

(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
06. August 2020 (06.08.2020)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2020/157050 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

B23K 26/03 (2006.01) B23K 31/12 (2006.01)
B23K 26/08 (2014.01) B23K 37/02 (2006.01)
B23K 26/21 (2014.01) B23K 37/04 (2006.01)
B23K 26/38 (2014.01) G06F 30/20 (2020.01)
B23K 26/382 (2014.01)

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

(72) Erfinder: SCHELLENBERG, Artur; Rebstraße 4a, 79395 Neuenburg am Rhein (DE). SEEBACH, Johannes; Forststraße 156 A, 70193 Stuttgart (DE).

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2020/052016

(22) Internationales Anmeldedatum:
28. Januar 2020 (28.01.2020)

(74) Anwalt: KOHLER SCHMID MÖBUS PATENTANWÄLTE PARTNERSCHAFTSGESELLSCHAFT MBB; Gropiusplatz 10, 70563 Stuttgart (DE).

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(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,

(30) Angaben zur Priorität:
10 2019 201 033.4
28. Januar 2019 (28.01.2019) DE

(54) Title: METHOD FOR AUTOMATICALLY DETERMINING THE INFLUENCE OF A LASER MACHINING PARAMETER ON A LASER MACHINING PROCESS, AND LASER MACHINING MACHINE AND COMPUTER PROGRAM PRODUCT

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUM AUTOMATISIERTEN ERMITTELN DES EINFLUSSES EINES LASERBEARBEITUNGSPARAMETERS AUF EINE LASERBEARBEITUNG SOWIE LASERBEARBEITUNGSMASCHINE UND COMPUTERPROGRAMMPRODUKT

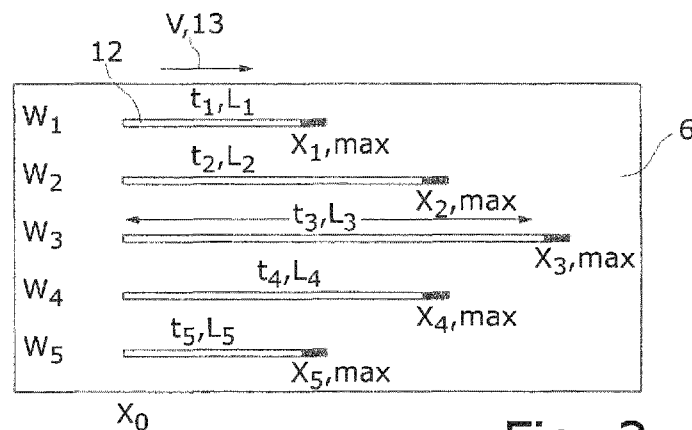


Fig. 2

(57) Abstract: The method according to the invention for determining the influence of a laser machining parameter on a laser machining process by means of a laser beam (5) comprises the following steps: (a) carrying out, in particular automatically carrying out, linear laser machining processes (12) at different values (W_1 to W_5) of the laser machining parameter, wherein the feed rate (v) of the laser beam (5) is increased in each of the laser machining processes (12) at least until a machining crack occurs; and (b) determining, in particular automatically determining, the relationship between the machining lengths (L), the associated machining times (t) or the associated crack speeds (v_A) of the laser machining processes (12) and the laser machining parameter on the basis of the measured machining lengths (L_1 to L_5), the associated machining times (t_1 to t_5) or the associated crack speeds ($v_{A,1}$ to $v_{A,5}$) of the laser machining processes (12).

(57) Zusammenfassung: Das erfindungsgemäße Verfahren zum Ermitteln des Einflusses eines Laserbearbeitungsparameters auf eine Laserbearbeitung mittels eines Laserstrahls umfasst folgende Schritte: (a) Durchführen, insbesondere automatisiertes



WO 2020/157050 A1

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, 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)
- vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderungen eingehen (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe h)

Durchführen, von linienförmigen Laserbearbeitungen (12) bei unterschiedlichen Werten (W_1 bis W_5) des Laserbearbeitungsparameters, wobei bei den Laserbearbeitungen (12) die Vorschubgeschwindigkeit (v) des Laserstrahls jeweils mindestens so weit erhöht wird, bis es zu einem Bearbeitungsabriss kommt; und (b) Ermitteln, insbesondere automatisiertes Ermitteln, des Zusammenhangs zwischen den Bearbeitungslängen (L_1 bis L_5), den zugehörigen Bearbeitungszeiten (t_1 bis t_5) oder den zugehörigen Abrissgeschwindigkeiten (v) der Laserbearbeitungen (12) und dem Laserbearbeitungsparameter anhand der gemessenen Bearbeitungslängen (L_1 bis L_5), der zugehörigen Bearbeitungszeiten (t_1 bis t_5) oder der zugehörigen Abrissgeschwindigkeiten (v) der Laserbearbeitungen (12).

5

10

15

20

Verfahren zum automatisierten Ermitteln des Einflusses eines Laserbearbeitungs-
parameters auf eine Laserbearbeitung sowie Laserbearbeitungsmaschine und
25 Computerprogrammprodukt

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Ermitteln des Einflusses eines Laserbear-
beitungsparameters auf eine Laserbearbeitung mittels eines Laserstrahls, sowie
eine zum Durchführen des Verfahrens geeignete Laserbearbeitungsmaschine und
30 ein Computerprogrammprodukt.

Beim Schneiden mittels eines Laserstrahls kann eine Verschlechterung der
Schnittqualität bis hin zum Schnittabriss auftreten. Ursache sind meistens Abwei-
chungen im Laserstrahlprofil. Folge sind hohe Maschinenstillstandzeiten und un-

zufriedene Kunden. Aktuell existiert keine Möglichkeit, der Fehlerursache maschinell auf den Grund zu gehen, sondern die Laserbearbeitungsmaschine muss angehalten werden, damit sich ein dafür qualifizierter Mitarbeiter um das Problem kümmern kann. Aktuell werden zum Einstellen bzw. Überprüfen des optischen Soll-Zustandes der Laserbearbeitungsmaschine unterschiedliche Verfahren angewendet, die einer subjektiven Auswertung unterliegen. Ferner sind kostspielige Messmittel, hoher Zeitaufwand sowie spezielles Knowhow notwendig, um z.B. einen leistungsabhängigen Fokusshift, einen Leistungsverlust, eine Fokusdurchmesserveränderung etc. zu ermitteln.

10

Demgegenüber liegt der vorliegenden Erfindung die Aufgabe zugrunde, ein einfaches und kostengünstiges Verfahren anzugeben, mit dem der Einfluss eines Laserbearbeitungsparameters auf die Laserbearbeitung, insbesondere automatisiert, bestimmt werden kann. Insbesondere sollen in kürzester Zeit auch der optimale Laserbearbeitungsparameterwert und die Ursache von Laserbearbeitungsparameteränderungen gefunden werden.

15

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch ein Verfahren zum Ermitteln, insbesondere zum automatisierten Ermitteln, des Einflusses eines Laserbearbeitungsparameters auf eine Laserbearbeitung mittels eines Laserstrahls mit folgenden Schritten gelöst:

20

- (a) Durchführen, insbesondere vollautomatisches Durchführen, von linienförmigen Laserbearbeitungen bei unterschiedlichen Werten des Laserbearbeitungsparameters, wobei bei den Laserbearbeitungen die Vorschubgeschwindigkeit des Laserstrahls jeweils mindestens so weit erhöht wird, bis es zu einem Bearbeitungsabbriss kommt; und
- (b) Ermitteln, insbesondere vollautomatisches Ermitteln, des Zusammenhangs zwischen den Bearbeitungslängen, den zugehörigen Bearbeitungszeiten oder den zugehörigen Abrissgeschwindigkeiten der Laserbearbeitungen und dem Laserbearbeitungsparameter anhand der gemessenen Bearbeitungslängen, der zugehörigen Bearbeitungszeiten oder der zugehörigen Abrissgeschwindigkeiten der Laserbearbeitungen.

30

Erfindungsgemäß detektiert entweder eine Sensorik (z.B. eine Photodiode im Laserstrahlerzeuger) vollautomatisch (mannlos) oder eine Bedienperson einen durch den Laserbearbeitungsprozess verursachten Bearbeitungsabbriss in Abhängigkeit des Laserbearbeitungsparameters. Die Auswertung erfolgt entweder durch eine
5 Maschinensteuerung der Laserbearbeitungsmaschine vollautomatisch (mannlos) oder durch die Bedienperson. Bei dem Laserbearbeitungsparameter handelt es sich bevorzugt um laserstrahlseitige Parameter (Wellenlänge, Strahlqualität, Intensitätsverteilung, Fokusbildung des Laserstrahls in Strahlrichtung (z-Fokusbildung), Fokusbildung des Laserstrahls oder der Laserleitung, Laserleistung, ...)
10 und/oder um einen gasdynamischen Parameter bei vorbestimmter Gaszusammensetzung, welcher insbesondere durch Düsenart, Düsendurchmesser, Abstand von Düse und Werkstück bestimmt ist.

