseinheit kann beispielsweise dazu ausgebildet sein, die Laserleistung in der Prozesszone und/oder die Vorschubgeschwindigkeit eines den Laserstrahl auf das Werkstück ausrichtenden Bearbeitungskopfs in Abhängigkeit des gemessenen Feuchtigkeitswerts einzustellen. Die Steuerungseinheit ist insbesondere dazu ausgebildet, bei Unterschreiten eines Feuchtigkeitsschwellenwerts die Vorschubgeschwindigkeit zu reduzieren oder die Laserbearbeitung zu stoppen.

In einigen Ausführungsformen weisen Laserbearbeitungsanlagen eine oder mehrere der folgenden Komponenten auf: eine Lichtschrankeneinheit zum Bereitstellen einer zusätzlichen Absorptionsweglänge, eine Ausströmungsvorrichtung zum Ausströmen eines feuchten Gasgemischs zur Befeuchtung der Umgebungsluft, ein Lasersystem mit einem Laserstrahlerzeuger, einer Strahlführung und einer Bearbeitungsoptik, ein Trockengassystem zum Spülen von zumindest Teilen des optischen Weges des Laserstrahls, eine Positioniereinheit zum Positionieren einer Bearbeitungsoptik relativ zur Werkstücklagerungseinheit und eine Schutzwandstruktur zur Verhinderung der Ausbreitung von Laserlicht jenseits der Schutzwandstruktur, welche die Werkstücklagerungseinheit mit Ausnahme des Bereichs der Personenzugangszone umgibt.

In einem weiteren Aspekt ist ein Verfahren zur Überwachung einer Laserbearbeitungsanlage offenbart, wobei die Strahlensicherheit der Laserbearbeitungsanlage auf Absorption der Laserstrahlung in der Umgebungsluft in einem sich von einer Prozesszone, in der die Laserbearbeitung stattfindet, bis zu einer Personenzugangszone, in die einem Benutzer während des Betriebs der Laserbearbeitungsanlage der Zugang erlaubt ist und von der aus der Benutzer

freie Einsicht in die Prozesszone hat, erstreckenden Zwischenraum basiert. Das Verfahren weist die Schritte des Bearbeitens eines Werkstücks mit einem Laserstrahl, der eine in der Umgebungsluft absorbierte Wellenlänge aufweist, des Messens eines Luftfeuchtigkeitswertes, der repräsentativ für eine Gaszusammensetzung in einem der Messung zugeordneten Abschnitt des Zwischenraums ist, und des Anpassens der Laserleistung in der Prozesszone und/oder einer Vorschubgeschwindigkeit eines den Laserstrahl auf das Werkstück ausrichtenden Bearbeitungskopfs und/oder einer Ausdehnung des Zwischenraums in Abhängigkeit vom gemessenen Feuchtigkeitswert auf.

Hierin werden Konzepte offenbart, die es erlauben, zumindest teilweise Aspekte aus dem Stand der Technik zu verbessern. Insbesondere ergeben sich weitere Merkmale und deren Zweckmäßigkeiten aus der folgenden Beschreibung von Ausführungsformen anhand der Figuren. Von den Figuren zeigen:

- Fig. 1 eine schematische räumliche Darstellung einer Laserbearbeitungsanlage beispielsweise zum Schneiden eines Werkstücks,
- Fig. 2 eine Skizze zur Verdeutlichung des auf Absorption in der Umgebungsluft basierendem Schutzkonzepts sowie einer Laserbearbeitungsoptik einer Laserbearbeitungsanlage,
- Fig. 3 bis 5 Graphen zur Verdeutlichung der Wellenlängenabhängigkeit der Absorption in der bodennahen Atmosphäre,
- Fig. 6 eine Aufsicht auf eine schematische Laserbearbeitungsanlage mit einem auf Absorption in der Umgebungsluft basierenden Schutzkonzept,
- Fig. 7 eine Aufsicht auf eine schematische Laserbearbeitungsanlage mit einem auf Absorption in der Umgebungsluft basierenden Schutzkonzept zweier Seiten der Laserbearbeitungsanlage,
- Fig. 8 eine Aufsicht auf eine schematische Laserbearbeitungsanlage mit durch Befeuchtung unterstützten und auf Absorption basierenden Schutzkonzepten,
- Fig. 9 eine schematische Schnittdarstellung einer Bearbeitungszone einer Laserbearbeitungsanlage zur Verdeutlichung der Schutzkonzepte gemäß Fig. 8, und
- Fig. 10 eine schematische Schnittdarstellung eines Schneidkopfs mit Befeuchtungssystem und Feuchtesensoreinheit.

Hierin beschriebene Aspekte basieren zum Teil auf der Erkenntnis, dass durch Anpassung der Emissionswellenlänge eines Lasersystems an die Absorptionscharakteristik der erdnahen Atmosphäre (Luft) hohe Absorptionsverluste allein aufgrund des Ausbreitens der Laserstrahlung in der umgebenden Atmosphäre erhalten werden können. Die Luft als Gasgemisch hat die Zusammensetzung aus im Wesentlichen Stickstoff und Sauerstoff sowie Wasserdampf und Spurengasen wie Argon und Kohlenstoffdioxid. Die Absorption im nahen Infraroten basiert insbesondere auf der Wechselwirkung der Strahlung mit Wasserdampf, der im Mittel zu 1,3 Vol.-% in Bodennähe in der Luft enthalten ist. Nach den hierin offenbarten Schutzkonzepten kann die Erdatmosphäre selbst als Schutzfilter für den Benutzer der Laserbearbeitungsanlage (z.B. Werkzeugmaschine mit Laser) bei entsprechender Wahl der Emissionswellenlänge von beispielsweise Festkörperlaser im infraroten Wellenlängenbereich fungieren. Die Laserleistung der Laserstrahlung, welche die Prozesszone verlässt, fällt dann entsprechend dem Lambert-Beersches Gesetz rasch exponentiell ab.

Die Absorptionsverluste können dazu ausgenutzt werden, die Vorschriften zum Schutz des Benutzers einer Laserbearbeitungsanlage vor Laserstrahlung zu erfüllen. Der Schutz betrifft insbesondere den Schutz vor Strahlung, die aus dem Laserstrahl in der Prozesszone beispielsweise am Werkstück in Richtung einer vorgesehenen Personenzugangszone der Laserbearbeitungsanlage reflektiert wird, sowie den Schutz vor gestreuter Laserstrahlung.

Die Absorption der Laserstrahlung in der Atmosphäre wird im Wesentlichen durch deren Wasserdampfanteil bestimmt. Somit ist die Gewährleistung der benötigten Luftfeuchtigkeit in dem Bereich der Umgebungsluft der Prozesszone ausschlaggebend, in dem die Absorption stattfinden soll, d.h. im allgemeinen zwischen der Prozesszone und der Personenzugangszone. Dieser Bereich umfasst je nach Position der Prozesszone einen Teil des der Laserbearbeitung zugänglichen Bearbeitungsbereichs der Bearbeitungsanlage sowie gegebenenfalls einen sich vom Bearbeitungsbereich zur Personenzugangszone erstreckenden Zwischenraum. Dieser (Absorptions-)Bereich hängt ferner auch von der genauen Position der Prozesszone innerhalb des Bearbeitungsbereichs ab. Ausreichender Schutz soll für jede mögliche Position der Prozesszone im Bearbeitungsbereich und für jede mögliche Position (und Körperhaltung) eines Benutzers innerhalb der Personenzugangszone gewährleistet sein.

Zur Gewährleistung der benötigten Luftfeuchtigkeit kann eine Steuerungseinheit der Laserbearbeitungsanlage mit einem oder mehreren Feuchtesensoren zusammenarbeiten, die Information über die Feuchtigkeit in ihnen zugeordneten Gebieten liefern. Wenn die Absorption in

der Umgebungsluft nicht ausreicht, können mögliche Steuerungsmaßnahmen beispielsweise die Einschränkung des Bearbeitungsbereichs, die Reduzierung einer Vorschubgeschwindigkeit eines den Laserstrahl auf das Werkstück ausrichtenden Bearbeitungskopfs oder das Unterbinden des Betriebs der Laserbearbeitungsanlage sein.

Ferner wurde erkannt, dass Teilbereiche im Zwischenraum vorgesehen werden können, in denen Gas mit einer ausreichenden Luftfeuchtigkeit, die beispielsweise über der der Umgebungsluft liegt, einströmt. Auf diese Weise kann auch unter „zu trockenen Bedingungen“ die erforderliche Absorption gewährleistet werden.

Ferner kann eine Mindestabsorption durch einen Mindestabstand des Benutzers zur Prozesszone gewährleistet werden. Allgemein sollte dann sichergestellt sein, dass der Benutzer diesen Mindestabstand bei einer vorliegenden Absorptionsrate/Feuchtigkeit der Umgebungsluft einhält.

Im Folgenden wird als ein erstes Beispiel eine Laserbearbeitungsanlage allgemein beschrieben. Im Anschluss werden weitere Umsetzungsbeispiele des auf Absorption in der Umgebungsluft basierenden Schutzkonzepts erläutert.

Fig. 1 zeigt eine Laserbearbeitungsanlage 1 beispielhaft in Form einer Laserschneidmaschine. Die Laserbearbeitungsanlage 1 weist ein Lasersystem auf, das zum Beispiel einen Strahlerzeuger 2, eine Laserstrahlführung 3 und eine Laserbearbeitungsoptik 4a in einem Laserbearbeitungskopf 4 umfasst. Die Laserbearbeitungsanlage 1 weist ferner eine Werkstücklageeinheit 5 mit einer Werkstückauflage 5a zum Lagern eines zu bearbeitenden Werkstücks 8 auf. In Fig. 1 definiert die Werkstückauflage 5a eine Bearbeitungsebene (XY-Ebene). Die Werkstücklageeinheit 5 kann einen zusätzlichen Maschinenrahmen aufweisen, der in einem festen oder einstellbaren Abstand zur Werkstückauflage 5a angeordnet ist.

Ein Strahlengang eines Laserstrahls 6 des Strahlerzeugers 2 wird über die Strahlführung 3 mit Hilfe von (nicht gezeigten) Umlenkspiegeln oder – beispielsweise bei Einsatz eines Festkörperlaser als Strahlerzeuger 2 – mit Hilfe eines Lichtleitkabels vom Strahlerzeuger 2 zu dem Laserbearbeitungskopf 4 geführt, wobei der Laserbearbeitungskopf 4 parallel zur Bearbeitungsebene mit einer üblicherweise einstellbaren Vorschubgeschwindigkeit verfahrbar ist.

Der Laserstrahl 6 wird mittels der im Bearbeitungskopf 4 angeordneten Laserbearbeitungsoptik zuerst kollimiert und anschließend auf die Werkstückoberfläche 8a fokussiert. Werkstück 8 ist beispielsweise ein Blech. Die Strahlachse (optische Achse) des aus dem Laserbearbeitungskopf 4 austretenden Laserstrahls 6 verläuft in Z-Richtung senkrecht zum Werkstück 8.

Beispielsweise beim Laserschneiden wird mit dem Laserstrahl 6 zunächst in das Werkstück 8 eingestochen, d. h. das Werkstück 8 wird an einer Stelle punktförmig aufgeschmolzen (Schmelzschnitt) oder aufgeschmolzen und oxidiert (Brennschnitt) und die hierbei entstehende Schmelze wird ausgeblasen. Nachfolgend werden der Laserstrahl 6 und das Werkstück 8 relativ zueinander bewegt, sodass eine zweidimensionale Bearbeitungsbahn einen durchgängigen Schnittspalt 9 bewirkt, entlang dessen der Laserstrahl 6 das Werkstück 8 durchtrennt hat.

Üblicherweise erfolgt das Einstechen unter Gaszufuhr. Auch das Laserschneiden kann durch Hinzufügen eines Gases unterstützt werden. Als Schneidgase können Sauerstoff, Stickstoff, Druckluft und/oder anwendungsspezifische Gase eingesetzt werden. Welches Gas letztendlich verwendet wird, ist davon abhängig, welche Materialien geschnitten und welche Qualitätsansprüche an das Werkstück 8 gestellt werden. Entstehende Partikel und Gase können mit Hilfe einer Absaugeinrichtung 11 abgesaugt werden, welche mit einer Absaugkammer verbunden ist, die sich unter der Werkstückauflage 5a befindet.

