

(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
16. April 2020 (16.04.2020)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2020/074713 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

B23K 26/03 (2006.01) *B23K 26/38* (2014.01)
B23K 26/042 (2014.01) *B23K 31/12* (2006.01)
B23K 26/046 (2014.01) *B25J 9/16* (2006.01)
B23K 26/08 (2014.01) *G05B 23/02* (2006.01)
B23K 26/142 (2014.01) *G05B 19/4061* (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2019/077612

(22) Internationales Anmeldedatum:
11. Oktober 2019 (11.10.2019)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2018 217 526.8
12. Oktober 2018 (12.10.2018) DE

(71) Anmelder: **TRUMPF WERKZEUGMASCHINEN
GMBH + CO. KG** [DE/DE]; Johann-Maus-Strasse 2,
71254 Ditzingen (DE).

(72) Erfinder: **REGAARD, Boris**; Haenflingweg 8, 70499
Stuttgart (DE). **MAGG, Winfried**; Gottfried-Keller-Stras-
se 9, 71254 Ditzingen (DE).

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

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,
AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY,
BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM,
DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN,
KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD,

(54) Title: METHOD FOR IDENTIFYING A PARAMETER OF A PROCESSING PROCESS AND PROCESSING MACHINE

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUM ERMITTELN EINER KENNGRÖSSE EINES BEARBEITUNGSPROZESSES UND
BEARBEITUNGSMASCHINE

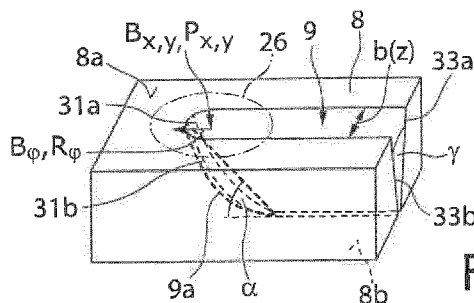


Fig. 3

(57) Abstract: The invention relates to a method for identifying at least one parameter (α , γ , $P_{X,Y}$, R_ϕ) for the process quality during a processing process, in particular during a laser cutting process, comprising: in particular cutting processing of a workpiece (8) while moving a processing tool, in particular a laser processing head, and the workpiece (8) relative to each other, monitoring a region (26) on the workpiece (8), which preferably comprises an interaction region of the processing tool, in particular of the laser processing head, together with the workpiece (8) and identifying at least one parameter (α , γ , $P_{X,Y}$, R_ϕ) for the process quality based on the monitored region (26). The method is characterized by identifying at least one position-dependent parameter for the process quality based on a plurality of measured values of the at least one parameter (α) at the same processing position ($B_{X,Y}$) and/or at least one directionally dependent parameter for the process quality based on a plurality of measured values of the at least one parameter (α) in the same processing direction (B_ϕ), in particular in the same processing direction (B_ϕ) at one and the same processing position ($B_{X,Y}$). The invention further relates to an associated processing machine (1).

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Ermitteln mindestens einer Kenngröße (α , γ , $P_{X,Y}$, R_ϕ) für die Prozessqualität bei einem Bearbeitungsprozess, insbesondere bei einem Laserschneidprozess, umfassend: Insbesondere schneidendes Bearbeiten eines Werkstücks (8) unter Bewegen eines Bearbeitungswerkzeugs, insbesondere eines Laserbearbeitungskopfs, und des Werkstücks (8) relativ zueinander, Überwachen eines Bereichs (26) an dem Werkstück (8), der bevorzugt einen Wechselwirkungsbe-
reich des Bearbeitungswerkzeugs, insbesondere des

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:

- mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

Laserbearbeitungskopfs, mit dem Werkstück (8) umfasst, sowie Ermitteln mindestens einer Kenngröße (α , γ , $P_{X,Y}$, R_ϕ) für die Prozessqualität anhand des überwachten Bereichs (26). Das Verfahren ist gekennzeichnet durch Ermitteln mindestens einer positionsabhängigen Kenngröße für die Prozessqualität anhand einer Mehrzahl von Messwerten der mindestens einen Kenngröße (α) an derselben Bearbeitungsposition ($B_{X,Y}$) und/oder mindestens einer richtungsabhängigen Kenngröße für die Prozessqualität anhand einer Mehrzahl von Messwerten der mindestens einen Kenngröße (α) in derselben Bearbeitungsrichtung (B_ϕ), insbesondere in derselben Bearbeitungsrichtung (B_ϕ) an ein- und derselben Bearbeitungsposition ($B_{X,Y}$). Die Erfindung betrifft auch eine zugehörige Bearbeitungsmaschine (1).