Ausgehend von einem Start-Vorschub wird auf stets gleiche Weise, z.B. kontinuierlich oder schrittweise, auf einen End-Vorschub mit gezündetem Laserstrahl beschleunigt. Die laserseitige Sensorik detektiert vollautomatisch und mannlos die
15 Laserbearbeitungszeit zwischen Laserbearbeitungsbeginn und Abriss der jeweiligen Laserbearbeitung. Aufgrund der stets gleichen Beschleunigung ist die Laserbearbeitungszeit repräsentativ für die jeweilige Laserbearbeitungslänge bei dem jeweiligen Wert des Laserbearbeitungsparameters. Alternativ kann die Maschinensteuerung auch die zum Zeitpunkt des Abrisses herrschende Vorschubgeschwindigkeit als Abrissgeschwindigkeit feststellen und dem jeweiligen Wert des
20 Laserbearbeitungsparameters zuordnen; in diesem Fall braucht die Laserbearbeitungsgeschwindigkeit nicht auf die stets gleiche Weise beschleunigt zu werden, sondern kann beliebig beschleunigt werden. In der manuellen Variante wird die Laserbearbeitungslänge von der Bedienperson gemessen und dem jeweiligen Wert des Laserbearbeitungsparameters zugeordnet.
25

In einer ersten bevorzugten Verfahrensvariante wird der Einfluss eines Schneidparameters auf eine Werkstückbearbeitung mittels des Laserstrahls ermittelt, insbesondere automatisiert ermittelt, mit folgenden Schritten:
30

- (a) Durchführen, insbesondere automatisiertes Durchführen, von linienförmigen Laserschnitten an einem Werkstück bei unterschiedlichen Werten des Schneidparameters, wobei bei den Laserschnitten die Schneidgeschwindigkeit

keit jeweils mindestens so weit erhöht wird, bis es zu einem Schnittabbriss kommt; und

- 5 (b) Ermitteln, insbesondere automatisiertes Ermitteln, des Zusammenhangs zwischen den Schnittlängen, den zugehörigen Schneidzeiten oder den zugehörigen Abrissgeschwindigkeiten der Laserschnitte und dem Schneidparameter anhand der gemessenen Schnittlängen, der zugehörigen Schneidzeiten oder der zugehörigen Abrissgeschwindigkeiten der Laserschnitte.

10 In einer zweiten bevorzugten Verfahrensvariante wird der Einfluss eines Schweißparameters auf eine Werkstückbearbeitung mittels des Laserstrahls ermittelt, insbesondere automatisiert ermittelt, mit folgenden Schritten:

- 15 (a) Durchführen, insbesondere automatisiertes Durchführen, von linienförmigen Laserdurchschweißungen an einem Werkstück bei unterschiedlichen Werten des Schweißparameters, wobei bei den Laserdurchschweißungen die Schweißgeschwindigkeit jeweils mindestens so weit erhöht wird, bis es zu einem Durchschweißabbriss, also einem Übergang zum Einschweißen, kommt; und
- 20 (b) Ermitteln, insbesondere automatisiertes Ermitteln, des Zusammenhangs zwischen den Durchschweißlängen, den zugehörigen Schweißzeiten oder den zugehörigen Abrissgeschwindigkeiten der Laserdurchschweißungen und dem Schweißparameter anhand der gemessenen Durchschweißlängen, der zugehörigen Schweißzeiten oder der zugehörigen Abrissgeschwindigkeiten der Laserdurchschweißungen.

25 Veränderungen im Laserstrahl, z.B. aufgrund Verschmutzung der Optiken, können durch die Propagationsstrecke in der Maschine erkannt und negative Auswirkungen auf das Schweißergebnis frühzeitig unterbunden werden. Durch Verschmutzung der Schweißoptik (Spritzer) wird ein Teil der Laserleistung an den optischen Komponenten absorbiert und fehlt im Prozess am Werkstück. Entsprechend wird

30 die Durchschweißschwelle früher erreicht (da ein Teil der Energie fehlt) und die Durchschweißstrecke wird entsprechend verkürzt. Dies kann durch das vorgestellte Verfahren erfasst werden. Um beim Laserstrahlschweißen die Laserstrahleigenschaften mittels Schweißprozess zu diagnostizieren, wird die sogenannte Durchschweißschwelle herangezogen. Dies ist der Übergang vom Einschweißpro-

zess in Durchschweißprozess oder umgekehrt. An der Durchschweißschwelle reicht also die Strahlungsenergie gerade aus, um den Werkstoff über die gesamte Blechdicke aufzuschmelzen. Die Geschwindigkeit wird, bei sonst konstanter Parametrierung, kontinuierlich gesteigert. Zunächst erfolgt eine Durchschweißung des Blechs mit Leistungsüberschuss. Nimmt die Geschwindigkeit weiter zu, wird die oben erwähnte Durchschweißschwelle erreicht, welche hier als Kriterium für die Auswertung dient. Bei weiterer Steigerung des Vorschubs reicht die Energie für eine Durchschweißung nicht aus, sodass im weiteren Verlauf eine Einschweißung bzw. ein Abriss der Durchschweißung erfolgt. Variiert nun im nächsten Schritt z.B. die Fokusslage, wird der Vorschub der Durchschweißschwelle verändert und tritt früher ein, wenn die Schweißnaht breiter ist, oder später, wenn die Schweißnahtbreite kleiner ist. Über die Variation der Fokusslagen lässt sich auf der Blechunterseite die längste Strecke entweder manuell ausmessen, oder durch Sensorik (z.B. Einschweißtiefsensor (OCT) oder Lasergerät-interne Diode) automatisch detektieren. Auf diese Weise wird es möglich, laserseitige Eigenschaften zu überprüfen und im Condition Monitoring der Maschine wiederzugeben und Handlungsempfehlungen bei Verletzung einer Schwelle zu empfehlen.

In einer dritten bevorzugten Verfahrensvariante wird der Einfluss eines Umschmelzparameters beim Umschmelzen von Metallpulver mittels des Laserstrahls ermittelt, insbesondere automatisiert ermittelt, mit folgenden Schritten:

- (a) Erzeugen, insbesondere automatisiertes Erzeugen, von linienförmigen Schmelzespuren bei unterschiedlichen Werten des Umschmelzparameters, wobei bei den Schmelzespuren die Vorschubgeschwindigkeit des Laserstrahls jeweils mindestens so weit erhöht wird, bis es zu einem Schmelzespurabriss kommt; und
- (b) Ermitteln, insbesondere automatisiertes Ermitteln, des Zusammenhangs zwischen den Schmelzespurlängen, den zugehörigen Umschmelzzeiten oder den zugehörigen Abrissgeschwindigkeiten der Schmelzespuren und dem Umschmelzparameter anhand der gemessenen Schmelzespurlängen, der zugehörigen Umschmelzzeiten oder der zugehörigen Abrissgeschwindigkeiten der Schmelzespuren.

Veränderungen des optischen Setups unter Prozesspulvereintrag beim LMD(Laser Metal Deposition)-Prozess, z.B. aufgrund Verschmutzung der Optiken, können durch die Propagationsstrecke in der Maschine erkannt und negative Auswirkungen auf das Umschmelzergebnis frühzeitig unterbunden werden. Durch
5 lineare Veränderung einer Stellgröße unter schrittweiser Variation einer weiteren Stellgröße wird die längste Umschmelzespur ermittelt, die bei gegebenem Energieeintrag unter Wechselwirkung mit dem Pulver bzw. einem Pulverstrahl entsteht. Die längste Schmelzespur wird mit laserseitigen Sensoren von der Maschine automatisiert ausgewertet. Die Energie des Laserstrahls wird zum Auf- und Um-
10 schmelzen von Metallpulver in Abhängigkeit der Laserstrahltaillenlage unterschiedlich effizient umgesetzt. Als Wirkgröße ist die Wechselwirkungslänge zwischen Laserstrahl und Pulver zu betrachten, welche zu einer bestimmten Umschmelzrate führt. Erfindungsgemäß kann die Umschmelzrate zur Prozessdiagnostik herangezogen werden, um eine Bewertung des Maschinenzustandes in
15 horizontaler, verkippter oder vertikaler Anordnung des LMD-Prozesses vorzunehmen.

Nimmt bei gegebener Wechselwirkungslänge die Vorschubgeschwindigkeit zu, wird eine Grenzgeschwindigkeit erreicht, ab der die Umschmelzung aufgrund zu geringem Energieeintrag nicht mehr hinreichend erfolgt, die Wechselwirkungs-
20 länge zu kurz ist und keine Anbindung des verflüssigten Pulvers an die Werkstückoberfläche stattfindet. Damit stellt sich an der Grenzgeschwindigkeit die maximale Schmelzespurlänge ein. Oberhalb dieser Grenzgeschwindigkeit absorbiert das Pulver die Laserstrahlung, bindet aber nicht mehr an das Trägermaterial an. Die Bestimmung der Schmelzespurlängen erfolgt z.B. durch Auswertung
25 des prozesseitigen Streulichtes, bei Anbindung der Schmelze an den Trägerwerkstoff stellt sich eine Veränderung der Emission ein. Vom Zeitpunkt des Prozessstarts bis zur Signaländerung kann die Zeit ermittelt werden und damit die Grenz- oder Abrissgeschwindigkeit berechnet werden. Die Bestimmung der maximalen Schmelzespurlänge kann auch mit Triangulations- oder OCT-basierten Methoden erfolgen.
30

Die Erfindung ist sowohl für cw-Betrieb als auch Pulsbetrieb geeignet, solange die Energie ausreicht, um das Material zu trennen und auf- oder umzuschmelzen.

Vorzugsweise wird der Laserstrahl bei Erreichen des Bearbeitungsabrisses ausgeschaltet, z.B. von einer laserseitigen Sensorik in der Strahlquelle oder von einer Sensorik außerhalb der Strahlquelle.

5 Besonders bevorzugt wird derjenige Parameterwert, bei dem die Bearbeitungslänge bzw. die zugehörige Bearbeitungszeit bzw. die zugehörige Abrissgeschwindigkeit der Laserbearbeitungen maximal ist, als der optimale Parameterwert bestimmt, insbesondere automatisiert bestimmt. Dabei kann der optimale Parameterwert durch Interpolation der gemessenen Bearbeitungslängen, der gemessenen
10 Bearbeitungszeiten oder der festgestellten Abrissgeschwindigkeiten bestimmt werden. Im vollautomatischen Fall kann sich die Maschine dann selbst auf diesen optimalen Parameterwert einstellen. Die optimalen Parameterwerte weichen so bei unterschiedlichen Laserbearbeitungsmaschinen kaum voneinander ab, da die subjektive Auswertung entfällt.