Auch die Strahlführung 3 kann mit einem Gassystem (nicht gezeigt) zur Spülung von optischen Element oder zum Bereitstellen eines spezifisch gefluteten Strahlengangs verbunden sein. Zum Beispiel wird die Laserbearbeitungsoptik im Laserbearbeitungskopf 4 mit einem Gas, üblicherweise Stickstoff, gespült oder geflutet.

Fig. 1 zeigt ferner Antriebseinheiten 7a, 7b, die es erlauben, eine Relativbewegung des Laserbearbeitungskopfs 4 bezüglich des Werkstücks 8 in der XY-Ebene durchzuführen. Z.B. kann der Laserbearbeitungskopf 4 an einem sich in Y-Richtung erstreckenden Portal 12 mittels der Antriebseinheit 7b linear verschoben werden, wobei das Portal 12 selbst mittels der Antriebseinheit 7a, z. B. einem Linearantrieb, in X-Richtung verschiebbar ist. Der Bearbeitungskopf 4 ist im Beispiel der Fig. 1 zusätzlich mit einer weiteren Antriebseinheit 7c für eine vertikale Verschiebung in Z-Richtung, d. h. senkrecht zum Werkstück 8, verschiebbar. Somit kann der Fokus des Laserstrahls 6 entlang der Dicke des Werkstücks 8 eingestellt werden. Eine Steue-

rungseinheit 14 kontrolliert die Laserbearbeitungsanlage 1 und insbesondere den Strahlerzeuger 2 und die Antriebseinheiten 7a, 7b, 7c.

Die Verfahrswege der Antriebseinheiten 7a, 7b definieren einen maximalen Bearbeitungsbereich 15 in der XY-Ebene, der für die Bearbeitung des Werkstücks 8 zur Verfügung steht und innerhalb dessen der Bearbeitungskopf 4 positioniert werden kann. Üblicherweise ergibt sich aufgrund der Mechanik ein Rahmenbereich 17 um den maximalen Bearbeitungsbereich 15, der in der XY-Ebene beispielsweise eine Breite von einigen Zentimetern bis zu einigen Metern aufweist. Der Rahmenbereich 17 bedingt somit üblicherweise einen auf jeden Fall vorhandenen Abstand zwischen einem Benutzer, der sich im Bereich einer Personenzugangszone 19 frei bewegen darf, und einer Prozesszone 21, in der der aus dem Bearbeitungskopf 4 austretende Laserstrahl 6 auf das Werkstück 8 auftrifft und in der der Bearbeitungsprozess stattfindet. Entsprechend muss Strahlung, die durch Reflexion oder Streuung des Laserstrahls entstehen kann, mindestens eine Weglänge D_{min} zwischen der Personenzugangszone 19 und der Prozesszone 21 durchlaufen. Der Rahmenbereich 17 führt somit zu einem auf jeden Fall vorhandenen Zwischenraum zwischen Benutzer und Prozesszone. Je nach Position der Prozesszone 21 bildet dieser minimale Zwischenraum zusammen mit dem Raum zwischen Rahmenbereich 17 und Prozesszone 21 den Zwischenraum zwischen Prozesszone 21 und Personenzugangszone 19.

Die Weglänge D_{min} entspricht der jeweiligen Breite des Rahmenbereichs 17 und ist in Fig. 1 durch den Abstand zwischen einer Außenkante 23a eines Gehäuses 23 der Werkstücklagerungseinheit 5 und einem Außenrand 15a des Bearbeitungsbereichs 15 gegeben. Soll sich der Benutzer auch über die Werkstücklagerungseinheit 5 beugen dürfen, so vergrößert sich die Personenzugangszone 19 über den äußeren Randbereich der Werkstücklagerungseinheit 5. Entsprechend reduziert sich entweder die Ausdehnung des maximalen Bearbeitungsbereichs 15, falls die Weglänge D_{min} gleichbleiben soll, oder die Breite des Rahmenbereichs 17, wobei dann auch die evtl. zur Absorption zur Verfügung stehende Weglänge D_{min} kleiner wird.

Die Laserbearbeitungsanlage 1 befindet sich (beispielsweise zusammen mit mehreren Anlagen) in einer Fabrikhalle, sodass die verschiedenen Komponenten von Luft umgeben sind. Insbesondere befindet sich Luft oberhalb der Werkstückauflage 5a und damit zwischen der Prozesszone 21 und dem Benutzer. Der Benutzer hat aus der Personenzugangszone 19 im Wesentlichen freie Sicht auf die Prozesszone 21. In der Ausführungsform gemäß Fig. 1 mag

die freie Einsichtnahme durch Komponenten wie dem Portal 12 je nach Position des Benutzers und Position der Prozesszone 21 eingeschränkt sein. Aufgrund des auf Absorption in der Umgebungsluft basierenden Laserschutzes ist der Innenraum der Laserbearbeitungsanlage 1 im Wesentlichen frei von der Personenzugangszone 19 einsehbar und ist insbesondere in deren Randbereich nicht mit einer Schutzwand versehen.

Schutzwände und Schutzgehäuse sind üblicherweise aus Blech als Beispiel eines festen, nicht Laserlicht durchlässigen Materials geformt und können spezielle absorbierende Fenster zum Einsehen und Überwachen der Bearbeitung aufweisen. Derartige Fenster sind aufgrund des auf Absorption in der Umgebungsluft basierenden Laserschutzkonzepts bei den hierin offenbarten Anlagen nicht notwendig.

In einigen Ausführungsformen ist ein Teil der Laserbearbeitungsanlage 1 mit einer Schutzwandstruktur, beispielsweise einer Abdeckung und/oder einer oder mehreren Seitenwände, versehen, jedoch bleibt zur Betreuung der Laserbearbeitungsanlage 1 die Personenzugangszone 19 zumindest in Teilbereichen weiterhin offen, d.h. frei von der Laserwellenlänge wesentlich absorbierenden oder abhaltenden festen Strukturen. In einigen Ausführungsformen könnte ein einfacher flexibler Trennvorhang aus Kunststoff zur räumlichen Trennung vorgesehen werden, der selbst allerdings nicht wesentlich für die Erfüllung von Laserschutzvorschriften ist.

Das hierin vorgeschlagene Konzept eines auf Absorption in der Umgebungsluft basierenden Schutzes setzt voraus, dass das Lasersystem, insbesondere der Strahlerzeuger 2, einen Laserstrahl in einem Wellenlängenbereich erzeugt, der in der Umgebungsluft ausreichend absorbiert wird.

Fig. 2 verdeutlicht das auf Absorption in der Umgebungsluft basierende Schutzkonzept schematisch für eine Werkstücklagerungseinheit 5, die den Bearbeitungsbereich 15 mit dem Außenrand 15a bereitstellt. Innerhalb des Bearbeitungsbereichs 15 kann eine Laserbearbeitungsoptik 4a frei positioniert werden, d.h. maximal kann die Prozesszone 21 am Außenrand 15a liegen. Für diese Lage der Prozesszone 21 ist schematisch ein Intensitätsverlauf in Y-Richtung für den Fall angedeutet, dass die Wellenlänge des Laserstrahls auf eine Absorptionslinie von Luft eingestellt wurde.

Gemäß dem Lambert-Beerschen Gesetz, welches die Abschwächung der Leistung einer Strahlung bei dem Durchgang durch ein absorbierendes Medium beschreibt, ist die hindurchtretende Strahlungsleistung $P(x)$ gegeben durch $P(x) = P_0 e^{-dx}$, wobei P_0 die eintretende Leistung, d der Absorptionskoeffizient (z.B. in m^{-1}) und x die zurückgelegte Weglänge im absorbierenden Medium ist (z.B. in m). Der exponentielle Abfall ist schematisch in Fig. 2 gezeigt. Ist die Absorption stark genug, beispielsweise bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von mindestens 20 %, kann über eine Länge von z.B. 1 m die Strahlintensität auf einen Wert fallen, der unschädlich für ein Auge 30 eines Benutzers ist.

In der Atmosphäre ist der Absorptionskoeffizient d stark von der Wellenlänge abhängig. Figuren 3 und 4 zeigen für die Atmosphäre eines US-amerikanischen Sommers Absorptionsspektren, wobei Absorptionskoeffizienten d in cm^{-1} für die Wellenlängenbereiche von 1,45 μm bis 2,5 μm (Fig. 3) bzw. von 2,0 μm bis 5 μm (Fig. 4) aufgetragen wurden. Ergänzend zeigt Fig. 5 die Absorption im Wellenlängenbereich von 1,8 μm bis 1,95 μm in einer höheren Auflösung. Die Graphen der Figuren 3 bis 5 wurden mit Hilfe der Datenbank „HITRAN on the Web“ (<http://hitran.iao.ru/>) erstellt.

Den Graphen können für eine gute Absorption des Laserstrahls in der Atmosphäre Laseremissionswellenlängen in den Bereichen von 1,8 μm bis 2,0 μm (Absorptionskoeffizienten bis ca. 0,04 cm^{-1}) oder 2,4 μm bis 2,9 μm (Absorptionskoeffizienten bis ca. 0,35 cm^{-1}) oder 4,2 μm bis 4,4 μm (Absorptionskoeffizienten bis ca. 0,12 cm^{-1}) entnommen werden. Ein weiterer Bereich mit erhöhter Absorption liegt zwischen 4,8 μm bis 7,8 μm (nicht gezeigt). In diesen Bereichen gibt es spektrale Bereiche mit sehr hoher Absorption (Absorptionslinien mit Linienbreiten im Bereich von einigen nm) und spektrale Bereiche mit sehr geringer Absorption.

Zur Verwirklichung des auf Luftabsorption basierenden Schutzkonzepts ist das Lasersystem entsprechend schmalbandig auf einen Bereich mit hoher Absorption einzustellen. Laseremission in diesen Wellenlängenbereichen ist mit Festkörperlasern, insbesondere mit Faserlasern, Scheibenlasern, Stablasern, sowie mit Gaslasern realisierbar. Dabei können spektrale Breiten von 1 nm und weniger erzielt werden.

In Wellenlängenbereich bis zu maximal ca. 2,2 μm können Lichtleitfasern basierend auf Quarzglas für die Übertragung des Laserlichts über eine größere Distanz eingesetzt werden.

Entsprechend sind die Wellenlängenbereiche bis zu $2,2\text{ }\mu\text{m}$ insbesondere für auf Faserlaser basierende Strahlerzeuger interessant. Fasern basierend auf anderen Gläsern z.B. Fluoridgläser (ZBLAN) können des Weiteren bis $6\text{ }\mu\text{m}$ Wellenlänge eingesetzt werden.

Eine angestrebte maximale spektrale Breite des Lasers hängt unter anderem von der Temperatur, dem Luftdruck, der genauen chemische Zusammensetzung sowie der relativen Feuchte der Atmosphäre ab, da diese die Linienbreite der Absorption mitbeeinflussen. Die Luftfeuchte der Umgebungsluft kann mit dem Wetter variieren, sie kann aber auch durch spezielle Rahmenbedingungen bei einer Laserbearbeitung beeinflusst werden. Tendenziell kann eine höhere Absorption mit spektral schmalen Lasern erzielt werden (beispielsweise spektrale Breiten kleiner 1 nm FWHM), da dann die spektrale Breite optimal auf das Maximum einer Atmosphärendämpfungslinie angepasst werden kann und somit eine optimierte Absorptionswirkung erzielt werden kann.

Wie aus den Figuren 3 bis 5 ersichtlich existieren in der Atmosphäre viele Spektralbereich mit hoher Transmission und viele Spektralbereiche mit geringer Transmission. Diese Bereiche können mit vielen verschiedenen Lasern adressiert werden. Die folgenden Erläuterungen stellen keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sie sollen vielmehr die Möglichkeiten beim Design entsprechender Strahlerzeuger aufzeigen. Allgemein hat die Verwendung von Faserlasern als Strahlerzeuger 2 den Vorteil eines nicht-offenen, d.h. nicht der Luft ausgesetzten, Resonators. Allerdings können auch Scheibenlaser und Stablaser mit evakuiertem Resonator oder mit einem Resonator in z.B. Stickstoffatmosphäre auf die benötigten Wellenlängen eingestellt werden.