5

10

15

Verfahren zum Ermitteln einer Kenngröße eines Bearbeitungsprozesses und
Bearbeitungsmaschine

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Ermitteln mindestens einer
20 Kenngröße für die Prozessqualität bei einem Bearbeitungsprozess, insbesondere bei
einem Laserschneidprozess, umfassend: Insbesondere schneidendes Bearbeiten
eines Werkstücks unter Bewegen eines Bearbeitungswerkzeugs, insbesondere eines
Laserbearbeitungskopfs, und des Werkstücks relativ zueinander, Überwachen eines
Bereichs an dem Werkstück, der bevorzugt einen Wechselwirkungsbereich des
25 Bearbeitungswerkzeugs mit dem Werkstück umfasst, sowie Ermitteln mindestens
einer Kenngröße für die Prozessqualität anhand des überwachten Bereichs. Die
Erfindung betrifft auch eine Bearbeitungsmaschine, umfassend: ein
Bearbeitungswerkzeug zur insbesondere schneidenden Bearbeitung eines
Werkstücks, eine Bewegungseinrichtung zur Bewegung des Bearbeitungswerkzeugs
30 und des Werkstücks relativ zueinander, eine Überwachungseinrichtung zur
Überwachung eines Bereichs an dem Werkstück, der bevorzugt einen
Wechselwirkungsbereich des Bearbeitungswerkzeugs mit dem Werkstück umfasst,
sowie eine Auswerteeinrichtung, die konfiguriert ist, anhand des überwachten
Bereichs mindestens eine Kenngröße für die Prozessqualität zu ermitteln.

35

Eine solches Verfahren und eine entsprechende Vorrichtung sind beispielsweise aus der WO2012107331A1 bekannt geworden. Dort ist u.a. beschrieben, dass als Kenngröße für die Prozessqualität ein Schneidfrontwinkel eines Laserschneidprozesses ermittelt werden kann.

5

Auch aus der WO2015036140A1 sind ein Verfahren und eine Vorrichtung bekannt, bei denen anhand des erfassten Wechselwirkungsbereichs der Schneidfrontwinkel einer bei einem Laserschneidprozess gebildeten Schnittfuge als charakteristische Kenngröße des Schneidprozesses ermittelt wird. Der Schneidfrontwinkel stellt eine

10 Kenngröße für die Prozessqualität bzw. für die Prozessrobustheit insbesondere beim Brennschneiden dar.

15

In der WO2018069291A1 sind ein Verfahren und eine Vorrichtung beschrieben, bei denen mindestens eine Messgröße für den Verlauf der Spaltbreite einer Schnittfuge in Dickenrichtung des Werkstücks, insbesondere für einen Winkel zwischen den

beiden Schnittflanken der Schnittfuge, anhand mindestens eines Bildes eines zu überwachenden Bereichs des Werkstücks ermittelt wird. Der (Öffnungs-)Winkel zwischen den beiden Schnittflanken der Schnittfuge stellt eine Kenngröße für die Prozessqualität bzw. für die Prozessrobustheit insbesondere beim

20 Schmelzschnneiden dar.

25

In der DE102005022095A1 sind ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Bestimmung einer lateralen Relativbewegung zwischen einem Bearbeitungskopf und einem Werkstück bei der Bearbeitung des Werkstücks beschrieben. Bei dem Verfahren wird

die Oberfläche des Werkstücks im Bereich des Bearbeitungskopfs mit optischer Strahlung beleuchtet und von der Oberfläche des Werkstücks reflektierte optische Strahlung wird wiederholt mit einem optischen Detektor orts aufgelöst erfasst, um optische Reflexionsmuster der Oberfläche des Werkstücks zu unterschiedlichen Zeiten zu erhalten. Die laterale Relativbewegung wird durch Vergleich der zeitlich

30 aufeinander folgenden Reflexionsmuster ermittelt.