15

Ist der zu ermittelnde optimale Parameterwert eine optimale z-Fokuslage des Laserstrahls, werden in Schritt (a) die Laserbearbeitungen bei unterschiedlichen z-Fokuslagen des Laserstrahls durchgeführt. Wenn die optimale z-Fokuslage des Laserstrahls jeweils für unterschiedliche Laserleistungen ermittelt wird, kann daraus ein leistungsabhängiger Fokusshift bestimmt werden.
20

Ist der zu ermittelnde optimale Parameterwert ein optimaler Fokussdurchmesser des Laserstrahls, werden in Schritt (a) die Laserbearbeitungen bei unterschiedlichen Fokussdurchmessern des Laserstrahls durchgeführt.

25

Um einen im Lauf der Zeit auftretenden Leistungsverlust oder eine im Lauf der Zeit auftretende Strahlaufweitung feststellen zu können, werden bei nominell gleicher Laserleistung und nominell gleichem Fokussdurchmesser die Schritte (a) und (b) für unterschiedliche Werte des Laserbearbeitungsparameters „z-Fokuslage“ zu
30 zwei unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführt, insbesondere automatisiert durchgeführt. Die beiden dabei jeweils ermittelten Zusammenhänge (Kurven) zwischen den Bearbeitungslängen der Laserbearbeitungen, den zugehörigen Bearbeitungszeiten oder den Abrissgeschwindigkeiten von dem Laserbearbeitungsparameter „z-Fokuslage“ werden miteinander verglichen, um dadurch einen Leis-

tungsverlust oder eine Strahlaufweitung festzustellen. Im Falle eines Leistungsverlusts ergibt sich über den gesamten Wertebereich des Laserbearbeitungsparameters „z-Fokuslage“ bei der später ermittelten Kurve eine Abnahme (negativer Offset) der jeweiligen Bearbeitungslängen, Bearbeitungszeiten oder Abrissgeschwindigkeiten. Im Falle einer Strahlaufweitung schneiden sich die beiden Kurven hin-
5 gegen jeweils bei einer hohen und einer tiefen Fokuslage, und die später aufgenommene Kurve weist im Bereich zwischen den beiden Schnittpunkten einen negativen Offset und außerhalb dieses Bereichs jeweils einen positiven Offset auf.

10 Die Erfindung betrifft auch eine Laserbearbeitungsmaschine mit einem Laserstrahlerzeuger zum Erzeugen eines Laserstrahls, mit einem Laserbearbeitungskopf, aus dem der Laserstrahl austritt, und einer Werkstück- oder Pulverauflage, die beide relativ zueinander bewegbar sind, und mit einer Maschinensteuerung, die programmiert ist, beim Laserbearbeiten eines Werkstücks die Vorschub-
15 geschwindigkeit mindestens so weit zu erhöhen, bis es zu einem Bearbeitungsabriss kommt.

Vorzugsweise weist die Laserbearbeitungsmaschine einen Abrissdetektor zum Detektieren eines Bearbeitungsabrisses und einen Datenspeicher auf, in dem die
20 Bearbeitungslänge, die Bearbeitungszeit oder die Abrissgeschwindigkeit sowie der zugehörige Wert des Laserbearbeitungsparameters einander zugeordnet gespeichert werden.

Besonders bevorzugt ist die Maschinensteuerung programmiert, anhand der ge-
25 speicherten Daten den Zusammenhang zwischen den Bearbeitungslängen, den zugehörigen Bearbeitungszeiten oder den zugehörigen Abrissgeschwindigkeiten und dem Laserbearbeitungsparameter automatisiert zu ermitteln und insbesondere mehrere ermittelte Zusammenhänge automatisiert miteinander zu vergleichen und auszuwerten.

30

Die Erfindung betrifft schließlich auch ein Computerprogrammprodukt, welches Codemittel aufweist, die zum Durchführen aller Schritte des oben beschriebenen Verfahrens angepasst sind, wenn das Programm auf einer Maschinensteuerung einer Laserbearbeitungsmaschine abläuft.

Weitere Vorteile und vorteilhafte Ausgestaltungen des Gegenstands der Erfindung ergeben sich aus der Beschreibung, den Ansprüchen und der Zeichnung. Ebenso können die vorstehend genannten und die noch weiter aufgeführten Merkmale je
5 für sich oder zu mehreren in beliebigen Kombinationen Verwendung finden. Die gezeigten und beschriebenen Ausführungsformen sind nicht als abschließende Aufzählung zu verstehen, sondern haben vielmehr beispielhaften Charakter für die Schilderung der Erfindung. Es zeigen:

- 10 Fig. 1 eine zum Durchführen des erfindungsgemäßen Verfahrens geeignete Laserbearbeitungsmaschine;
- Fig. 2 die Schnittlängen von jeweils bis zur Schnittabrissgeschwindigkeit durchgeführten Laserschnitten für unterschiedliche Werte eines Schneidparameters;
- 15 Fig. 3 den Zusammenhang zwischen den Schnittlängen/Schneidzeiten/Schnittabrissgeschwindigkeiten von jeweils bis zur Schnittabrissgeschwindigkeit durchgeführten Laserschnitten und dem Schneidparameter „z-Fokuslage des Laserstrahls“;
- Fig. 4 den Zusammenhang zwischen den Schnittlängen/Schneidzeiten/Schnittabrissgeschwindigkeiten von jeweils bis zur Schnittabrissgeschwindigkeit durchgeführten Laserschnitten und dem Schneidparameter „z-Fokuslage des Laserstrahls“, jeweils für zwei unterschiedliche Laserleistungen für den Fall eines Fokusshifts;
- 20
- Fig. 5 den Zusammenhang zwischen den Schnittlängen/Schneidzeiten/Schnittabrissgeschwindigkeiten von jeweils bis zur Schnittabrissgeschwindigkeit durchgeführten Laserschnitten und dem Schneidparameter „z-Fokuslage des Laserstrahls“, jeweils für unterschiedliche Laserleistungen;
- 25
- Fig. 6 den Zusammenhang zwischen den Schnittlängen/Schneidzeiten/Schnittabrissgeschwindigkeiten von jeweils bis zur Schnittabrissgeschwindigkeit durchgeführten Laserschnitten und dem Schneidparameter „z-Fokuslage des Laserstrahls“, jeweils für unterschiedliche Fokussdurchmesser;
- 30

- Fig. 7 die Durchschweißlängen von jeweils bis zur Abrissgeschwindigkeit durchgeführten Laserdurchschweißungen für unterschiedliche Werte eines Schweißparameters;
- Fig. 8 den Zusammenhang zwischen den Durchschweißlängen/Schweißzeiten/Abrissgeschwindigkeiten von jeweils bis zur Abrissgeschwindigkeit durchgeführten Laserdurchschweißungen und dem Schweißparameter „z-Fokuslage des Laserstrahls“;
- Fig. 9 die Schmelzespurlängen von jeweils bis zur Abrissgeschwindigkeit erzeugten Schmelzespuren für unterschiedliche Werte eines Umschmelzparameters; und
- Fig. 10 den Zusammenhang zwischen den Schmelzespurlängen/Umschmelzzeiten/Abrissgeschwindigkeiten von jeweils bis zur Abrissgeschwindigkeit erzeugten Schmelzespuren und dem Umschmelzparameter „z-Fokuslage des Laserstrahls“.

15

Die in **Fig. 1** perspektivisch dargestellte Laserbearbeitungsmaschine **1** weist beispielsweise einen CO₂-Laser, Diodenlaser oder Festkörperlaser als Laserstrahlerzeuger **2**, einen in X- und Y-Richtung verfahrbaren (Laser)Bearbeitungskopf **3** und eine hier als Werkstückauflage ausgebildete Werkstück- oder Pulverauflage **4** auf. Im Laserstrahlerzeuger **2** wird ein Laserstrahl **5** (cw- oder Pulsbetrieb) erzeugt, der mittels eines (nicht gezeigten) Lichtleitkabels oder (nicht gezeigten) Umlenkspiegeln vom Laserstrahlerzeuger **2** zum Bearbeitungskopf **3** geführt wird. Auf der Werkstückauflage **4** ist ein plattenförmiges Werkstück **6** angeordnet. Der Laserstrahl **5** wird mittels einer im Bearbeitungskopf **3** angeordneten Fokussieroptik auf das Werkstück **6** gerichtet. Die Laserschneidmaschine **1** wird darüber hinaus mit Schneidgasen **7**, beispielsweise Sauerstoff und Stickstoff, und für einen LMD-Prozess mit Helium oder Argon versorgt. Die Verwendung des jeweiligen Schneidgases **7** ist vom Werkstückmaterial und von Qualitätsanforderungen an die Schnittkanten abhängig. Weiterhin ist eine Absaugeinrichtung **8** vorhanden, die mit einem Absaugkanal **9**, der sich unter der Werkstückauflage **4** befindet, verbunden ist. Das Schneidgas **7** wird einer Schneidgasdüse **10** des Bearbeitungskopfes **3** zugeführt, aus der es zusammen mit dem Laserstrahl **5** austritt. Die Laserbearbeitungsmaschine **1** weist weiterhin eine Maschinensteuerung **11** auf.

25
30

Mit der Energie des Laserstrahls 5 kann im Werkstück 6 ein bestimmtes Schmelzvolumen bzw. eine bestimmtes Schmelzrate erzeugt werden. Wird beim Laserschneiden die Energie des Laserstrahls 5 zunehmend quer zur Vorschubrichtung des Laserstrahls 5 deponiert, z.B. aufgrund eines größeren Fokus- bzw. Strahldurchmessers auf dem Werkstück 6, so nimmt die maximal mögliche Schneidgeschwindigkeit ab.