Allgemein kann die Emission durch die Dotierung eines Festkörperlasermediums eingestellt werden. So kann beispielsweise ein YAG Wirtskristall durch Dotierung mit Ho^{3+} , Er^{3+} , Cr^{3+} und/oder Tm^{3+} auf eine Laserwellenlänge eingestellt werden, die im Bereich eines Absorptionsmaximums (oder mehrerer nahe beieinander liegender Absorptionsmaxima) der Atmosphäre liegt. Ein verfügbarer Laser ist ein Thulium-dotierter (Tm^{3+}) Faserlaser, der in einem Spektralbereich von $1,8\text{ }\mu\text{m}$ bis $2,1\text{ }\mu\text{m}$ emittiert. Durch Anpassung der Rückkopplung des Faserlaserresonators über ein oder mehrere Fiber Bragg Gratings (FBGs) kann der Laser auf ein Absorptionsmaximum der Atmosphäre eingestellt werden. Die Rückkopplung des FBGs, welche sich aus der Bragg-Bedingung ergibt, kann über den Abstand der in den Faserkern eingeschriebenen Brechzahlerhöhungen eingestellt werden. Des Weiteren kann auch die

spektrale Breite der Rückkopplung über den variierenden Abstand der einzelnen Brechungsindexerhöhungen zueinander festgelegt werden. Um die variierenden Abstände der Brechungsindexerhöhungen in der Faser optimal auf die Absorption in der Atmosphäre abzustimmen kann beispielsweise die Phasenmaskentechnologie eingesetzt werden.

Eine Abschätzung des benötigten Absorptionsweges für eine Laserwellenlänge von $1,8\ \mu\text{m}$ für obigen (Tm³⁺)-Faserlaser ergibt für einen außergewöhnlich stark reflektierten Strahl aus der Prozesszone von 1000 W und bei Zugrundelegung eines Absorptionskoeffizient von z.B. $0,03\ \text{cm}^{-1}$ (unter Verwendung der oben angegebenen Formel für das Lambert-Beersche Gesetz) eine Abschwächung der Strahlung nach 1 m auf 49 W, nach 2 m auf 2,5 W und nach 3 m auf 0,12 W. Dabei wurden eine Strahlaufweitung und eine damit einhergehende weitere Reduzierung der Intensität noch nicht berücksichtigt. Wird diese zusätzlich berücksichtigt, kann in manchen Ausführungsformen z.B. nach 1 m oder weniger die Lasernorm DIN EN 60825-1 erfüllt werden.

Eine deutlich gesteigerte Absorption erfährt ein Erbium-dotierter (Er³⁺) Fluoridglas-Faserlaser, welcher im Spektralbereich von $2,7\ \mu\text{m}$ bis $2,9\ \mu\text{m}$ emittieren kann. Hier liegen Absorptionsmaxima der Atmosphäre vor, die 10-mal höher sind als die für den Tm³⁺-Faserlaser. Eine vergleichbare Beispielrechnung zeigt, dass bei einem Absorptionskoeffizient von $0,3\ \text{cm}^{-1}$ 1000 W Laserleistung nach 1 m bereits auf 90 pW abfallen.

Wie bereits angemerkt, beruht die absorbierende Wirkung der umgebenden Atmosphäre hauptsächlich auf der Anwesenheit von Wasserdampf in der Atmosphäre. Eine zu trockene Luft, d.h. zu geringe Luftfeuchtigkeit, kann daher dazu führen, dass kein ausreichende Absorption und damit unzureichender Strahlenschutz gegeben ist.

Entsprechend kann die Laserbearbeitungsanlage zur Überwachung und Gewährleistung der Absorption nach dem hierin offenbarten Konzept mit einem oder mehreren Feuchtesensoren ausgerüstet werden. Diese überwachen die Umgebungsluft permanent während des Betriebs, sodass eine Regelung (z.B. der verwendbaren Laserleistung und/oder der Vorschubgeschwindigkeit des Bearbeitungskopfs 4 und/oder des verwendbaren Bearbeitungsbereichs 15) und/oder ein Alarmsignal ausgelöst werden kann, wenn ein erster Grenzwert unterschritten wird. Wird z.B. der Vorschub reduziert, kann es zu einem verminderten Strahlungsausstritt aus der Prozesszone 21 kommen und die in der umgebenden Luft vorliegende Strahlungsabsorp-

tion kann wieder einen sicheren Betrieb gewährleisten. Beim Unterschreiten eines weiteren Grenzwerts kann dann beispielsweise der Laserstrahl abgeschaltet werden. Dies kann z.B. durch Öffnen eines Interlockkreises zur Deaktivierung der Laserquelle und/oder durch Schließen einer Blende/eines Shutters erfolgen.

Fig. 1 zeigt beispielhaft Feuchtesensoren 31 an den Ecken der Werkstücklagerungseinheit 5. Die Position und Anzahl der Feuchtesensoren ist durch die Geometrie der abzusichernden Personenzugangszone(n) in Bezug zu den einnehmbaren Positionen der Prozesszone 21 bedingt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass zwischen der Prozesszone 21 und dem Benutzer möglicherweise die Raumluft z.B. durch Luftströme von Kompressorkühlern lokal beeinflusst werden kann.

Da es sich bei dem Feuchtesensor um ein sicherheitsrelevantes Element handelt, wird vorzugsweise eine Kombination von zwei oder mehreren Feuchtesensoren eingesetzt, wobei auch die Verkabelung nach sicherheitsrelevanten Aspekten ausgelegt wird.

Da das Lasersystem spektral auf eine hohe Wasserdampfabsorption abgestimmt ist, kann eine (ungewollte) Absorption auf dem Strahlweg vom Strahlerzeuger 2 zur Prozesszone 21 gezielt vermieden oder zumindest soweit wie möglich reduziert werden. Finden beispielsweise Laser Anwendung, die im Spektralbereich von 1,8 μm bis 2,0 μm emittieren, so können Glasfasern aus Quarzglas zur Lichtleitung eingesetzt werden. Da mit zunehmendem OH-Gehalt, aber auch aufgrund von zunehmender intrinsischer Infrarot-Absorption, des für die Faser verwendeten Glases die Dämpfung in diesem Spektralbereich zunimmt, sind für die Übertragung der Laserleistung zwischen Strahlerzeuger 2 und Bearbeitungskopf 4 und/oder auch als aktive Faser eines Faserlasers (als Beispiel für einen Strahlerzeuger 2) OH-Gehalt arme Fasern (so genannten wasserarme Fasern) einsetzbar. Beispielsweise weisen Glasfasern aus Quarzglas einen OH-Gehalt viel kleiner als 1000 ppm auf. Bevorzugt sind Konzentrationen von ca. 1 ppm und weniger. Dadurch kann die IR-Transmission des Lasersystems erhöht werden.

Ebenso kann im Bereich einer Freistrahlführung und in der Laserbearbeitungsoptik 4a eine unerwünschte Absorption vermieden oder zumindest soweit wie möglich reduziert werden. Beispielsweise kann die Strahlführung inklusive des Bearbeitungskopfs 4 mit einer auf einem nicht-abschwächenden Gas basierenden Spülung, wie z.B. mit getrocknetem Stickstoff (dessen Feuchtigkeitsanteil beispielsweise hinsichtlich eines Maximalwerts überwacht wird), ab-

sorptionsarm gehalten werden. Die im Bearbeitungskopf verwendeten Linsen sind ebenfalls aus einem Material mit geringer Absorption, sodass sich die Linsen möglichst nicht zu sehr erwärmen.

Um ferner den Laserstrahl auf dem Weg zwischen dem Austritt aus der Laserbearbeitungsoptik 4a und der Oberfläche des Werkstücks 8 nicht durch die durchstrahlte Atmosphäre zu dämpfen, kann im Bereich des Laserstrahlaustritts ein absorptionsarmes Gas ausgeströmt werden. Auch hier können besonders getrocknete Prozessgase verwendet werden, z.B. Stickstoff oder Sauerstoff, deren Feuchtigkeitsanteile ebenfalls hinsichtlich eines Maximalwerts überwacht werden können. Derartige Gase können ohnehin für den Laserschneidprozess z.B. zum Schmelzaustrieb bzw. Brennschnitt eingesetzt werden. Ebenso kann beim Laserschweißen der Laserstrahl in einer dämpfungsarmen (möglichst wasserfreien) Schutzgas-Atmosphäre auf die Blechoberseite geführt werden.

Um die Dämpfung des Laserstrahls zu verhindern oder zumindest so gering wie möglich zu halten, ist es somit von Vorteil, wenn der Wasserdampfanteil in den eingesetzten Spül- und Prozessgasen gering gehalten wird, wenn also sogenannte getrocknete Gase eingesetzt werden.

Sowohl für die die Bearbeitung unterstützenden Gase als auch für die Spülgase des Lasersystems weist die Laserbearbeitungsanlage 1 ein Trockengassystem 10 auf, in dem getrocknete Gase, d.h. Gase 10a mit einem geringen Wasserdampfanteil beispielsweise unter 5 ppm H₂O bereitgestellt werden. Somit wird verhindert, dass Wasserdampf in den Gasen unerwünscht die von dem Strahlerzeuger 2 bereitgestellte Leistung dämpft.

Die in Fig. 2 gezeigte Laserbearbeitungsoptik 4a ermöglicht das Spülen oder Fluten sowie das Bereitstellen eines absorptionsarmen Strahlaustritts. Das Laserlicht wird über eine Lichtleitfaser 39 einem Gehäuse 41 zugeführt. In diesem sind Linsen (beispielsweise eine Kollimationslinse 43a und eine Fokussierungslinse 43b) beabstandet angeordnet, sodass sich ein mit Gas gefüllter Innenraum 45 zwischen den beiden Linsen und zwischen der Kollimationslinse 43a und einer Fasereinkoppelseite des Gehäuses 41 ausbildet. Über einen oder mehrere Anschlüsse 47 kann der Innenraum 45 mit getrocknetem Stickstoff zur Vermeidung einer Dämpfung innerhalb der Laserbearbeitungsoptik 4a geflutet/gespült werden. Die Linsen 43a und 43b

sind beispielsweise aus Heraeus Suprasil® 3002 bzw. 300 mit einem OH-Gehalt von ca. 1 ppm OH bzw. kleiner 1 ppm OH ausgebildet.

Im Anschluss an die Austrittslinse 43b weist die Laserbearbeitungsoptik 4a zusätzlich eine an die Strahlverjüngung angepasste Schürze 49 auf. Über einen Anschluss 51 wird das getrocknete Prozessgas nahe der Linse 43a zugeführt und dann gezielt und in möglichst geringer Menge entlang des Strahlwegs ausgeströmt, sodass der Laserstrahl 6 keine Umgebungsluft durchstrahlt und entsprechend kaum Absorption vor der Wechselwirkung mit dem Werkstück 8 erfährt.

Die Figuren 6 bis 8 zeigen jeweils vereinfachte Aufsichten auf Laserbearbeitungsanlagen, bei denen das auf Absorption in der Umgebungsluft basierende Schutzkonzept in unterschiedlichen Weisen integriert ist.

In Fig. 6 ist eine Laserbearbeitungsanlage 100 mit einer Werkstücklagerungseinheit 105 gezeigt, wobei eine Personenzugangszone 119 sich vollständig um die Werkstücklagerungseinheit 105 erstreckt.

Im speziellen weist die Laserbearbeitungsanlage 100 zusätzlich eine an der Werkstücklagerungseinheit 105 bewegbar angebrachte Positioniereinheit 120 zum Positionieren eines Laserbearbeitungskopfes 104 auf. Die Positioniereinheit 120 erlaubt es, den Laserbearbeitungskopf 104 derart zu verfahren, dass sich eine von der Position des Laserbearbeitungskopfes 104 abhängige Prozesszone für die Wechselwirkung mit einem Werkstück 108 innerhalb eines Bearbeitungsbereichs 115 einstellen lässt.