Aus der EP3159093A1 ist ein Verfahren zur Kontrolle von Laserschneidvorgängen im Hochleistungsbereich mit Schneidvorgangsunterbrechung sowie ein entsprechendes Verfahren beschrieben. Bei dem Verfahren wird zumindest eine

Teilstrecke einer im Zuge eines ersten Teilbearbeitungsvorgangs geschnittenen Bearbeitungsstrecke gescannt und auf Basis des Scanergebnisses mindestens ein Qualitätsmerkmal des Bearbeitungsprozesses bestimmt und mit vordefinierten Qualitätsvorgaben verglichen. Für den Schneidvorgang kann zusätzlich zumindest zeitweise ein Online-Prozessüberwachungsverfahren durchgeführt werden, wobei je nach Resultat des Vergleichs eine Anpassung zumindest eines Überwachungsparameters eines Online-Überwachungsparametersatzes erfolgt.

In der DE 102011079083A1 ist ein Verfahren zum Bearbeiten eines Werkstücks beschrieben, bei dem zumindest ausschnittsweise eine Oberflächentopographie des zu bearbeitenden Werkstücks erfasst und anhand der zuvor erfassten Oberflächentopographie ein minimaler Soll-Abstand des Bearbeitungskopfs von dem Werkstück bestimmt wird.

Aus der EP1497851 ist es bekannt, für das Laserschneiden eines Substrats die Laserenergiedichte in einer Fokusebene mittels eines Leistungsmessgeräts positionsabhängig auszumessen und die gemessenen Werte zu verwenden, um durch Regelung der Pulsenergie und/oder der Pulswiederholrate für eine konstante Laserenergiedichte an abgetasteten Punkten in einem Sichtfeld auf dem Substrat zu sorgen. Der Laser wird von einer maschinenspezifischen „Laserschneide-Strategiedatei“ gesteuert.

Aufgabe der Erfindung

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren und eine Bearbeitungsmaschine bereitzustellen, bei dem mindestens eine Kenngröße eines Bearbeitungsprozesses ermittelt wird, um Störungen an einer für die Bearbeitung verwendeten Bearbeitungsmaschine zu erkennen.

Gegenstand der Erfindung

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch ein Verfahren der eingangs genannten Art gelöst, welches gekennzeichnet ist durch die Schritte: Ermitteln mindestens einer positionsabhängigen Kenngröße für die Prozessqualität anhand einer Mehrzahl von

Messwerten der mindestens einen Kenngröße an derselben Bearbeitungsposition und/oder mindestens einer richtungsabhängigen Kenngröße für die Prozessqualität anhand einer Mehrzahl von Messwerten der mindestens einen Kenngröße in derselben Bearbeitungsrichtung, insbesondere in derselben Bearbeitungsrichtung an ein- und derselben Bearbeitungsposition. Im Sinne dieser Anmeldung wird unter dem Begriff Prozessqualität auch die Prozessrobustheit verstanden, d.h. beide Begriffe werden synonym verwendet. Unter einer Kenngröße für die Prozessqualität wird im Sinne dieser Anmeldung auch eine Kenngröße verstanden, welche die Prozessqualität beeinflusst.

Insbesondere flächig bearbeitende Bearbeitungsmaschinen, beispielsweise 2D-Laserschneidmaschinen, können richtungs- und/oder positionsabhängige Störungen aufweisen, die das Prozessergebnis bzw. die Prozessqualität beeinflussen. Derartige Störungen sind typischerweise lediglich von der Bearbeitungsposition bzw. von der Bearbeitungsrichtung abhängig, aber im Wesentlichen unabhängig von der Geometrie der zu schneidenden Kontur, der Art des Bearbeitungsprozesses (z.B. Brennschneiden oder Schmelzschneiden) und den Bearbeitungsparametern. Unter einer Störung wird im Sinne dieser Anmeldung auch eine Abweichung von einem Referenzzustand verstanden.