Um den Einfluss eines Schneidparameters, z.B. des Schneidparameters „z-Fokusslage F des Laserstrahls 5“, beim Laserschneiden des Werkstücks 6 zu bestimmen, wird wie folgt vorgegangen:

Wie in **Fig. 2** gezeigt, werden an dem Werkstück 6 – von der Maschinensteuerung 11 vollautomatisiert gesteuert – am Startpunkt x_0 mehrere Laserschnitte 12 in Vorschubrichtung 13 durchgeführt, und zwar für hier fünf unterschiedliche Werte W_1 bis W_5 des Schneidparameters. Dabei wird bei den Laserschnitten 12 die Schneidgeschwindigkeit v des Laserstrahls 5 jeweils mindestens so weit erhöht, bis es bei den Endpunkten $x_{1,max}$ bis $x_{5,max}$ jeweils zu einem Schnittabbriss kommt. Ein Abrissdetektor 14, z.B. eine Photodiode im Laserstrahlerzeuger 2, detektiert den Schnittabbriss und schaltet den Laserstrahl 5 aus.

Anschließend wird – von der Maschinensteuerung 11 vollautomatisiert gesteuert – der Zusammenhang zwischen den Schnittlängen L der Laserschnitte 12, den zugehörigen Schneidzeiten t oder den zugehörigen Schnittabbrissgeschwindigkeiten v_A und dem Schneidparameter anhand der gemessenen Schnittlängen L_1 bis L_5 , der zugehörigen Schneidzeiten t_1 bis t_5 oder der zugehörigen Schnittabbrissgeschwindigkeiten $v_{A,1}$ bis $v_{A,5}$ der Laserschnitte 12 ermittelt.

Durch die Veränderung der z-Fokusslage werden unterschiedliche Energiemengen quer zur Vorschubrichtung deponiert, was zu unterschiedlichen Schnittabbrissgeschwindigkeiten führt, d.h., die Laserschnitte 12 bzw. die Schneidzeiten t sind unterschiedlich lang. Die Schneidzeiten t zwischen Schnittbeginn und Schnittabbriss werden mit Hilfe des Abrissdetektors 14 detektiert. Alternativ kann die zum Zeitpunkt des Schnittabbrisses herrschende Schneidgeschwindigkeit von der Maschinensteuerung 11 als Schnittabbrissgeschwindigkeit v_A festgestellt und dem jeweiligen Wert des Schneidparameters zuordnet werden.

In **Fig. 3** ist der interpolierte Zusammenhang zwischen den Schnittlängen L /Schneidzeiten t / Schnittabrissgeschwindigkeiten v_A von jeweils bis zur Schnittabrissgeschwindigkeit durchgeführten Laserschnitten 12 und dem Schneidparameter „z-Fokusslage F des Laserstrahls 5“ dargestellt. Die Stellgröße ist also die z-Fokusslage F des Laserstrahls 5. Diese wird verändert und ein Laserschnitt 12 mit kontinuierlicher Beschleunigung bis zum Schnittabriss durchgeführt. Anschließend wird die z-Fokusslage verändert, die Maschinenachse verfährt auf die nächste Position, und der Laserschnitt 12 wird auf dem Werkstück 6 mit der gleichen kontinuierlichen Beschleunigung bis zum Schnittabriss wiederholt. Diejenige z-Fokusslage des Laserstrahls 5, bei der die Schnittlänge L bzw. die zugehörige Schneidzeit t bzw. die zugehörige Schnittabrissgeschwindigkeit v_A der Laserschnitte 12 maximal ist, wird von der Maschinensteuerung 11 automatisiert als die optimale Fokusslage F_{opt} bestimmt, und die Maschinensteuerung 11 stellt die Fokusslage des Laserstrahls 5 selbständig auf diese optimale Fokusslage F_{opt} ein.

Wird, wie in **Fig. 4** gezeigt, der Zusammenhang zwischen den Schnittlängen L /Schneidzeiten t / Schnittabrissgeschwindigkeiten v_A von Laserschnitten 12 und der z-Fokusslage F jeweils für zwei unterschiedliche Laserleistungen L_1 und L_2 ($L_1 > L_2$) aufgenommen und die jeweils optimale Fokusslage $F_{opt,L1}$ und $F_{opt,L2}$ ermittelt, so kann daraus ein leistungsabhängiger Fokussshift $\Delta F = F_{opt,L1} - F_{opt,L2}$ bestimmt werden.

Fig. 5 zeigt den Zusammenhang zwischen den Schnittlängen L /Schneidzeiten t / Schnittabrissgeschwindigkeiten v_A von Laserschnitten 12 in Abhängigkeit der z-Fokusslage F des Laserstrahls 12, jeweils für unterschiedliche Laserleistungen L_1, L_2, L_3 ($L_1 > L_2 > L_3$). Bei geringerer Leistung ergibt sich über den gesamten Wertebereich der z-Fokusslage F eine Abnahme (negativer Offset) der jeweiligen Schnittlängen, Schneidzeiten oder Schnittabrissgeschwindigkeiten gegenüber den Schnittlängen, Schneidzeiten oder Schnittabrissgeschwindigkeiten bei höherer Leistung.

Fig. 6 zeigt den Zusammenhang zwischen den Schnittlängen L /Schneidzeiten t / Schnittabrissgeschwindigkeiten v_A von Laserschnitten 12 in Abhängigkeit der z-

Fokuslage F des Laserstrahls 12, jeweils für unterschiedliche Fokusburchmesser d_1, d_2, d_3, d_4 ($d_1 > d_2 > d_3 > d_4$) des Laserstrahls 12. Die einzelnen Kurven schneiden sich jeweils bei einer hohen und einer tiefen Fokuslage. Im Vergleich zu einem größeren Fokusburchmesser weisen die Schnittlängen, Schneidzeiten oder
5 Schnittabrissgeschwindigkeiten bei einem kleineren Fokusburchmesser im Bereich zwischen den beiden Schnittpunkten einen negativen Offset und außerhalb dieses Bereichs einen positiven Offset auf.

Um einen im Lauf der Zeit auftretenden Leistungsverlust oder eine im Lauf der Zeit
10 auftretende Strahlaufweitung feststellen zu können, werden bei nominell gleicher Laserleistung und nominell gleichem Fokusburchmesser die Zusammenhänge zwischen den Schnittlängen L / Schneidzeiten t / Schnittabrissgeschwindigkeiten v_A und der z -Fokuslage F des Laserstrahls 12 zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten ermittelt. Die ermittelten Kurven werden miteinander verglichen, um anhand der
15 unterschiedlichen Kurvenverläufe der Fig. 5 und 6 entweder einen Leistungsverlust oder eine Strahlaufweitung festzustellen.

Die maschinenseitige Umsetzung kann beispielsweise wie folgt erfolgen:

1. Der Ist-Zustand der jeweiligen Laserbearbeitungsmaschine 1 wird durch De-
20 tektion der Schnittlänge L / Schneidzeit Δt / Schnittabrissgeschwindigkeit v_A in Abhängigkeit der z -Fokuslage F ermittelt.
2. Die ermittelten Werte werden in einem Datenspeicher 15 der Maschinensteuerung 11 als Referenz hinterlegt.
3. Die Maschinensteuerung 11 überprüft eigenständig, mannlos und vollautomatisch zum beliebigen, vom Kunden freidefinierten Zeitpunkt die aktuellen Werte
25 mit den hinterlegten Werten.
4. Ein Algorithmus der Maschinensteuerung 11 wertet die Ergebnisse aus.
5. Je nach Bedarf und Möglichkeit erfolgt eine beschränkte Nachstellung (Laserleistung, Fokuslage, ...) mit einem Hinweis bzw. einer Handlungsempfehlung.
6. Nach Überschreitung der definierten Grenzen wird ein Warnhinweis einge-
30 blendet bzw. Serviceeinsatz empfohlen.
7. In einer Ampelfunktion wird der Maschinenzustand angezeigt.

Im Ergebnis ermöglicht es das beschriebene Verfahren, digitalisierte Daten mittels eines Schnittmusters zu sammeln, woraus nach Möglichkeiten die Laserbearbeitungsmaschine 1 sich eigenständig einstellt.

- 5 Um den Einfluss eines Schweißparameters, z.B. des Schweißparameters „z-Fokuslage F des Laserstrahls 5“, beim Laserschweißen des Werkstücks 6 zu bestimmen, wird wie folgt vorgegangen:

Wie in **Fig. 7** gezeigt, werden an dem Werkstück 6 – von der Maschinensteuerung 11 vollautomatisiert gesteuert – am Startpunkt x_0 mehrere Laserdurchschweißungen 22 in Vorschubrichtung 23 durchgeführt, und zwar für hier fünf unterschiedliche Werte W_1 bis W_5 des Schweißparameters. Dabei wird bei den Laserdurchschweißungen 22 die Schweißgeschwindigkeit v des Laserstrahls 5 jeweils mindestens so weit erhöht, bis es bei den Endpunkten $x_{1,max}$ bis $x_{5,max}$ jeweils zu einem Durchschweißabriss kommt. Der Abrissdetektor 14 detektiert den Durchschweißabriss und schaltet den Laserstrahl 5 aus.

Anschließend wird – von der Maschinensteuerung 11 vollautomatisiert gesteuert – der Zusammenhang zwischen den Durchschweißlängen L der Laserdurchschweißungen 22, den zugehörigen Schweißzeiten t oder den zugehörigen Durchschweißabrissgeschwindigkeiten v_A und dem Schweißparameter anhand der gemessenen Durchschweißlängen L_1 bis L_5 , der zugehörigen Schweißzeiten t_1 bis t_5 oder der zugehörigen Durchschweißabrissgeschwindigkeiten $v_{A,1}$ bis $v_{A,5}$ der Laserdurchschweißungen 22 ermittelt.