Laserbearbeitungsanlage 100 weist ferner einen Laserstrahlerzeuger 102 auf, von dem über eine Lichtleitfaser 139 Laserlicht zum Laserbearbeitungskopf 104 geführt wird. Im Laserbearbeitungskopf 104 wird das Laserlicht umgelenkt und als Laserstrahl auf das Werkstück 108 fokussiert. Aufgrund der Wechselwirkung mit dem Werkstück 108 oder auch der Oberfläche der Werkstücklagerungseinheit 105 kann Laserstrahlung in die verschiedensten Richtungen reflektiert oder gestreut werden. Diese Strahlung 106a, die auf den Laserstrahl zurückgeht, wird beispielhaft mit Pfeilen in Fig. 6 angedeutet.

Zur Steuerung des Strahlerzeugers 102 sowie der Positioniereinheit 120 weist die Laserbearbeitungsanlage 100 ferner ein Bedienpult 160 auf, dass über Datenverbindungen 162 mit einer Steuerungseinheit 164 verbunden ist. Steuerungseinheit 164 ist zur Steuerung des Laserstrahlerzeugers sowie der Positioniereinheit 120 und der Werkstücklagerungseinheit 105 ausgebildet. Steuerungseinheit 164 kann ein oder mehrere Bauteile aufweisen, die zum Durchführen von Systemsteuerungen ausgebildet sind, zum Beispiel einen Speicher zum Speichern von Tabellen von Wasserdampfanteil-Mindestabsorptionsweglängen für spezifische Laseremissionswellenlängen, eine Sekundärspeichervorrichtung und einen Prozessor, wie zum Beispiel eine zentrale Recheneinheit. Ein Fachmann wird erkennen, dass die Steuerungseinheit 164 zusätzliche oder andere Bauteile beinhalten kann. Verschiedene andere Schaltkreise, wie zum Beispiel Leistungsversorgungsschaltkreise, Eingabeschaltkreise und/oder andere allgemein bekannte Schaltkreise, Inter-Lock-Systeme und kabelgebundene und kabellose Datenverbindungen können der Steuerungseinheit 164 zugehörig sein.

In Fig. 6 ist zur Verdeutlichung des Schutzkonzepts ferner ein Außenrand 115a des Bearbeitungsbereichs 115 angedeutet. Der Außenrand 115a verläuft beispielsweise parallel zu einer Gehäusekante 23a der Werkstücklagerungseinheit 105. Dadurch ist ein Mindestabstand (entsprechend eine Mindestweglänge D_{min}) zwischen einer möglichen Position der Prozesszone und damit des Ortes der Stahlreflektion oder Strahlstreuung zu einer Person, die sich in der Personenzugangszone 119 aufhält, gegeben. Der Abstand des Außenrands 115a des Bearbeitungsbereichs 115 zum Außenrand 123a der Werkstücklagerungseinheit 105 kann üblicherweise so groß gewählt werden, dass ein Mindestabstand zwischen der Position der Prozesszone und einer sich in der Personenzugangszone 119 aufhaltenden Person immer gegeben ist. Soll sich der Benutzer auch über den Rahmenbereich beugen dürfen, reduziert sich entweder die Ausdehnung des Bearbeitungsbereichs 115 oder die Breite eines Rahmenbereichs 117 und entsprechend die Weglänge D_{min} . Verringert sich die Breite des Rahmenbereichs 117, so müssen Absorptionsverhältnisse geschaffen werden, die eine mögliche Strahlung, die durch Reflektion und Streuung des Laserstrahls entstehen kann, möglichst schon sehr nahe an der Prozesszone 21 unter die erforderlichen Intensitäten bringen. Der in Zusammenhang mit Fig. 10 beschriebene Bearbeitungskopf kann eine entsprechend feuchte Atmosphäre um die Prozesszone 21 bereitstellen.

In Fig. 6 wird die Umgebungsluft 170, die sich oberhalb und rund um die Werkstücklagerungseinheit 105 ausbreitet und damit auch die Prozesszone umgibt, durch Punkte dargestellt.

Die Laserwellenlänge des Strahlerzeugers 102 ist auf eine Absorptionslinie der Umgebungsluft 170 eingestellt, sodass allein die Ausbreitung der reflektierten oder gestreuten Laserstrahlung 106a über eine Weglänge, die mindestens der Mindestweglänge $D_{\min}$ entspricht, zu einer erforderlichen Dämpfung führt. Die Abstimmung der Laserwellenlänge auf die Absorption der Umgebungsluft 170 ist so ausgelegt, dass auch bei einer maximalen möglichen Intensität eines reflektierten Laserstrahls diese in der Personenzugangszone 119 zu einer Intensität führt, welche unter einem erforderlichen Wert für den Laserschutz liegt.

Da die Absorption in der Umgebungsluft wesentlich von der Luftfeuchtigkeit abhängt, weist die Laserbearbeitungsanlage 100 zusätzlich Feuchtesensoren 131 auf, die die Feuchtigkeit der Umgebungsluft 170 messen. Dabei sind die Feuchtesensoren 131 derart angeordnet, dass sie ausreichend Information über die Luftfeuchtigkeit in einem Rahmenbereich 117 liefern. Der Rahmenbereich 117 wird durch den Außenrand 115a und der Gehäusekante 123a begrenzt und entspricht in seiner Breite einem minimalen Weg, den reflektiertes/gestreutes Licht zu einem Benutzer zurücklegen wird. Der Rahmenbereich 117 stellt somit einen minimalen Zwischenraum zwischen der Prozesszone 21 und der Personenzugangszone 119 dar.

Beispielhaft sind in Fig. 6 vier Feuchtesensoren an den jeweiligen Ecken angeordnet. Weitere Feuchtesensoren können beispielsweise am Bearbeitungskopf oder in regelmäßigen Abständen entlang der Gehäusekante 123a angeordnet werden. In Fig. 6 ist ferner ein zugeordneter Abschnitt 131a schematisch illustriert, der einem der an der Ecke angeordneten Feuchtesensoren 131 zugeordnet ist. Zur vollständigen Überwachung kann die Anzahl der Feuchtesensoren und die ihnen zugeordnete Größe des Abschnitts 131a auf den zu überwachenden Grenzbereich zur Personenzugangszone 119 und die Homogenität der Luftfeuchtigkeit in diesem Bereich abgestimmt werden.

Die Feuchtesensoren 131 sind ebenfalls über die Datenverbindungen 162 mit der Steuerungseinheit 164 verbunden. Stellt einer der Feuchtesensoren 131 einen Feuchtigkeitswert für den ihm zugeordneten Volumenbereich der Umgebungsluft fest, wird dieser an die Steuerungseinheit 164 übertragen. Die Steuerungseinheit 164 kann dann den Strahlerzeuger 102 in seiner Leistung entsprechend dem gerade vorliegenden Absorptionskoeffizienten reduzieren, ganz ausschalten oder den Vorschub des Bearbeitungskopfs 104 vermindern. Alternativ kann die Steuerungseinheit 164 den Bearbeitungsbereich 115 verkleinern und dadurch den Zwischenraum zwischen Prozesszone und Personenzugangszone und entsprechend die Absorptions-

weglänge vergrößern. Beispielhaft ist ein weiterer Außenrand 115b eines verkleinerten Bearbeitungsbereichs mit einer modifizierten Mindestabsorptionsweglänge D_{min} in Fig. 6 gestrichelt dargestellt. Bei zunehmender Luftfeuchte kann ebenso der Bearbeitungsbereich 115 unter Beibehaltung der Laserschutzgewährleistung vergrößert werden. Um einen Benutzer der Laserbearbeitungsanlage 1 auf eine Abtrocknung der Umgebungsluft 170 hinzuweisen, kann die Steuerungseinheit 164 ferner ein Warnsignal ausgeben, sobald einer der Feuchtesensoren 131 eine Abnahme der Luftfeuchtigkeit in Richtung eines kritischen Luftfeuchtigkeitswerts detektiert. Ebenso kann beispielsweise eine Absperrung vorgesehen werden, die bei Bedarf (z.B. bei abnehmender Luftfeuchte oder einem vorübergehend erforderlichen nahen Heranfahren des Laserkopfes an die Gehäusekante 123a) beispielsweise vertikal aus dem Rand der Werkstücklagerungseinheit nach oben ausgefahren werden kann und somit ein sich über den Rand Beugen des Benutzers in Richtung Prozesszone nicht mehr erlaubt oder beispielsweise beim horizontalen Ausfahren einen größeren seitlichen Abstand des Benutzers erzwingt. In einer Ausführungsform kann eine ausfahrbare Wand am Rand der Werkstückauflage während der Bearbeitung so weit nach oben ausgefahren werden, dass der Bediener sich nicht mehr über die Werkstückauflage beugen, aber noch darüber hinweg schauen kann.

Fig. 7 zeigt eine weitere Laserbearbeitungsanlage 200, wobei der Aufbau der Laserbearbeitungsanlage 100 aus Fig. 6 ähnelt und entsprechend ähnliche Komponenten mit den gleichen Bezugszeichen versehen sind.

Laserbearbeitungsanlage 200 weist zwei Aspekte auf, die jeweils individuell oder auch gemeinsam in Laserbearbeitungsanlagen vorgesehen werden können. Zum einen weist die Laserbearbeitungsanlage 200 eine feste Schutzwandstruktur 280 auf, die sich beispielhaft entlang zweier Seiten der Werkstücklagerungseinheit 105 erstreckt. Derartige Schutzwandstrukturen können beispielsweise vorgesehen werden, wenn kein Zugang in diesen Bereichen möglich sein soll.

Zum anderen weist die Laserbearbeitungsanlage 200 eine Lichtschrankeneinheit 282 auf. Die Lichtschrankeneinheit 282 ist dafür vorgesehen, einen Mindestabstand zwischen der Personenzugangszone 219 und der Werkstücklagerungseinheit 105 festzulegen (oder zu erhöhen). Dies entspricht einer Anpassung der Ausdehnung des Zwischenraums zwischen Personenzugangszone und Prozesszone, beispielsweise einer Verlängerung der Absorptionsweglänge, falls eine vorliegende Luftfeuchte nicht ausreicht. Dadurch ergibt sich ein Minimumabstand

D_{min} “ zwischen einem Benutzer in der Personenzugangszone 219 und den möglichen Lagen der Prozesszone im Bearbeitungsbereich 115 aus der Summe der Weglänge im Rahmenbereich 117 und der Weglänge von der Gehäusekante 123a bis zu einer Lichtschranke 284. Diesem Mindestabstand D_{min} “ kann wiederum eine Mindestluftfeuchtigkeit zugeordnet werden, die mit den Feuchtesensoren 131 überwacht und somit gewährleistet wird.

Die Lichtschrankeneinheit 282 ist ebenfalls mit der Steuerungseinheit 164 verbunden, sodass ein Durchbrechen der Lichtschranke 284 durch den Benutzer entsprechende Steuerungsmaßnahmen der Steuerungseinheit 164 auslösen kann. Beispielsweise kann die Leistung des Strahlerzeugers 102 reduziert oder auf null gesetzt werden. Alternativ kann je nach momentaner Lage der Prozesszone im Bearbeitungsbereich 115 ein Warnsignal ausgegeben werden, und, sobald sich die Prozesszone zu nah an den Außenrand 115a bewegt, kann der Strahlerzeuger 102 ausgeschaltet werden. Alternativ oder zusätzlich zu der in Fig. 7 dargestellten linearen Lichtschrankeneinheit 282 kann eine dreidimensionale Überwachung der Personenzugangszone erfolgen, sodass insbesondere im Zusammenspiel mit der Lage der Prozesszone eine personenpositionsabhängige Schutzfunktion bereitgestellt werden kann.