Beispielsweise können positionsabhängige Störungen an im Arbeitsraum angeordneten (Auflage-)Stegen auftreten und richtungsabhängige Störungen können auf polarisations- und/oder Kaustik-Inhomogenitäten des Laserstrahls, auf Inhomogenitäten des Gasstroms bzw. Gasdrucks eines beim Bearbeiten aus einer Düse austretenden Gasstroms (z.B. aufgrund einer Beschädigung der Düse oder aufgrund eines nicht vollständig symmetrischen Aufbaus des Bearbeitungskopfs, welcher das Gas der Düse zuführt), auf eine Materialanisotropie, etc. zurückzuführen sein. Mit Hilfe des oben beschriebenen Verfahrens ist es möglich, derartige richtungs- und/oder positionsabhängige Störungen zu erkennen bzw. zu lokalisieren. Zu diesem Zweck ist es erforderlich, ebenfalls auftretende Abweichungen, die durch nicht positions- oder richtungsabhängige Störungen hervorgerufen werden, durch eine ausreichende Anzahl von Messwerten der Kenngröße zu eliminieren, so dass eine (im Wesentlichen ausschließlich) positions- bzw. richtungsabhängige Kenngröße gebildet wird. Die Anzahl von Messwerten der Kenngröße, die für die

Elimination benötigt werden, hängt davon ab, wie signifikant die richtungs- und/oder positionsabhängige Störung ist. Die Anzahl von Messwerten kann von drei Messwerten (in Extremfällen) bis zu mehreren hundert Messwerten reichen, wenn die Positions- und/oder Richtungsabhängigkeit der Störung vergleichsweise gering ausfällt. Beispielsweise kann bei einer durch eine leicht inhomogene Strahlkaustik des Laserstrahls hervorgerufenen richtungsabhängigen Störung eine hohe Anzahl von Messwerten erforderlich sein, während bei einem optischen Signal einer Laserschneidsensorik, die beim Überfahren eines Auflagesteges erfasst wird, eine geringe Anzahl an Messwerten der Kenngröße erforderlich ist, um den Beitrag von nicht positionsabhängigen Störungen zu eliminieren.

Unter einer richtungsabhängigen Kenngröße wird im Sinne dieser Anmeldung eine Kenngröße verstanden, die von der Bearbeitungsrichtung abhängig ist und die beispielsweise durch einen Winkel (zwischen 0° und 360°) parametrisiert wird. Die mindestens eine richtungsabhängige Kenngröße kann ggf. unabhängig von der jeweiligen Bearbeitungsposition ermittelt werden, d.h. diese wird nicht nach der Bearbeitungsposition unterschieden, sondern für die Ermittlung der richtungsabhängigen Kenngröße werden Messwerte an Bearbeitungspositionen aus dem gesamten Bearbeitungsfeld verwendet. In der Regel wird die richtungsabhängige Kenngröße jedoch an einer jeweiligen Bearbeitungsposition ermittelt, d.h. die Messwerte, die für die Ermittlung der richtungsabhängigen Kenngröße herangezogen werden, werden alle an derselben Bearbeitungsposition gemessen.

Bei einer Variante wird zum Ermitteln der positionsabhängigen Kenngröße und/oder der richtungsabhängigen Kenngröße für die Prozessqualität eine statistische Analyse der Mehrzahl von Messwerten durchgeführt. Im einfachsten Fall kann die positions- bzw. richtungsabhängige Kenngröße den Mittelwert der an der jeweiligen Bearbeitungsposition bzw. in der jeweiligen Bearbeitungsrichtung ermittelten Messwerte bilden. Es versteht sich aber, dass der Mittelwert nicht in jedem Fall ein geeignetes Maß darstellt, um aus der Mehrzahl von Messwerten die positions- bzw. richtungsabhängige Kenngröße zu ermitteln, sondern dass für die Elimination von nicht richtungs- bzw. positionsabhängigen Störungen ein anderes statistisches Maß,

beispielsweise der Median, oder komplexere statistische Auswertungen vorgenommen werden können.