In **Fig. 8** ist der interpolierte Zusammenhang zwischen den Durchschweißlängen L /Schweißzeiten t / Durchschweißabrissgeschwindigkeiten v_A von jeweils bis zur Durchschweißabrissgeschwindigkeit durchgeführten Laserdurchschweißungen 22 und dem Schneidparameter „z-Fokuslage F des Laserstrahls 5“ dargestellt. Diejenige z-Fokuslage des Laserstrahls 5, bei der die Durchschweißlänge L bzw. die zugehörige Schweißzeit t bzw. die zugehörige Durchschweißabrissgeschwindigkeit v_A der Laserdurchschweißungen 22 maximal ist, wird von der Maschinensteuerung 11 automatisiert als die optimale Fokuslage F_{opt} bestimmt, und die Maschinensteuerung 11 stellt die Fokuslage des Laserstrahls 5 selbständig auf diese optimale Fokuslage F_{opt} ein. Die Ermittlung der Fokuslage kann einmal mit geringer Laserleistung und einmal mit hoher Laserleistung durchgeführt werden. Die Differenz der beiden Fokuslagen entspricht dem leistungsabhängigen Fokusshift.

Um beim LMD-Prozess den Einfluss eines Umschmelzparameters, z.B. des Umschmelzparameters „z-Fokuslage F des Laserstrahls 5“, beim Umschmelzen von Metallpulver mittels des Laserstrahls 5 zu bestimmen, wird wie folgt vorgegangen:

5 Wie in **Fig. 9** gezeigt, werden in einem Pulverbett **36** der Pulverauflage **4** (alternativ ist auch ein Pulverstrahl möglich) – von der Maschinensteuerung **11** vollautomatisiert gesteuert – am Startpunkt x_0 mehrere Schmelzespuren **32** in Vorschubrichtung **33** durchgeführt, und zwar für hier fünf unterschiedliche Werte W_1 bis W_5 des Umschmelzparameters. Dabei wird bei den Schmelzespuren **32** die Vorschubgeschwindigkeit v des Laserstrahls **5** jeweils mindestens so weit erhöht, bis
10 es bei den Endpunkten $x_{1,max}$ bis $x_{5,max}$ jeweils zu einem Schmelzespurabriss kommt. Der Abrissdetektor **14** detektiert den Schmelzespurabriss und schaltet den Laserstrahl **5** aus.

Anschließend wird – von der Maschinensteuerung **11** vollautomatisiert gesteuert –
15 der Zusammenhang zwischen den Schmelzespurlängen L der Schmelzespuren **32**, den zugehörigen Umschmelzzeiten t oder den zugehörigen Schmelzespurabrissgeschwindigkeiten v_A und dem Umschmelzparameter anhand der gemessenen Schmelzespurlängen L_1 bis L_5 , der zugehörigen Umschmelzzeiten t_1 bis t_5 oder der zugehörigen Schmelzespurabrissgeschwindigkeiten $v_{A,1}$ bis $v_{A,5}$ der
20 Schmelzespuren **32** ermittelt.

In **Fig. 10** ist der interpolierte Zusammenhang zwischen den Schmelzespurlängen L / Umschmelzzeiten t / Schmelzespurabrissgeschwindigkeiten v_A von jeweils bis zur Schmelzespurabrissgeschwindigkeit durchgeführten Schmelzespuren **32** und dem Schneidparameter „z-Fokuslage F des Laserstrahls 5“ dargestellt. Diejenige
25 z-Fokuslage des Laserstrahls **5**, bei der die Schmelzespurlänge L bzw. die zugehörige Umschmelzzeit t bzw. die zugehörige Schmelzespurabrissgeschwindigkeit v_A der Schmelzespuren **32** maximal ist, wird von der Maschinensteuerung **11** automatisiert als die optimale Fokuslage F_{opt} bestimmt, und die Maschinensteuerung **11** stellt die Fokuslage des Laserstrahls **5** selbständig auf diese optimale Fokuslage F_{opt} ein. Die Ermittlung der Fokuslage kann einmal mit geringer Laserleistung
30 und einmal mit hoher Laserleistung durchgeführt werden. Die Differenz der beiden Fokuslagen entspricht dem leistungsabhängigen Fokusshift.

5

Patentansprüche

1. Verfahren zum Ermitteln, insbesondere zum automatisierten Ermitteln, des Einflusses eines Laserbearbeitungsparameters auf eine Laserbearbeitung mittels eines Laserstrahls (5), mit folgenden Schritten:

10

(a) Durchführen, insbesondere automatisiertes Durchführen, von linienförmigen Laserbearbeitungen (12; 22; 32) bei unterschiedlichen Werten (W_1 bis W_5) des Laserbearbeitungsparameters, wobei bei den Laserbearbeitungen (12; 22; 32) die Vorschubgeschwindigkeit (v) des Laserstrahls (5) jeweils mindestens so weit erhöht wird, bis es zu einem Bearbeitungsabriss kommt; und

15

(b) Ermitteln, insbesondere automatisiertes Ermitteln, des Zusammenhangs zwischen den Bearbeitungslängen (L), den zugehörigen Bearbeitungszeiten (t) oder den zugehörigen Abrissgeschwindigkeiten (v_A) der Laserbearbeitungen (12; 22; 32) und dem Laserbearbeitungsparameter anhand der gemessenen Bearbeitungslängen (L_1 bis L_5), der zugehörigen Bearbeitungszeiten (t_1 bis t_5) oder der zugehörigen Abrissgeschwindigkeiten ($v_{A,1}$ bis $v_{A,5}$) der Laserbearbeitungen (12; 22; 32).

20

25

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Einfluss eines Schneidparameters auf eine Werkstückbearbeitung mittels des Laserstrahls (5) ermittelt, insbesondere automatisiert ermittelt wird mit folgenden Schritten:

30

(a) Durchführen, insbesondere automatisiertes Durchführen, von linienförmigen Laserschnitten (12) an einem Werkstück (6) bei unterschiedlichen Werten (W_1 bis W_5) des Schneidparameters, wobei bei den Laserschnitten (12) die Schneidgeschwindigkeit (v) jeweils mindestens so weit erhöht wird, bis es zu einem Schnittabriss kommt; und

- (b) Ermitteln, insbesondere automatisiertes Ermitteln, des Zusammenhangs zwischen den Schnittlängen (L), den zugehörigen Schneidzeiten (t) oder den zugehörigen Schnittabrissgeschwindigkeiten (v_A) der Laserschnitte (12) und dem Schneidparameter anhand der gemessenen Schnittlängen (L_1 bis L_5), der zugehörigen Schneidzeiten (t_1 bis t_5) oder der zugehörigen Schnittabrissgeschwindigkeiten ($v_{A,1}$ bis $v_{A,5}$) der Laserschnitte (12).
- 5
3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Einfluss eines Schweißparameters auf eine Werkstückbearbeitung mittels des Laserstrahls (5) ermittelt, insbesondere automatisiert ermittelt wird mit folgenden Schritten:
- 10
- (a) Durchführen, insbesondere automatisiertes Durchführen, von linienförmigen Laserdurchschweißungen (22) an einem Werkstück (6) bei unterschiedlichen Werten (W_1 bis W_5) des Schweißparameters, wobei bei den Laserdurchschweißungen (22) die Schweißgeschwindigkeit (v) jeweils mindestens so weit erhöht wird, bis es zu einem Durchschweißabriss kommt; und
- 15
- (b) Ermitteln, insbesondere automatisiertes Ermitteln, des Zusammenhangs zwischen den Durchschweißlängen (L), den zugehörigen Schweißzeiten (t) oder den zugehörigen Durchschweißabrissgeschwindigkeiten (v_A) der Laserdurchschweißungen (22) und dem Schweißparameter anhand der gemessenen Durchschweißlängen (L_1 bis L_5), der zugehörigen Schweißzeiten (t_1 bis t_5) oder der zugehörigen Durchschweißabrissgeschwindigkeiten ($v_{A,1}$ bis $v_{A,5}$) der Laserdurchschweißungen (22).
- 20
- 25
4. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Einfluss eines Umschmelzparameters beim Umschmelzen von Metallpulver mittels des Laserstrahls (5) ermittelt, insbesondere automatisiert ermittelt wird mit folgenden Schritten:
- 30
- (a) Erzeugen, insbesondere automatisiertes Erzeugen, von linienförmigen Schmelzespuren (32) bei unterschiedlichen Werten (W_1 bis W_5) des Umschmelzparameters, wobei bei den Schmelzespuren (32) die

Vorschubgeschwindigkeit (v) des Laserstrahls (5) jeweils mindestens so weit erhöht wird, bis es zu einem Schmelzespuraabbriss kommt; und

- (b) Ermitteln, insbesondere automatisiertes Ermitteln, des Zusammenhangs zwischen den Schmelzespurlängen (L), den zugehörigen Umschmelzzeiten (t) oder den zugehörigen Schmelzespuraabbrissgeschwindigkeiten (v_A) der Schmelzespuren (32) und dem Umschmelzparameter anhand der gemessenen Schmelzespurlängen (L_1 bis L_5), der zugehörigen Umschmelzzeiten (t_1 bis t_5) oder der zugehörigen Schmelzespuraabbrissgeschwindigkeiten ($v_{A,1}$ bis $v_{A,5}$) der Schmelzespuren (32).