Mit Bezug auf die Figuren 8 und 9 werden weitere Ausführungsformen einer Laserbearbeitungsanlage 300 erläutert, in denen durch gezieltes Ausströmen eines feuchten Gasgemisches, d.h. eines Wasser- oder Wasserdampf-haltigen Gasgemisches, die Absorption von gestreuten oder reflektierten Laserlicht gezielt angehoben wird. Dies entspricht dem Ansatz einer Einstellung der Feuchtigkeit zumindest in einem Teilbereich des Zwischenraums zwischen Prozesszone und Personenzugangszone zur Erhöhung der Absorptionsrate. Zur Vereinfachung werden Komponenten der Laserbearbeitungsanlage 300, die im Wesentlichen identisch sind mit denen der zuvor beschriebenen Laserstrahlanlagen 100 und 200 mit den entsprechenden Bezugszeichen versehen.

In einer Ausführungsform wird der Aufstellungsort der Laserbearbeitungsanlage beispielsweise mit Düsen-Luftbefeuchtern, die eine großflächige, effektive und gleichmäßige Luftbefeuchtung gewährleisten, ausgerüstet. So kann beispielsweise mit Injektordüsen, die mit Druckluft und Wasser arbeiten, Wasser bei Ausströmen der Druckluft angesaugt und zerstäubt ausgeblasen werden. Derartige Systeme erlauben eine gezielte Maschinen- oder Bereichsbefeuchtung und das Gewährleisten einer entsprechenden Luftfeuchte.

Allgemein ist bei durch Befeuchtung unterstützen Laserschutzkonzepten auch die Überwachung der Wasserdampf- bzw. Wasserzuführung relevant für die Lasersicherheit. Bleibt diese aus, kann kein ausreichender Schutz mehr gegeben sein. Eine entsprechende Überwachung der Funktionsfähigkeit der Befeuchtungsanlage könnte z.B. durch einen Durchflussmesser in der Zuführung oder durch einen Füllstandsanzeiger in einem Vorratsgefäß erfolgen.

In einer weiteren Ausführungsform gemäß Fig. 8 wird im Bereich des Laserbearbeitungskopfs 104 um eine Prozesszone 321 die Umgebungsluft 170 befeuchtet. Dazu weist die Laserbearbeitungsanlage 300 eine Ausströmungsvorrichtung 390 auf, die sich beispielhaft rund um die Laserbearbeitungsoptik erstreckt. In der schematischen Schnittdarstellung der Fig. 9 ist entsprechend eine Kammer 392 der Ausströmungsvorrichtung 390 dargestellt, die den Bereich um eine fokussierende Austrittslinse 343b umgibt und der ein feuchtes Gasgemisch 394 zugeführt wird. Öffnungen 396 der Kammer 392 erlauben ein gleichmäßiges Austreten des feuchten Gasgemisches parallel zu einem fokussierten Laserstrahl 306. Dadurch bildet sich ein ringförmiger Feuchtigkeitsvorhang (als Feuchtigkeitsabschnitt 398a mit erhöhtem Wasserdampfanteil in Fig. 9 gekennzeichnet) um die Prozesszone 321. Eine sich entlang des Laserstrahls erstreckende Schürze 349 kann zusätzlich ein Eindringen des feuchten Gasgemisches in die Prozesszone 321 erschweren und damit eine unerwünschte Absorption des fokussierten Laserstrahls 306 vor dem Werkstück 308 reduzieren.

Beispielhaft sind mehrere Positionen für Feuchtesensoren zur Überwachung der Luftfeuchtigkeit des feuchten Gasgemisches 394 in den Fig. 8 und 9 gezeigt. So können Feuchtesensoren innerhalb der Kammer 392 oder zwischen den Öffnungen 396 oder an der Schürze 349 angeordnet sein.

Die Verwendung von trockenen Prozessgasen, die beispielsweise durch Anschluss 351 entlang des Strahlengangs auf das Werkstück 308 gelenkt werden, kann ferner einem Eindringen der befeuchteten Umgebungsluft in die Prozesszone 321 entgegenwirken. Beispielhaft ist in Fig. 9 ein Gasstrahl 399 angedeutet. Bei Beginn einer Laserbearbeitung kann Gasstrahl 399 durch mehrere Spülstöße unter anderem eingedrungene Luft in der Schürze 349 aus dem Strahlengang entfernen. Gleiches gilt für die Bearbeitungsoptik.

Eine Anordnung der Ausströmungsvorrichtung 390 um die Prozesszone 321 gewährleistet ein zusätzliches Abschirmen der Laserstrahlung unabhängig von der Position der Prozesszone

321 bezüglich der Personenzugangszone 319. Allerdings wird im Gegenzug das Werkstück 8 nahe der Prozesszone 321 zusätzlicher Feuchtigkeit ausgesetzt. Um unerwünschte Effekte der Laserbearbeitung des Werkstücks 308 zu verhindern, kann entsprechend die Feuchtigkeit des feuchten Gasgemisches an die verschiedenen Bearbeitungsprozesse angepasst, demineralisiertes Wasser eingesetzt oder das Wasser mit einem Korrosionsschutz versehen werden. Alternativ kann eine geringere Feuchtigkeit des eingesetzten Gasgemisches zur Gewährleistung einer erforderlichen Absorption durch eine Verbreiterung des Feuchtigkeitsvorhangs kompensiert werden.

In den Fig. 8 und 9 ist eine weitere Ausströmungsvorrichtung 390a gezeigt, die in Ergänzung oder alternativ zur Ausströmungsvorrichtung 390 eingesetzt werden kann. Die Ausströmungsvorrichtung 390a erstreckt sich entlang des Rahmenbereichs 117 und erhöht in einem sich entsprechend erstreckenden Feuchtigkeitsabschnitt 398b gezielt die Luftfeuchtigkeit. In der beispielhaften Ausführung in Fig. 8 erstreckt sich die Ausströmungsvorrichtung 390a entlang zweier aneinander angrenzender Seiten, wobei die verbleibenden zwei Seiten beispielhaft durch eine Schutzwandstruktur 380 abgesichert werden.

Auch die Ausströmungsvorrichtung 390a weist eine Kammer 392a auf, in die ein feuchtes Gasgemisch 394 einströmt und über Öffnungen 396a als Feuchtigkeitsvorhang in Richtung der Werkstücklagerungseinheit 5 ausströmt. Eine vertikale Länge L des Feuchtigkeitsvorhangs ist derart ausgelegt, dass ein offener Zugang zu der Prozesszone 321 aus der Personenzugangszone 319 heraus besteht. Bei Bedarf kann zusätzlich eine Schutzwandabdeckung oberhalb der Ausströmungsvorrichtung 390a vorgesehen werden.

Fig. 10 zeigt eine schematische Schnittdarstellung eines Laserbearbeitungskopfes 404 mit einem integrierten Befeuchtungssystem und einem Feuchtesensor. Der Laserbearbeitungskopf 404 kann beispielsweise beim Laserschneiden eingesetzt werden, bei dem ein heißes Werkstück durch Besprühen mit Wasser gekühlt wird. Durch die Wasserkühlung kann insbesondere bei großen Materialdicken die Ausbildung eines Temperaturunterschiedes zwischen den Materialseiten reduziert werden.

Durch den Sprühnebel sowie durch die Verdampfung des aufgesprühten Wassers wird lokal die Luftfeuchte erhöht. Entsprechend dem hierin beschriebenen Schutzkonzept wird somit Laserstrahlung, die in der Prozesszone reflektiert oder gestreut wird, schon sehr nahe an der

Prozesszone absorbiert, sodass gegebenenfalls schon nahe am Laserbearbeitungskopf 404 Intensitätswerte erreicht werden können, die einen weiteren Schutz nicht mehr erforderlich machen oder die eine sich anschließende Absorption in der Luft auf einer reduzierten Weglänge ausreichen lassen.

Insbesondere zeigt Fig. 10 einen Grundkörper 414, eine am Grundkörper 414 befestigte Düsenhalterung 416 und eine an der Düsenhalterung 416 befestigte Wasser-Sprühdüse 418. Ein fokussierter Laserstrahl 406 verläuft durch den Grundkörper 414, die Düsenhalterung 416 und die Wasser-Sprühdüse 418, tritt durch eine Austrittsöffnung 410 aus und trifft auf ein Werkstück 408 in einer Prozesszone 421. Dadurch bildet sich beispielsweise ein Schnittspalt 409 in dem Werkstück 408 aus.

In einer Ausführungsform wird ein Prozessgas 494 in den Grundkörper 414 eingeführt, so dass dieses wie der Laserstrahl durch die Austrittsöffnung 410 entlang dessen Ausbreitungsrichtung austritt und beispielsweise den Bearbeitungsprozess unterstützt.

Der Laserbearbeitungskopf 404 weist ferner ein Wasserzuführsystem 452 auf. Dieses ist in Fig. 10 durch einen Wasserkanal 454, einen Ringkanal 456, und einer – in Fig. 10 ringförmig ausgebildeten – Wasseraustrittsöffnung 458 angedeutet. Das Wasserzuführsystem 452 ist mit einem Wasserreservoir verbunden, in dem sich z. B. demineralisiertes Wasser befindet.

In der Ausführungsform gemäß Fig. 10 sind der Ringkanal 456 und die Wasseraustrittsöffnung 458 in die Wasser-Sprühdüse 418 integriert. In Fig. 10 erstreckt sich die Wasseraustrittsöffnung 458 ringförmig um die Austrittsöffnung 410 des Laserstrahls 406 und ist derart ausgebildet, dass sich ein Sprühnebel 426 ringförmig um die Prozesszone 421 ausbildet und insbesondere die erwärmte Oberfläche des Werkstücks 408 befeuchtet. Dabei verdampft Wasser, sodass sich sowohl durch den Sprühnebel 426 als auch durch das verdampfte Wasser befeuchtete Bereiche 498a und 498b mit einer erhöhten Luftfeuchte um die Prozesszone 421 ausbilden.

In einer alternativen Ausführungsform, insbesondere bei eindimensional bewegbarem Laserbearbeitungskopf, ist die Wasseraustrittsöffnung nur auf einer der Vorschubrichtung zugewandten Seite des dargestellten Laserbearbeitungskopfs 404 angeordnet, sodass insbesondere aufgrund der Wechselwirkung des befeuchteten Materials mit dem Laserstrahl die Luftfeuch-

tigkeit um die Prozesszone 421 erhöht wird. Des Weiteren kann das Wasserzuführsystem 452 nicht nur Wasser sondern auch Wasserdampf bzw. befeuchtete Luft oder nur Wasserdampf bzw. befeuchtete Luft zuführen.

Der Laserbearbeitungskopf 404 weist ferner ein Feuchtesensorsystem auf, das es erlaubt die Luftfeuchte nahe der Prozesszone 421, insbesondere in den befeuchteten Bereichen 498a und/oder 498b, zu messen. Dadurch erhält ein Kontrollsystem der zugehörigen Laserbearbeitungsmaschine Informationen über die nahe der Prozesszone 421 vorliegenden Absorptionsparameter und kann entsprechend einen gesicherten Betrieb der Laserbearbeitungsmaschine gewährleisten. Ferner kann das Kontrollsystem beispielsweise zusätzliche Maßnahmen einleiten oder zurücknehmen, je nach gemessenen Feuchtwerten nahe der Prozesszone 421.

Feuchtesensoren sind allgemein bekannt und können beispielsweise auf spektroskopischen Messverfahren oder der Materialbeeinflussung durch die vorliegende Feuchte basieren. Beispielfhaft sind in Fig. 10 ein sich ringförmig um die Düsenhalterung 416 erstreckender Feuchtesensor 431a sowie ein Feuchtesensor 431b gezeigt. Feuchtesensoren 431b misst beispielsweise entlang einer optischen Messstrecke 433 den Feuchtegehalt spektroskopisch. Allgemein können ein oder mehrere Feuchtesensoren den gewünschten Überwachungsbereich nahe der Prozesszone 421 abdecken. Feuchtesensor 431b kann, insbesondere bei eindimensional bewegbarem Laserbearbeitungskopf, auf einer der Vorschubrichtung abgewandten Seite des Laserbearbeitungskopfes 404 angeordnet sein.

Die in Fig. 10 dargestellte Anordnung von Feuchtesensoren ist nur beispielhaft zu verstehen, da je nach Laserbearbeitungskopf andere Anordnungen für eine entsprechende Überwachung der befeuchteten Bereiche 498a, 498b eingesetzt werden können. Beispielsweise können die Feuchtesensoren auch direkt am Grundkörper 414 vorgesehen werden.