Bei einer weiteren Variante wird die Kenngröße während eines

5 Bearbeitungsprozesses kontinuierlich, z.B. mittels eines Sensors bzw. einer Überwachungseinrichtung, erfasst und ein momentan ermittelter Messwert der Kenngröße wird einer jeweiligen Bearbeitungsposition und/oder einer jeweiligen Bearbeitungsrichtung zugeordnet. Für die Überwachung der Prozessqualität während der Bearbeitung wird typischerweise mindestens eine Kenngröße für die
10 Prozessqualität kontinuierlich überwacht, beispielsweise um instantan in den Bearbeitungsprozess eingreifen zu können. Die Ermittlung der Kenngröße während des Bearbeitungsprozesses erfolgt entlang einer vorgegebenen Bahnkurve, die bei einem Laserschneidprozess der Schnittkontur entspricht und die der Maschinensteuerung bekannt ist. Die zu einem bestimmten Zeitpunkt ermittelte
15 Kenngröße kann daher einer Bearbeitungsposition und einer (momentanen) Bearbeitungsrichtung zugeordnet werden. Gegebenenfalls kann die momentane Bearbeitungsrichtung sowie ggf. auch die Bearbeitungsposition ebenfalls durch einen Sensor bzw. eine Überwachungseinrichtung erfasst werden, wie dies beispielsweise für die Bearbeitungsrichtung bzw. die laterale Relativbewegung zwischen
20 Bearbeitungswerkzeug und Werkstück in der eingangs zitierten DE102005022095A1 beschrieben ist. Es versteht sich, dass die Bearbeitungsposition bzw. die Bearbeitungsrichtung typischerweise mit einer vorgegebenen Diskretisierung, d.h. mit einem vorgegebenen Rastermaß, der kontinuierlich erfassten Kenngröße zugeordnet wird.

25

Bei einer weiteren Variante werden anhand der positionsabhängigen Kenngröße Bearbeitungspositionen ermittelt, die mindestens einen Störpositionsbereich bei der Bearbeitung bilden und/oder anhand der richtungsabhängigen Kenngröße werden Bearbeitungsrichtungen bestimmt, die mindestens einen Störwinkelbereich bei der
30 Bearbeitung bilden. Durch häufiges Messen an derselben Bearbeitungsposition bzw. in derselben Bearbeitungsrichtung können Vorzugspositionen- und Vorzugswinkel bzw. Störpositionen und Störwinkel identifiziert werden. Die Identifizierung der Störpositionen bzw. der Störwinkel kann ebenfalls mit Hilfe von statistischen Methoden anhand der positionsabhängigen bzw. richtungsabhängigen Kenngröße

erfolgen. Im einfachsten Fall werden die Störpositionsbereiche bzw. die Störwinkelbereiche anhand eines Vergleichs der positions- bzw. der richtungsabhängigen Kenngröße mit einem Schwellwert ermittelt; Bearbeitungspositionen bzw. -richtungen, an denen die Kenngröße den Schwellwert über- oder unterschreitet, werden als Störpositionsbereiche bzw. als Störwinkelbereiche identifiziert.

Beispielsweise können bei Laserbearbeitungsmaschinen Vorzugs- bzw. Störwinkelbereiche ermittelt werden, deren Ursache beispielsweise im Bearbeitungsstrahl (Polarisation, Kaustik-Inhomogenität, Auftreffwinkel, etc.), in den für die Bewegung des Bearbeitungswerkzeugs und/oder des Werkstücks verwendeten Bewegungseinrichtungen bzw. Antrieben (Quer- und/oder Längsschwingungen) oder z.B. im Material des Werkstücks (Anisotropie, Walzrichtung) liegen.

Entsprechend können Störpositionsbereiche festgestellt werden, die von der Bearbeitungsposition bzw. vom der Position im Arbeitsraum abhängen und die ihre Ursache beispielsweise in der Laserstrahlführung (insbesondere bei einem CO₂-Laser), in der mechanischen Aufhängung des Bearbeitungswerkzeugs, beispielsweise in Form eines Laserbearbeitungskopfs, (z.B. ungünstige Momente bei auskragenden Stützen, Zahnradspiel, mechanische Toleranzen, etc.), der mechanischen Lagerung des Werkstücks (Blechs), z.B. einer Paletten-Schwingung, schlechten bzw. zu wenigen Auflagestegen, den Auflagepunkten der Stege (potentielle Fehlstellen beim Überschreiten des Auflagepunktes, Prozessbeeinflussung durch verschlackte Stege) oder den Werkstück- bzw. Blecheigenschaften (Ausdünnung im Randbereich, verschmutzte Bereiche) haben können.