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Laserbearbeitungsparameter ein laserstrahlseitiger Parameter ist, insbesondere Wellenlänge, Strahlqualität, Intensitätsverteilung, Fokusslage in Strahlrichtung (z), Fokussdurchmesser oder Laserleistung, und/oder dass der Laserbearbeitungsparameter ein gasdynamischer Parameter bei vorbestimmter Gaszusammensetzung ist, insbesondere bestimmt durch Düsenart, Düsendurchmesser, Abstand von Düse und Werkstück.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorschubgeschwindigkeit (v), insbesondere für alle Laserbearbeitungen (12; 22; 32) in der gleichen Weise, schrittweise oder kontinuierlich mindestens so weit erhöht wird, bis es zu einem Bearbeitungsabbriss kommt.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Laserstrahl (5) bei Erreichen des Bearbeitungsabbrisses ausgeschaltet wird.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass derjenige Parameterwert, bei dem die Bearbeitungslänge (L) bzw. die zugehörige Bearbeitungszeit (t) bzw. die zugehörige Abrissgeschwindigkeit (v_A) der Laserbearbeitungen (12; 22; 32) maximal ist, als

der optimale Parameterwert bestimmt wird, insbesondere automatisiert bestimmt wird.

- 5 9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass der optimale Parameterwert durch Interpolation der Bearbeitungslängen (L) der Laserbearbeitungen (12; 22; 32), der zugehörigen Bearbeitungszeiten (t) oder der Abrissgeschwindigkeiten (v_A) bestimmt wird, insbesondere automatisiert bestimmt wird.
- 10 10. Verfahren nach Anspruch 8 oder 9, dadurch gekennzeichnet, dass der zu ermittelnde optimale Parameterwert eine in Strahlrichtung (z) optimale Fokusslage (F_{opt}) des Laserstrahls (5) ist und dass in Schritt (a) die Laserbearbeitungen (12; 22; 32) bei in Strahlrichtung (z) unterschiedlichen Fokusslagen des Laserstrahls (5) durchgeführt werden.
- 15 11. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass die in Strahlrichtung (z) optimale Fokusslage (F_{opt}) des Laserstrahls (5) jeweils für unterschiedliche Laserleistungen (L_1, L_2) ermittelt und daraus ein leistungsabhängiger Fokussshift (ΔF) bestimmt wird.
- 20 12. Verfahren nach Anspruch 8 oder 9, dadurch gekennzeichnet, dass der zu ermittelnde optimale Parameterwert ein Fokussdurchmesser (d_{opt}) des Laserstrahls (5) ist und dass in Schritt (a) die Laserbearbeitungen (12; 22; 32) bei unterschiedlichen Fokussdurchmessern des Laserstrahls (5) durchgeführt werden.
- 25 13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass bei nominell gleicher Laserleistung und nominell gleichem Fokussdurchmesser die Schritte (a) und (b) für unterschiedliche Werte des Laserbearbeitungsparameters „Fokusslage des Laserstrahls (5) in Strahlrichtung (z)“ zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführt werden, insbesondere automatisiert durchgeführt werden, und dass durch Vergleichen der jeweils ermittelten Zusammenhänge zwischen den Bearbeitungslängen (L), den zugehörigen Bearbeitungszeiten (t) oder den zugehörigen
- 30

Abrissgeschwindigkeiten (v_A) der Laserbearbeitungen (12; 22; 32) und dem Laserbearbeitungsparameter „Fokuslage des Laserstrahls (5) in Strahlrichtung (z)“ entweder eine Veränderung der auf eine Bearbeitungsebene (6) auftreffenden Laserleistung oder eine Veränderung des Fokusedurchmessers in der Bearbeitungsebene des Laserstrahls (5) festgestellt wird, insbesondere automatisiert festgestellt wird.

5

10

15

20

25

30

14. Laserbearbeitungsmaschine (1) mit einem Laserstrahlerzeuger (2) zum Erzeugen eines Laserstrahls (5), mit einem Laserbearbeitungskopf (3), aus dem der Laserstrahl (5) austritt, und einer Werkstück- oder Pulverauflage (4), die beide relativ zueinander bewegbar sind, und mit einer Maschinensteuerung (11), die programmiert ist, beim Laserbearbeiten die Vorschubgeschwindigkeit (v) des Laserstrahls (5) mindestens so weit zu erhöhen, bis es zu einem Bearbeitungsabriss kommt.
15. Laserbearbeitungsmaschine nach Anspruch 14, gekennzeichnet durch einen Abrissdetektor (14) zum Detektieren eines Bearbeitungsabrisses.
16. Laserbearbeitungsmaschine nach Anspruch 14 oder 15, gekennzeichnet durch einen Datenspeicher (15), in dem die Bearbeitungslänge (L), die Bearbeitungszeit (t) oder die Abrissgeschwindigkeit (v_A) sowie der zugehörige Wert des Laserbearbeitungsparameters, insbesondere automatisiert, gespeichert werden.
17. Laserbearbeitungsmaschine nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, dass die Maschinensteuerung (11) programmiert ist, anhand der gespeicherten Daten den Zusammenhang zwischen den Bearbeitungslängen (L), den zugehörigen Bearbeitungszeiten (t) oder den zugehörigen Abrissgeschwindigkeiten (v_A) und dem Bearbeitungsparameter automatisiert zu ermitteln und insbesondere mehrere ermittelte Zusammenhänge miteinander zu vergleichen und auszuwerten.
18. Computerprogrammprodukt, welches Codemittel aufweist, die zum Durchführen aller Schritte des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 13

angepasst sind, wenn das Programm auf einer Maschinensteuerung (11) einer Laserbearbeitungsmaschine (1) abläuft.