Alternativ oder ergänzend zu Sensoren, die die Luftfeuchtigkeit der befeuchteten Bereiche messen, können auch Sensoren eingesetzt werden, die direkt die Strahlungstransmission eines z.B. von einer Laserdiode erzeugten Strahls in den befeuchteten Bereichen 498a und/oder 498b messen.

Die vorausgehenden Ausführungsbeispiele von Laserbearbeitungsanlagen beziehen sich beispielhaft auf die Blechverarbeitung. Allerdings ist das hier beschriebene Schutzkonzept nicht

auf die Bearbeitung von plattenförmigen Werkstücken beschränkt. Vielmehr kann das Laserschutzkonzept auch bei der Bearbeitung von rohrförmigen oder dreidimensionalen variablen geformten Werkstücken und bei an Robotern angebrachten Laserbearbeitungsköpfen Anwendung finden. Ferner versteht sich, dass das hier beschriebene Laserschutzkonzept nicht nur bei einer Laserschneidmaschine, wie sie beispielhaft in Fig. 1 gezeigt wurde, sondern auch bei anderen Laserbearbeitungsmaschinen z.B. zum Laserhärten, Laserschweißen und Laserauftragsschweißen von Materialien bzw. an Stanz-Laser-Kombinationsmaschinen eingesetzt werden kann. Insbesondere kann das Laserschutzkonzept auch an Maschinen mit feststehendem oder nur in einer Richtung bewegbarem Bearbeitungskopf noch einfacher eingesetzt werden.

Es wird explizit betont, dass alle in der Beschreibung und/oder den Ansprüchen offenbarten Merkmale als getrennt und unabhängig voneinander zum Zweck der ursprünglichen Offenbarung ebenso wie zum Zweck des Einschränkung der beanspruchten Erfindung unabhängig von den Merkmalskombinationen in den Ausführungsformen und/oder den Ansprüchen angesehen werden sollen. Es wird explizit festgehalten, dass alle Bereichsangaben oder Angaben von Gruppen von Einheiten jeden möglichen Zwischenwert oder Untergruppe von Einheiten zum Zweck der ursprünglichen Offenbarung ebenso wie zum Zweck des Einschränkung der beanspruchten Erfindung offenbaren, insbesondere auch als Grenze einer Bereichsangabe.

Patentansprüche

1. Laserbearbeitungsanlage (1) zum Bearbeiten eines Werkstücks (8) mit einem Laserstrahl (6) mit:

einem Lasersystem zum Bereitstellen des Laserstrahls (6) für eine Wechselwirkung mit dem Werkstück (8) in einer von Umgebungsluft (170) umgebenen Prozesszone (21), wobei der Laserstrahl (6) auf eine von der Umgebungsluft (170) absorbierte Wellenlänge eingestellt ist, und

einer Werkstücklagerungseinheit (5) zum Lagern des Werkstücks (8), wobei die Werkstücklagerungseinheit (5) zur offenen Einsichtnahme eines Benutzers in die Prozesszone (21) aus einer während des Betriebs der Laserbearbeitungsanlage (1) zugänglichen Personenzugangszone (19) heraus ausgebildet ist, indem die Umgebungsluft (170) einen Zwischenraum (17, 117) zwischen der Prozesszone (21) und der Personenzugangszone (19) ausfüllt.

2. Laserbearbeitungsanlage (1) nach Anspruch 1, wobei die Werkstücklagerungseinheit (5) derart dimensioniert ist, dass in der Prozesszone (21) reflektierte oder gestreute Strahlung (6a) des Laserstrahls (6) vor dem Eintritt in die Personenzugangszone (19) im Zwischenraum (17, 117) auf eine Intensität kleiner oder gleich einem vorbestimmten Wert durch Absorption in der Umgebungsluft (170), insbesondere mit einer Mindestluftfeuchte, gedämpft wurde.

3. Laserbearbeitungsanlage (1) nach Anspruch 1 oder 2, ferner mit einer Steuerungseinheit (14, 164) zur Steuerung des Lasersystems und mindestens einem mit der Steuerungseinheit (14, 164) verbundenen Feuchtesensor (31, 131), der zur Messung eines Luftfeuchtigkeitswertes ausgebildet ist, der repräsentativ für die Gaszusammensetzung zumindest in einem dem Feuchtesensor (31) zugeordneten Abschnitt (131a) des Zwischenraums (17, 117) ist.

4. Laserbearbeitungsanlage (1) nach Anspruch 3, wobei ein einem Feuchtesensor (31) zugeordneter Abschnitt (131a) sich zumindest teilweise um die Prozesszone (21) und/oder über den gesamten gasgefüllten Zwischenraum (17, 117) und/oder entlang eines Grenzbereichs zwischen Werkstücklagerungseinheit (5) und Personenzugangszone (19) erstreckt.

5. Laserbearbeitungsanlage (1) nach Anspruch 3 oder 4, wobei die Steuerungseinheit (14, 164) dazu ausgebildet ist, die Laserleistung in der Prozesszone (21) und/oder die Vorschubge-

schwindigkeit eines den Laserstrahl (6) auf das Werkstück (8) ausrichtenden Bearbeitungskopfs (4) in Abhängigkeit des gemessenen Feuchtigkeitswerts einzustellen, wobei die Steuerungseinheit (14, 164) insbesondere dazu ausgebildet ist, bei Unterschreiten eines Feuchtigkeitsschwellenwerts die Vorschubgeschwindigkeit zu reduzieren und bei Unterschreiten eines weiteren, niedrigeren Feuchtigkeitsschwellenwerts die Laserbearbeitung zu stoppen.

6. Laserbearbeitungsanlage (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, ferner mit einer Befeuchtungsvorrichtung (390, 392) zur Einstellung der Feuchtigkeit der Umgebungsluft (170) zumindest in einem Teilbereich eines Zwischenraums (17, 117) zwischen der Prozesszone (21) und der Personenzugangszone (19).

7. Laserbearbeitungsanlage (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der Zwischenraum (17, 117) in seiner Ausdehnung (D_{min}) und/oder die Gaszusammensetzung zumindest eines Teilbereichs des Zwischenraums (17, 117) in ihrer Feuchtigkeit derart einstellbar ist, dass reflektierte oder gestreute Strahlung (6a) des Laserstrahls (6) aus der Prozesszone (21) beim Ausbreiten durch den Zwischenraum (17, 117) eine derartige Absorption erfährt, dass ein Strahlungswert in der Personenzugangszone (19) unter einem vorgegebenen Grenzwert ist und beispielsweise die Anforderung der Laser Klasse 1 erfüllt, insbesondere gemäß den Anforderungen der DIN EN 60825-1 im Wellenlängenbereich von $1,4\ \mu\text{m}$ bis $4\ \mu\text{m}$ auf eine Intensität von $26\ \text{mW}/\text{cm}^2$ oder weniger bzw. im Wellenlängenbereich größer $4\ \mu\text{m}$ auf eine Intensität von $1000\ \text{W}/\text{m}^2$ oder weniger durch Absorption in der Umgebungsluft (170) gedämpft wird.

8. Laserbearbeitungsanlage (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, ferner mit einer Lichtschrankeneinheit (282), die eine Lichtschranke (284) in einem Abstand zur Werkstücklagerungseinheit (5) zum Bereitstellen einer zusätzlichen Absorptionsweglänge ausbildet und/oder
einer ausfahrbaren Wand im Randbereich der Werkstücklagerungseinheit (5).

9. Laserbearbeitungsanlage (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, ferner mit einer Ausströmungsvorrichtung (390, 392) zum Ausströmen eines feuchten Gasgemischs (394) zur Befeuchtung der Umgebungsluft (170), insbesondere zur Erhöhung der Luftfeuchtigkeit in einem Feuchtigkeitsabschnitt (398a, 398b) des Zwischenraums (17, 117).

10. Laserbearbeitungsanlage (1) nach Anspruch 9, wobei der Feuchtigkeitsabschnitt (398a, 398b) sich zumindest teilweise um die Prozesszone (21) und/oder über den gesamten Zwischenraum (17, 117) und/oder entlang eines Grenzbereichs zwischen Werkstücklagerungseinheit (5) und Personenzugangszone (19) erstreckt und/oder

wobei die Ausströmungsvorrichtung (390, 392) entlang eines Grenzbereichs zwischen Werkstücklagerungseinheit (5) und Personenzugangszone (19) oder im Bereich eines den Laserstrahl auf das Werkstück ausrichtenden Bearbeitungskopfs (4) angeordnet ist.

11. Laserbearbeitungsanlage (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Lasersystem einen Laserstrahlerzeuger (2), eine Strahlführung (3) und eine Bearbeitungsoptik (4a) aufweist, und wobei

der Laserstrahlerzeuger (2) auf eine Emission in einem der Wellenlängenbereiche zwischen $1,8\text{ }\mu\text{m}$ bis $2,0\text{ }\mu\text{m}$ oder $2,4\text{ }\mu\text{m}$ bis $2,9\text{ }\mu\text{m}$ oder $4,2\text{ }\mu\text{m}$ bis $4,4\text{ }\mu\text{m}$ oder $4,8\text{ }\mu\text{m}$ bis $7,8\text{ }\mu\text{m}$ ausgebildet ist und/oder

die Strahlführung (3) eine bezüglich der Laserwellenlänge absorptionsarme Lichtleiterfaser (39) und/oder eine mit trockenem Gas gespülte Freistrahlführung aufweist und/oder

die Bearbeitungsoptik (4a) mindestens eine bezüglich der Laserwellenlänge absorptionsarme Linse (43a, 43b) und/oder eine Trockengasspülung aufweist und/oder

wobei das Lasersystem zum Erzeugen eines Laserstrahls (6) ausgebildet ist, dessen gestreute oder reflektierte Strahlung (6a) in der Umgebungsluft (170) mit einem Absorptionskoeffizienten von mindestens $0,02\text{ cm}^{-1}$, insbesondere von mindestens $0,03\text{ cm}^{-1}$, absorbiert wird.

12. Laserbearbeitungsanlage (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, ferner mit einem Trockengassystem (10) zum Spülen von zumindest Teilen des optischen Weges des Laserstrahls (6) vor der Wechselwirkung mit dem Werkstück (8), wobei insbesondere ein Gasstrahl (399) nach dem Austreten des Laserstrahls (6) aus einer Bearbeitungsoptik (4a) des Lasersystems entlang des Laserstrahls vorgesehen ist.

13. Laserbearbeitungsanlage (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, ferner mit einer Schutzwandstruktur (280), die die Werkstücklagerungseinheit (5) mit Ausnahme des Bereichs der Personenzugangszone (19) umgibt und die zur Verhinderung der Ausbreitung von reflektierter oder gestreuter Strahlung (6a) des Laserstrahls (6) jenseits der Schutzwandstruktur (280) ausgebildet ist.

14. Laserbearbeitungsanlage (1) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, ferner mit einer Positioniereinheit (7a, 7b, 7c, 12) zum Positionieren einer Bearbeitungsoptik (4a) relativ zur Werkstücklagerungseinheit (5), wobei die Positioniereinheit (7a, 7b, 7c, 12) einen Bearbeitungsbereich (15) relativ zu einer Außenkante (23a) der Werkstücklagerungseinheit (5) definiert, und mit einer Steuerungseinheit, die zur Anpassung der Ausdehnung des Bearbeitungsbereichs (15) in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit der Umgebungsluft (170) im Zwischenraum (17, 117) ausgebildet ist.

15. Laserbearbeitungskopf (404) zur Verwendung in einer Laserbearbeitungsanlage (1) mit einer Austrittsöffnung (410) für einen Laserstrahl (406) zur Bearbeitung eines Werkstücks (408) in einer Prozesszone (421),
einem Wasserzuführsystem (452) mit einer Wasseraustrittsöffnung (454) nahe der Austrittsöffnung (410) zum Erzeugen eines Sprühnebels (426) und zum Befeuchten des zu bearbeitenden Werkstücks (408) nahe der Prozesszone (421), wobei insbesondere die Wasseraustrittsöffnung (454) sich ringförmig um die Austrittsöffnung (410) erstreckt oder auf einer der Vorschubrichtung zugewandten Seite des Laserbearbeitungskopfes angeordnet ist, und
einem Feuchtesensor (431a, 431b) zur Messung der Feuchte der Umgebungsluft (170) in einem Bereich (498a, 498b) nahe der Prozesszone (421) und/oder einem Sensor zur Messung von Strahlungstransmission in der Umgebungsluft (170) in einem Bereich (498a, 498b) nahe der Prozesszone (421).