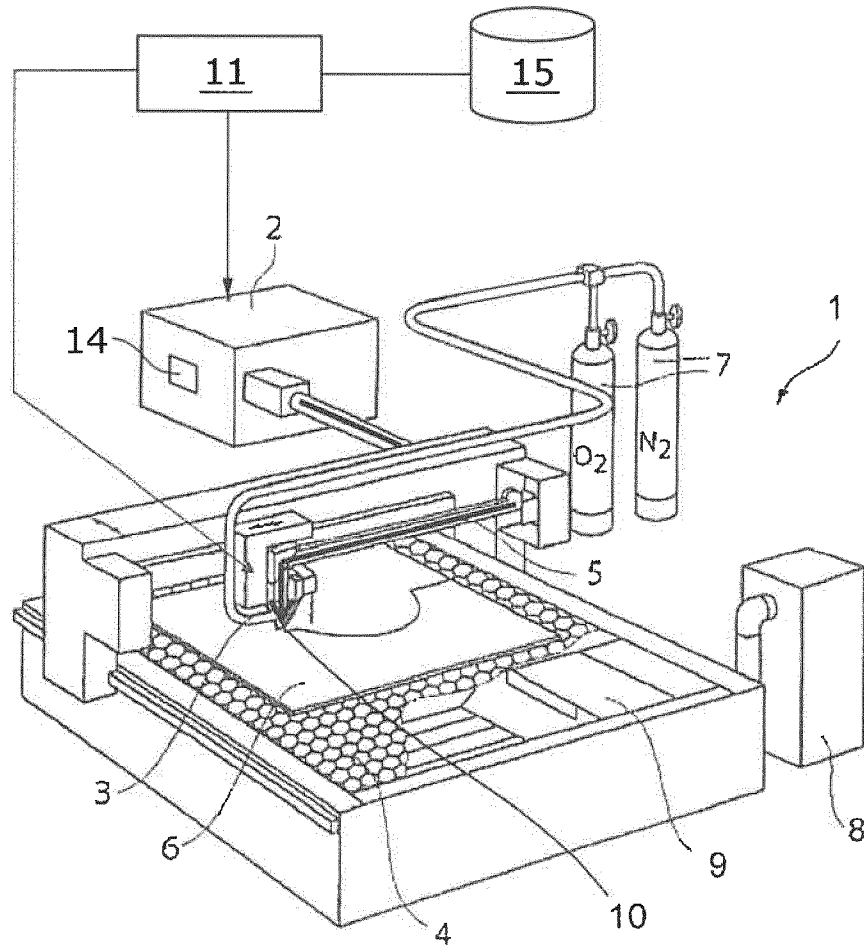


Fig. 1

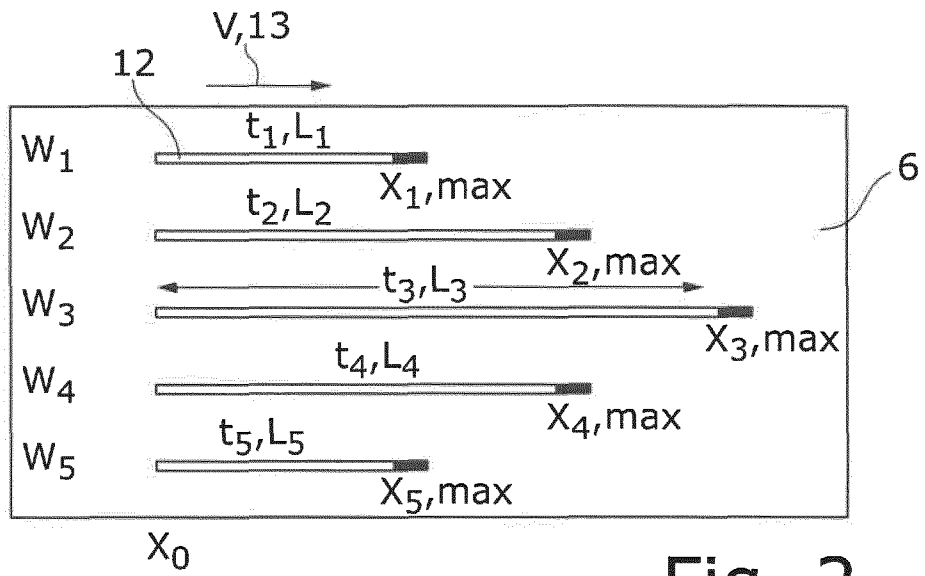


Fig. 2

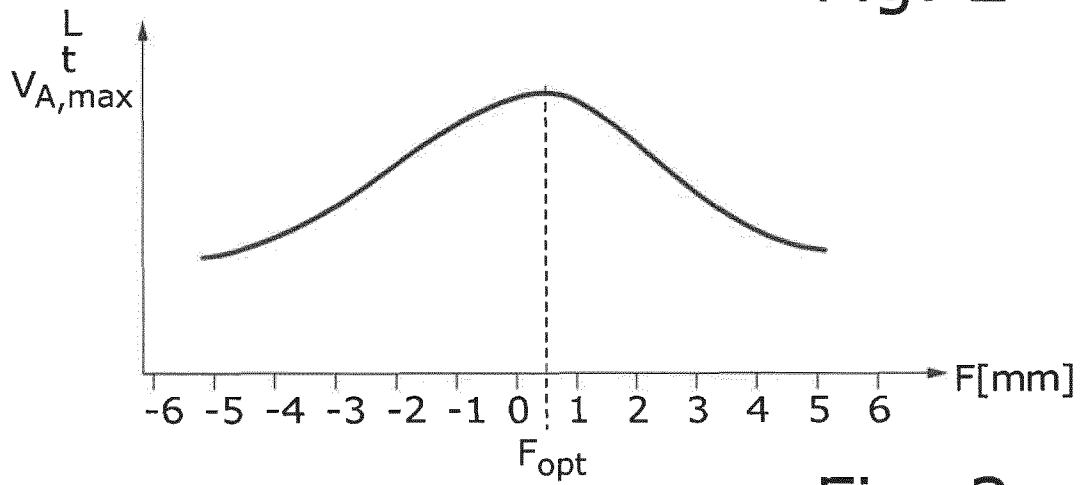


Fig. 3

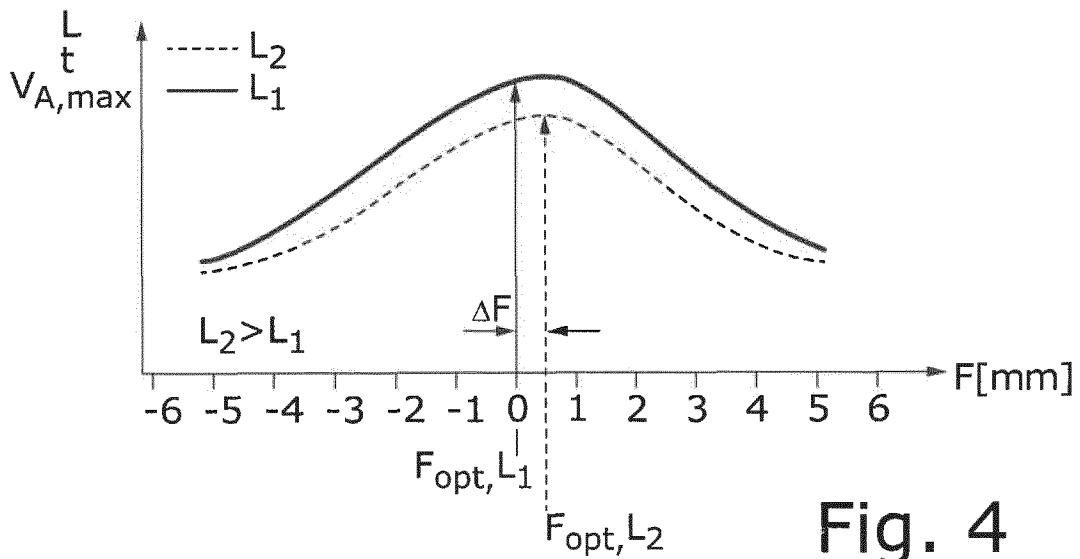


Fig. 4

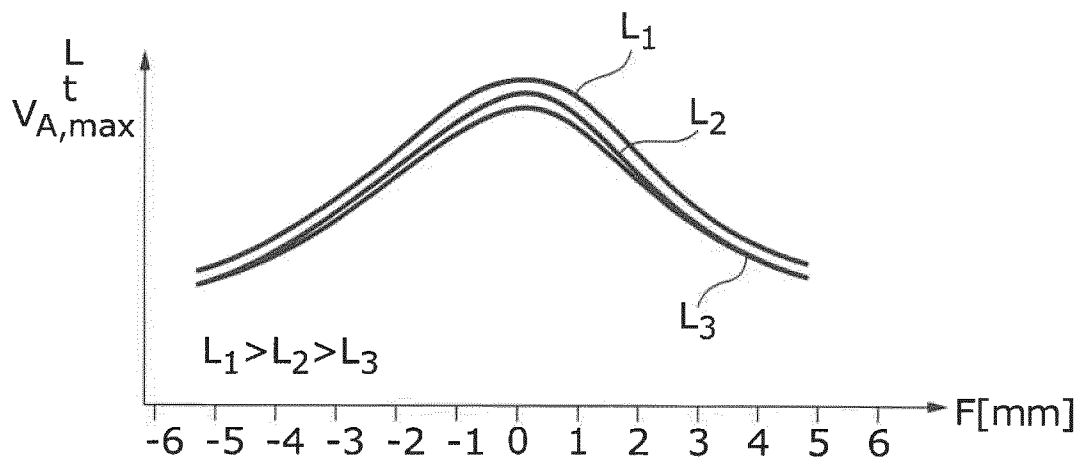


Fig. 5

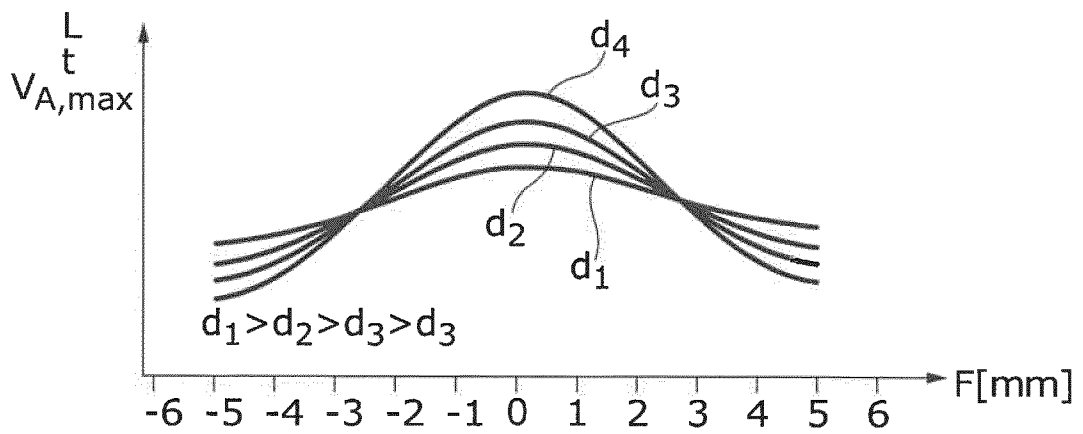


Fig. 6

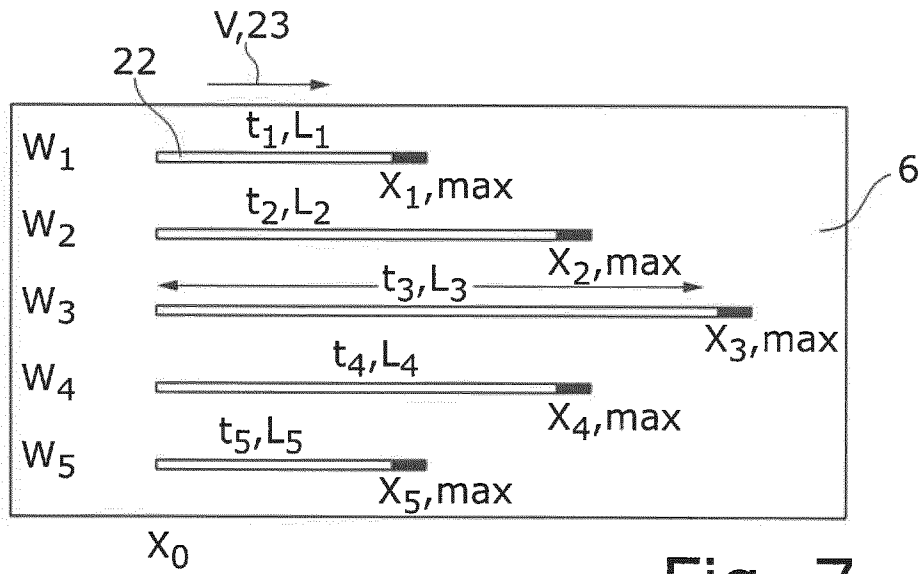


Fig. 7

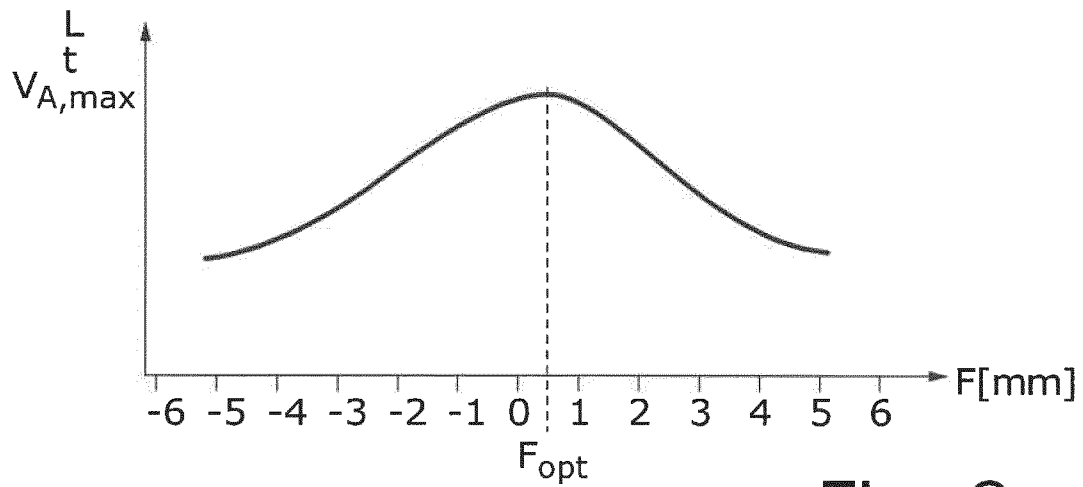


Fig. 8

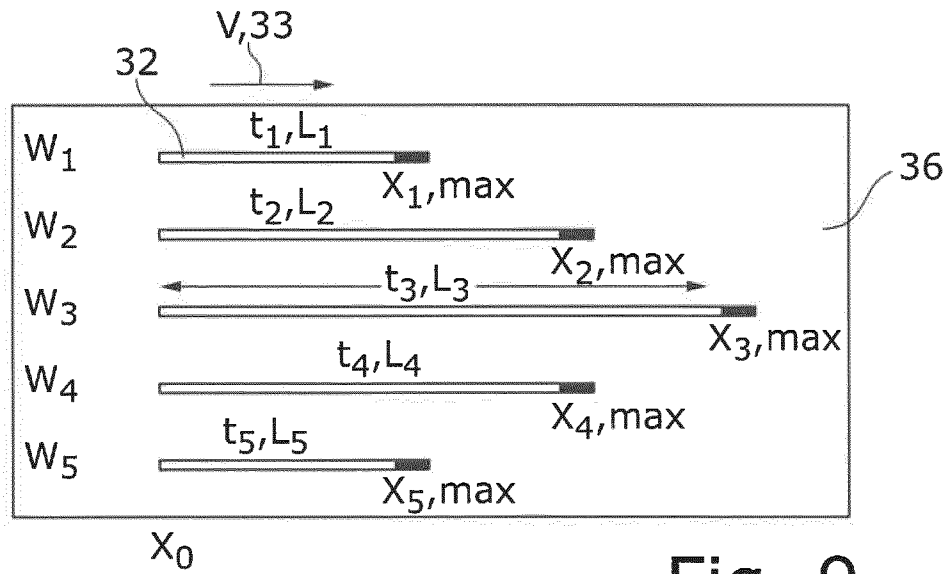


Fig. 9

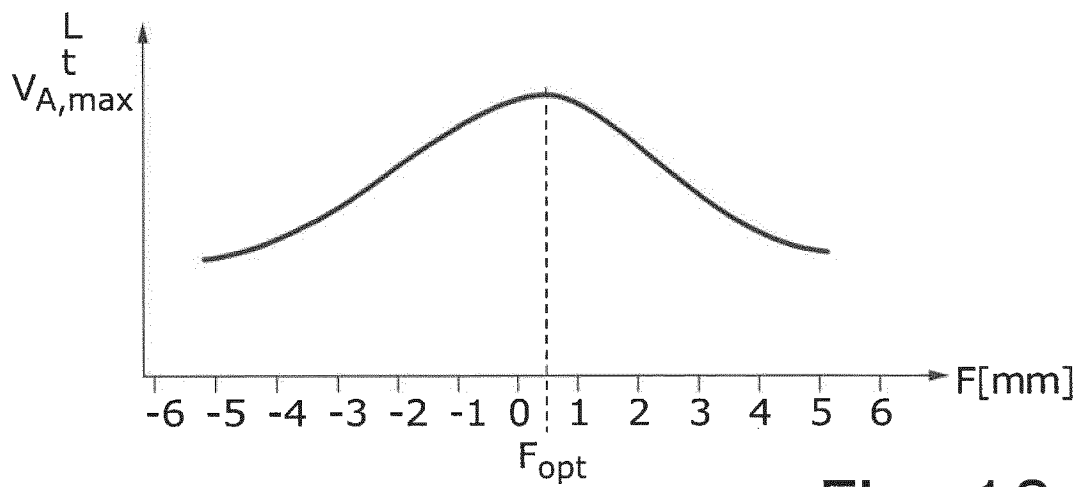


Fig. 10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2020/052016

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		
<i>B23K 26/03</i> (2006.01)i; <i>B23K 26/08</i> (2014.01)i; <i>B23K 26/21</i> (2014.01)i; <i>B23K 26/38</i> (2014.01)i; <i>B23K 26/382</i> (2014.01)i; <i>B23K 31/12</i> (2006.01)i; <i>B23K 37/02</i> (2006.01)i; <i>B23K 37/04</i> (2006.01)i; <i>G06F 30/20</i> (2020.01)i		
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; G06F		
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 Y	US 2010276080 A1 (A. JANSSON) 04 November 2010 (2010-11-04) paragraphs [0037] - [0040]; figures	1,3-18 2
Y	US 2006261050 A1 (V. KRISHNAN ET AL) 23 November 2006 (2006-11-23) paragraphs [0076] - [0077]; figures	2
X A	CA 2242139 A1 (AUTOMATED WELDING SYSTEMS INC) 29 December 1999 (1999-12-29) paragraphs [0038], [0044]; figures 22,31	1,3-18 2
A	DE 102012100721 B3 (TRUMPF WERKZEUGMASCHINEN GMBH) 11 April 2013 (2013-04-11) claims; figures	1-18
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> 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 12 June 2020		Date of mailing of the international search report 02 July 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/EP2020/052016

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
US	2010276080	A1	04 November 2010	AU	2007206885	A1	26 July 2007
				CN	101384394	A	11 March 2009
				EP	1979123	A1	15 October 2008
				FI	20060049	A	20 July 2007
				JP	5308827	B2	09 October 2013
				JP	2009523629	A	25 June 2009
				KR	20090003186	A	09 January 2009
				US	2010276080	A1	04 November 2010
				WO	2007082992	A1	26 July 2007
US	2006261050	A1	23 November 2006	AT	391576	T	15 April 2008
				CN	1826206	A	30 August 2006
				DE	602004012999	T2	28 May 2009
				EP	1631415	A1	08 March 2006
				GB	2402230	A	01 December 2004
				JP	4751319	B2	17 August 2011
				JP	2006525874	A	16 November 2006
				KR	20060009019	A	27 January 2006
				MY	149114	A	15 July 2013
				TW	I260843	B	21 August 2006
				US	2006261050	A1	23 November 2006
				WO	2004105995	A1	09 December 2004