16. Verfahren zur Überwachung einer Laserbearbeitungsanlage (1), wobei die Strahlensicherheit der Laserbearbeitungsanlage (1) auf Absorption der Laserstrahlung (6, 6a) in der Umgebungsluft (170) in einem sich von einer Prozesszone (21), in der die Laserbearbeitung stattfindet, bis zu einer Personenzugangszone (19), in die einem Benutzer während des Betriebs der Laserbearbeitungsanlage der Zugang erlaubt ist und von der aus der Benutzer freie Einsicht in die Prozesszone (21) hat, erstreckenden Zwischenraum (17, 117) basiert, mit den Schritten:

Bearbeiten eines Werkstücks (8) mit einem Laserstrahl (6), der eine in der Umgebungsluft (170) absorbierte Wellenlänge aufweist,

Messen eines Luftfeuchtigkeitwertes, der repräsentativ für eine Gaszusammensetzung in einem der Messung zugeordneten Abschnitt (131a) des Zwischenraums (17, 117) ist, und

Anpassen der Laserleistung in der Prozesszone (21) und/oder der Vorschubgeschwindigkeit eines den Laserstrahl (6) auf das Werkstück (8) ausrichtenden Bearbeitungskopfs (4) und/oder einer Ausdehnung (D_{min}) des Zwischenraums (17, 117) in Abhängigkeit vom gemessenen Feuchtigkeitswert.

FIG 1

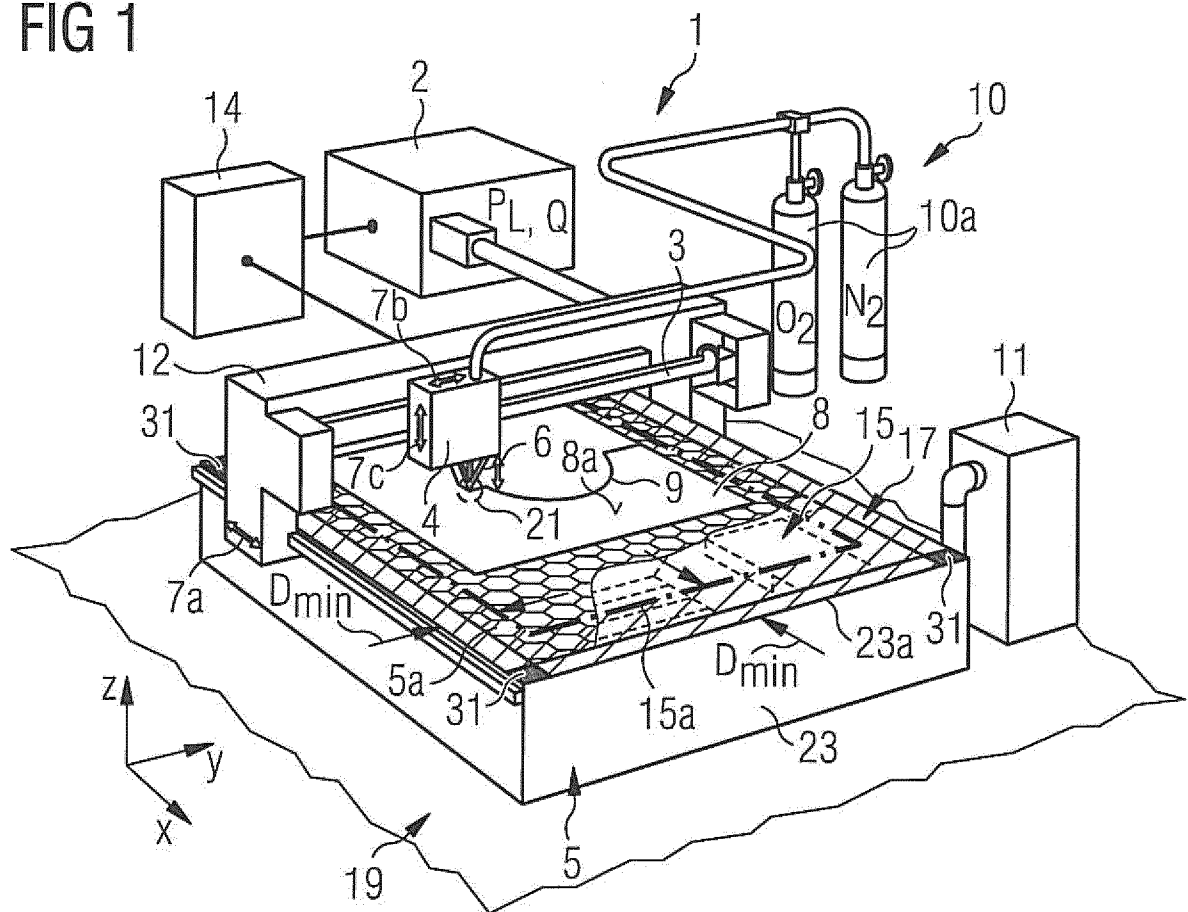


FIG 2

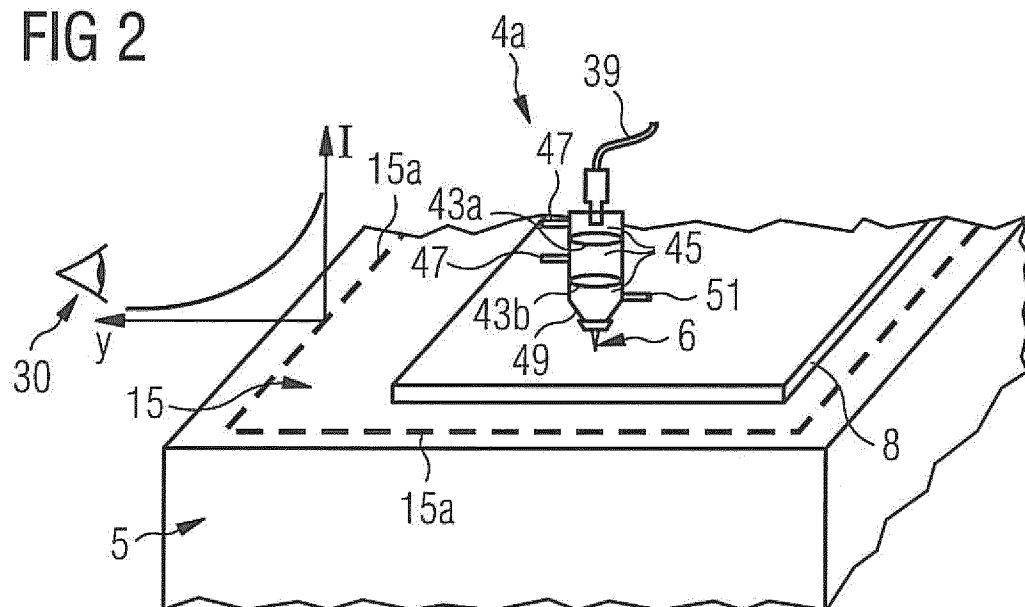


FIG 3

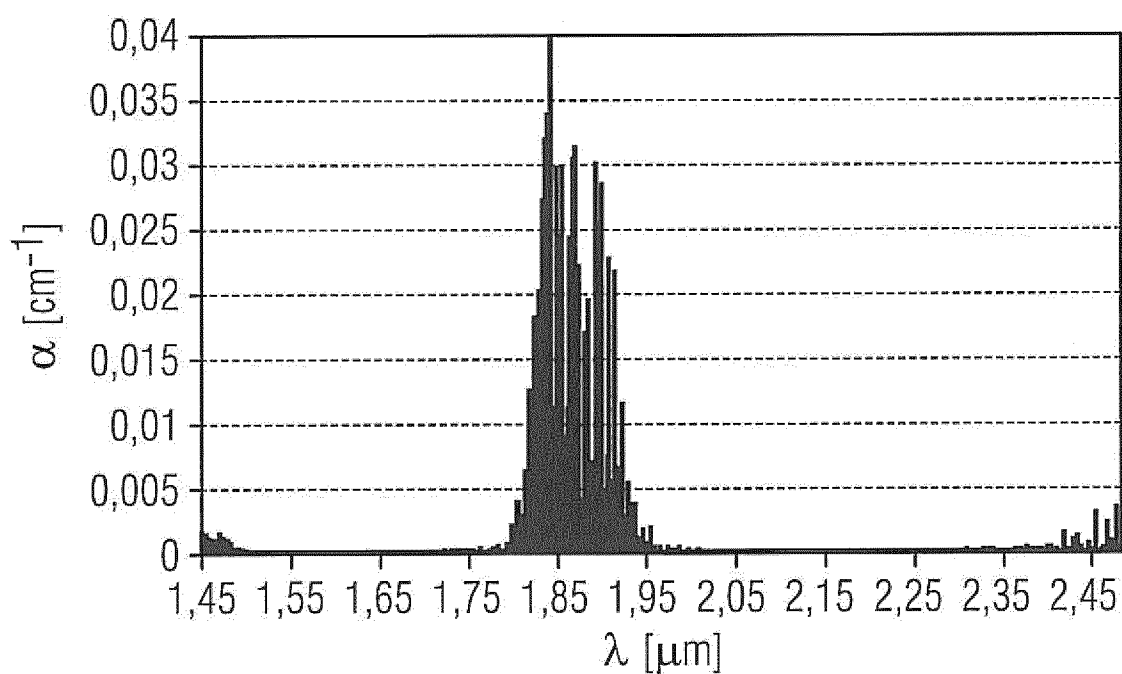


FIG 4

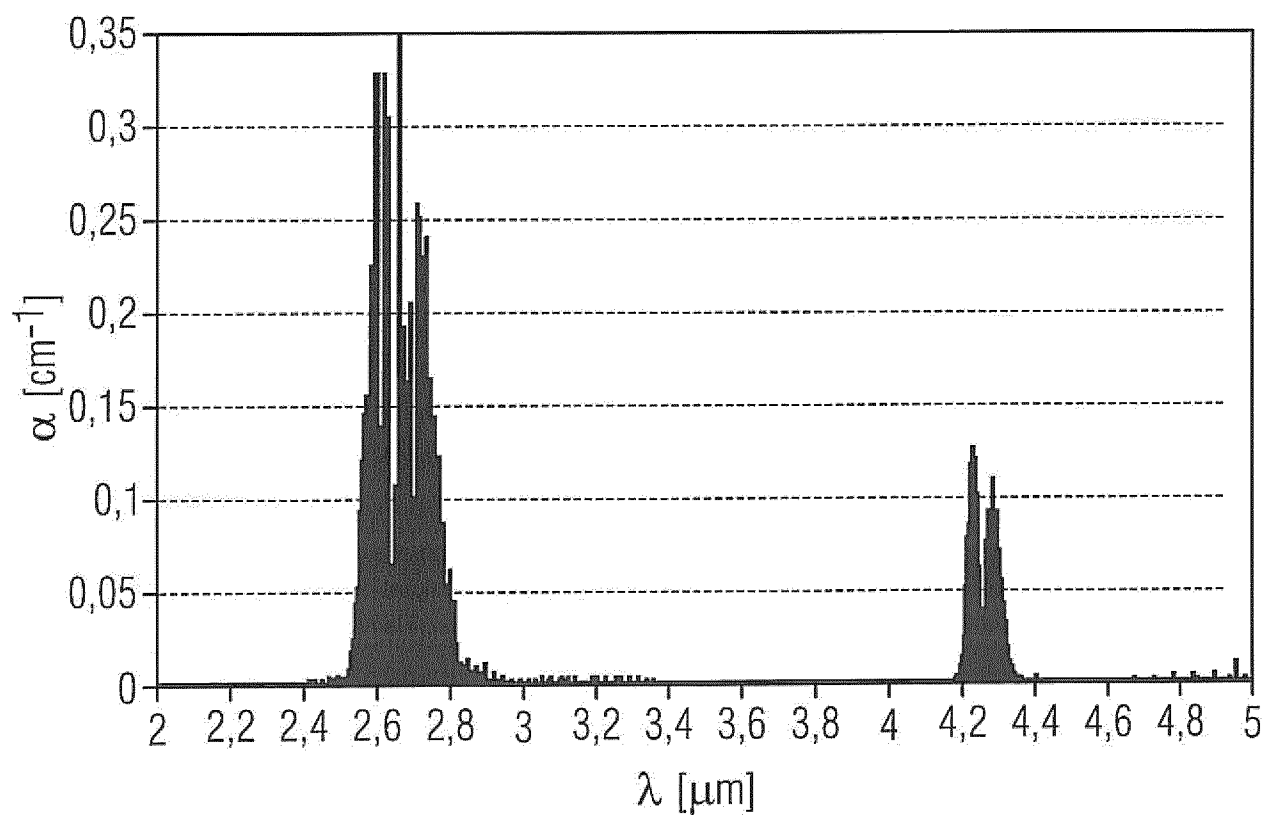


FIG 5

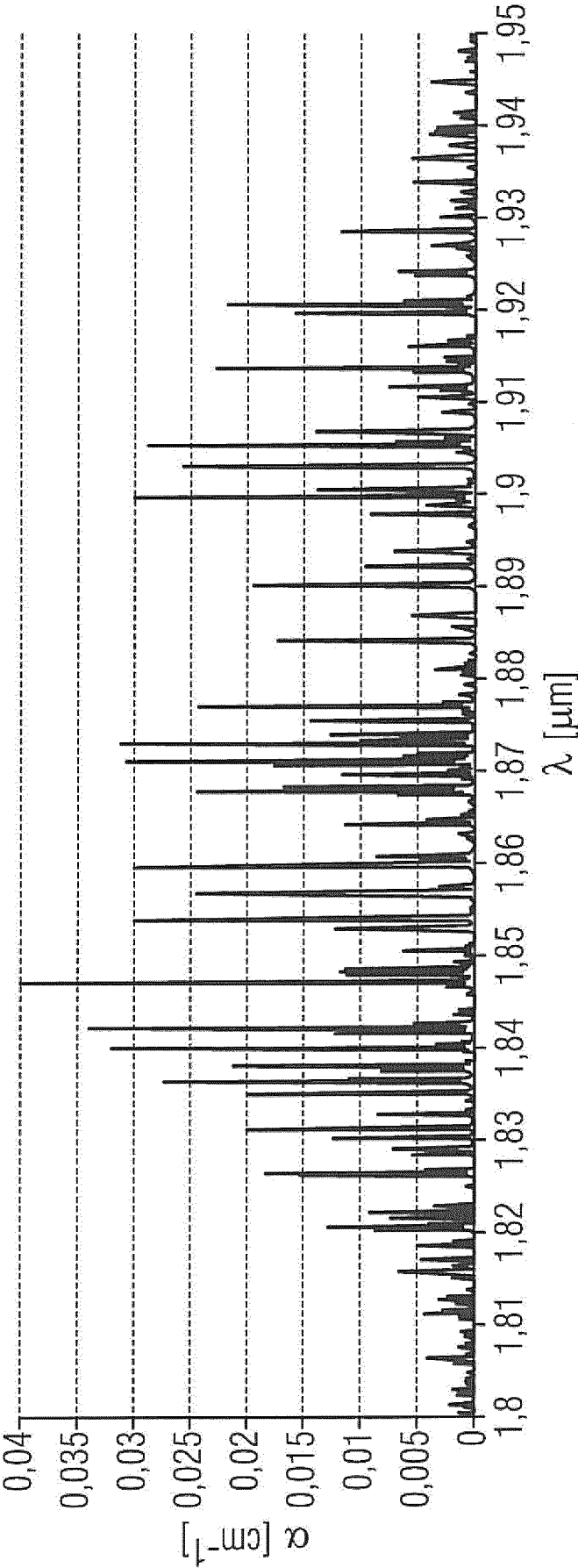


FIG 6

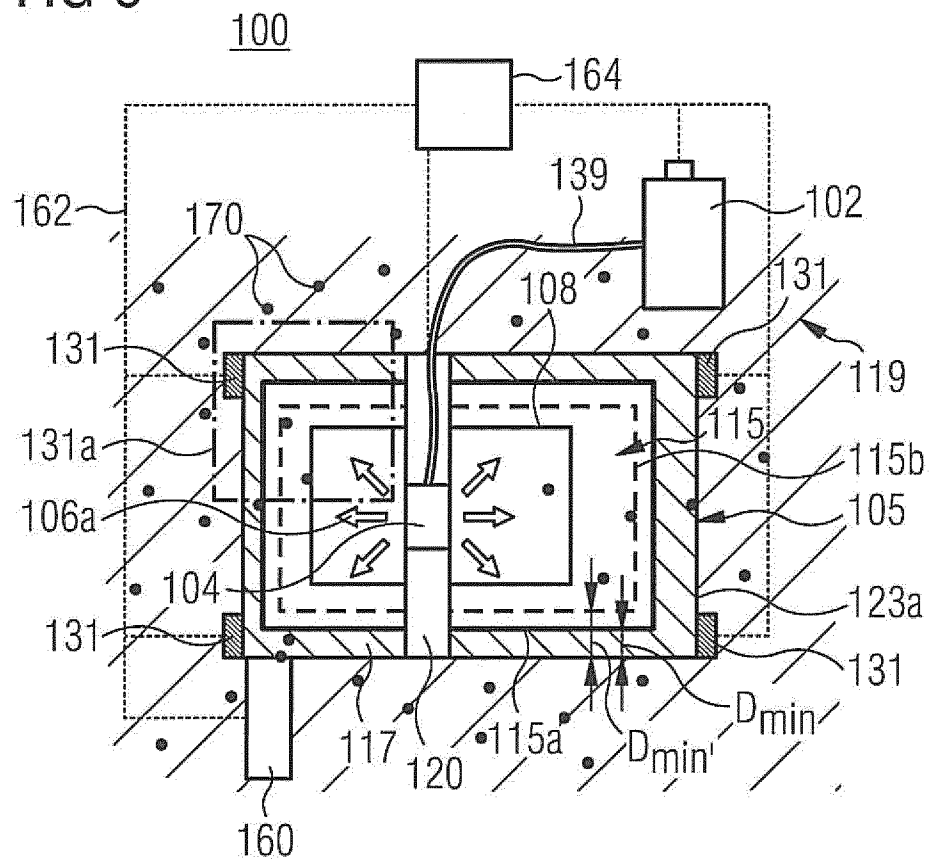


FIG 7

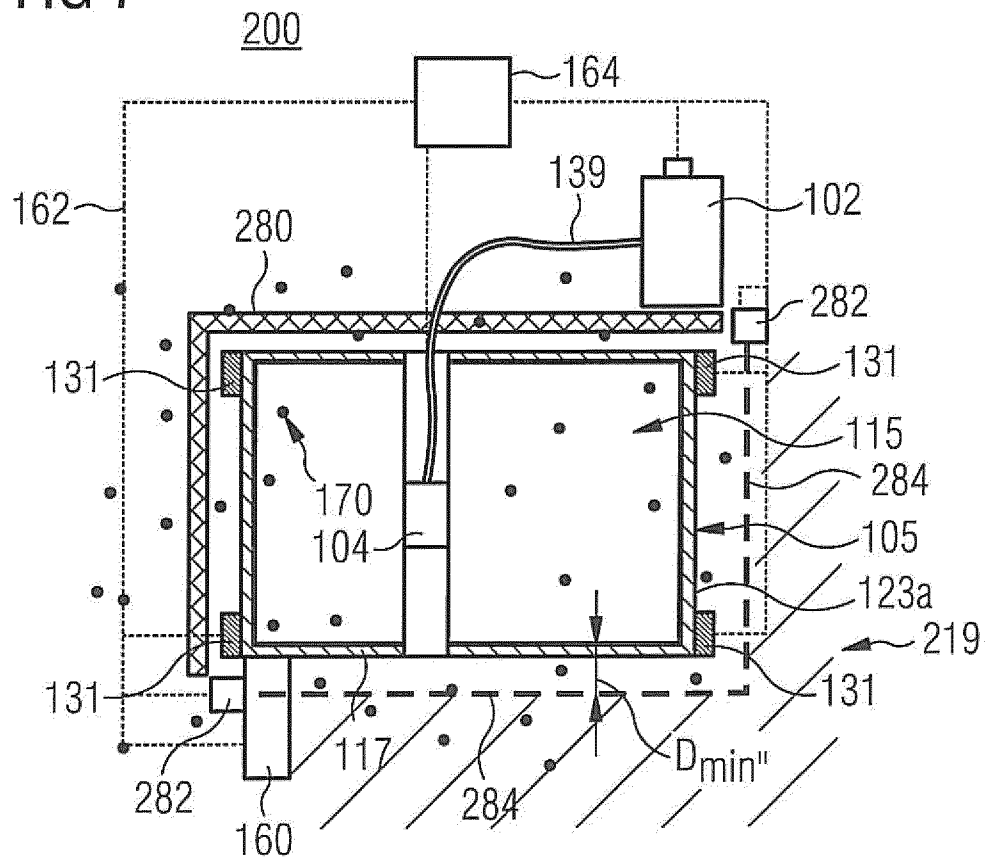


FIG 8

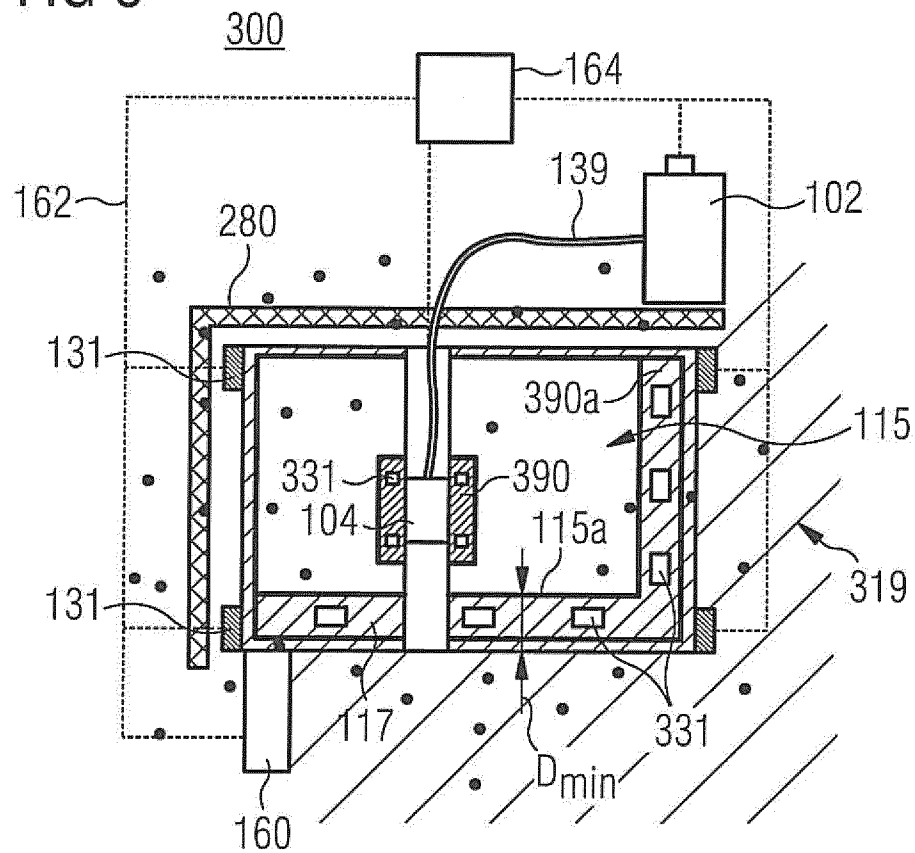


FIG 9