				CA	2242139	A1	29 December 1999
BR	9912504	A	02 May 2001				
CA	2242139	A1	29 December 1999				
CN	1307510	A	08 August 2001				
EP	1109647	A1	27 June 2001				
GB	2354196	A	21 March 2001				
KR	20010053323	A	25 June 2001				
WO	0000320	A1	06 January 2000				
DE	102012100721	B3	11 April 2013				
				DE	102012100721	B3	11 April 2013
				WO	2013113479	A1	08 August 2013

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2020/052016

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES				
INV.	B23K26/03	B23K26/08	B23K26/21	B23K26/38
	B23K31/12	B23K37/02	B23K37/04	B23K26/382
			G06F30/20	
ADD.				
Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC				

B. RECHERCHIERTE GEBIETE
Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole) B23K G06F

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 2010/276080 A1 (A. JANSSON) 4. November 2010 (2010-11-04)	1,3-18
Y	Absätze [0037] - [0040]; Abbildungen -----	2
Y	US 2006/261050 A1 (V. KRISHNAN ET AL) 23. November 2006 (2006-11-23)	2
	Absätze [0076] - [0077]; Abbildungen -----	
X	CA 2 242 139 A1 (AUTOMATED WELDING SYSTEMS INC) 29. Dezember 1999 (1999-12-29)	1,3-18
A	Absätze [0038], [0044]; Abbildungen 22,31 -----	2
A	DE 10 2012 100721 B3 (TRUMPF WERKZEUGMASCHINEN GMBH) 11. April 2013 (2013-04-11)	1-18
	Ansprüche; Abbildungen -----	

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	Absenddatum des internationalen Recherchenberichts
12. Juni 2020	02/07/2020

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/EP2020/052016

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 2010276080 A1	04-11-2010	AU 2007206885 A1	26-07-2007
		CN 101384394 A	11-03-2009
		EP 1979123 A1	15-10-2008
		FI 20060049 A	20-07-2007
		JP 5308827 B2	09-10-2013
		JP 2009523629 A	25-06-2009
		KR 20090003186 A	09-01-2009
		US 2010276080 A1	04-11-2010
		WO 2007082992 A1	26-07-2007
		US 2006261050 A1	23-11-2006
CN 1826206 A	30-08-2006		
DE 602004012999 T2	28-05-2009		
EP 1631415 A1	08-03-2006		
GB 2402230 A	01-12-2004		
JP 4751319 B2	17-08-2011		
JP 2006525874 A	16-11-2006		
KR 20060009019 A	27-01-2006		
MY 149114 A	15-07-2013		
TW I260843 B	21-08-2006		
US 2006261050 A1	23-11-2006		
WO 2004105995 A1	09-12-2004		
CA 2242139 A1	29-12-1999	AU 4595099 A	17-01-2000
		BR 9912504 A	02-05-2001
		CA 2242139 A1	29-12-1999
		CN 1307510 A	08-08-2001
		EP 1109647 A1	27-06-2001
		GB 2354196 A	21-03-2001
		KR 20010053323 A	25-06-2001
		WO 0000320 A1	06-01-2000
DE 102012100721 B3	11-04-2013	CN 104271307 A	07-01-2015
		DE 102012100721 B3	11-04-2013
		WO 2013113479 A1	08-08-2013