Bei einer Variante werden Bearbeitungspositionen und/oder Bearbeitungsrichtungen bei der Bewegung des Bearbeitungswerkzeugs und des Werkstücks relativ zueinander in Abhängigkeit von der ermittelten positionsabhängigen Kenngröße, insbesondere von dem Störpositionsbereich, und/oder anhand der richtungsabhängigen Kenngröße, insbesondere von dem Störwinkelbereich, festgelegt. Das Wissen um Bereiche und/oder Richtungen mit besonders guten bzw.

mit besonders schlechten Prozesseigenschaften kann dazu genutzt werden, um Störpositionsbereiche bzw. Störwinkelbereiche bei der Bearbeitung zu meiden, was beispielsweise durch eine geeignete Schachtelung bzw. Anordnung der Schnittkonturen der von dem Werkstück freizuschneidenden Werkstückteile, d.h. durch eine geeignete Prozessplanung des Bearbeitungsprozesses realisiert werden kann. Es versteht sich, dass auch eine zielgerichtete Fehlerdiagnose betrieben werden kann, d.h. es kann eine zielgerichtete Prüfung der Ursachen für die Störung(en) an einem jeweiligen Störpositionsbereich bzw. an einem jeweiligen Störwinkelbereich durchgeführt werden. Sowohl die Fehlerdiagnose als auch die Optimierung der Arbeitsplanung, d.h. das Meiden der kritischen Störpositionsbereiche bzw. der Störwinkelbereiche kann vollautomatisch ohne das Zutun eines Bedieners erfolgen.

Bei einer weiteren Variante wird die Mehrzahl der Messwerte der mindestens einen Kenngröße bei mehreren Bearbeitungsprozessen an derselben Bearbeitungsmaschine ermittelt und/oder die positionsabhängige Kenngröße und/oder die richtungsabhängige Kenngröße wird/werden auf mehreren baugleichen Bearbeitungsmaschinen ermittelt. Im ersten Fall werden an einer konkreten Bearbeitungsmaschine positions- bzw. richtungsabhängige Kenngrößen ermittelt, um Fehler zu identifizieren, im zweiten Fall werden an mehreren baugleichen Bearbeitungsmaschinen positions- bzw. richtungsabhängige Kenngrößen ermittelt. Durch den Vergleich zwischen den polarisations- bzw. richtungsabhängigen Kenngrößen, die auf mehreren baugleichen Bearbeitungsmaschinen ermittelt wurden, kann der Einfluss der individuellen Bearbeitungsmaschine eliminiert werden und es können systematische Schwachstellen der Maschinenkonstruktion eines jeweiligen Typs von Bearbeitungsmaschine erkannt werden.

Bei einer Weiterbildung wird die Mehrzahl der Messwerte der mindestens einen Kenngröße bei mehreren Bearbeitungsprozessen an derselben Bearbeitungsmaschine ermittelt und beim Ermitteln der positionsabhängigen Kenngröße und/oder der richtungsabhängigen Kenngröße wird eine zeitliche Änderung der Messwerte berücksichtigt. Die Messwerte der mindestens einen Kenngröße, die an aufeinander folgenden Bearbeitungsprozessen an ein- und derselben Bearbeitungsmaschine ermittelt werden, können einer zeitlichen Änderung

unterworfen sein. Handelt es sich bei der Kenngröße, für welche die Messwerte ermittelt werden, beispielsweise um eine Fokusslage in Strahlrichtung des Laserstrahls, so kann diese sich beispielsweise durch eine Verschmutzung einer Bearbeitungsoptik zeitlich verändern, da diese zu einer so genannten thermischen Linse führen kann, die eine Veränderung der Fokusslage zur Folge hat. Für den Fall, dass eine statistisch signifikante zeitliche Änderung der Messwerte festgestellt wird, kann diese Änderung bei der Ermittlung der Kenngröße berücksichtigt werden.

Generell ist es möglich, die zeitliche Änderung der Messwerte dadurch zu berücksichtigen, dass ältere Messwerte bei der Ermittlung der Kenngröße weniger stark gewichtet werden als Messwerte, die bei Bearbeitungsprozessen ermittelt wurden, die noch nicht so lange zurückliegen. Auch können ggf. Messwerte, die bei sehr lange zurückliegenden Bearbeitungsprozessen ermittelt wurden, bei der Ermittlung der Kenngröße nicht mehr berücksichtigt werden. Insbesondere können diese Messwerte ggf. verworfen bzw. gelöscht werden.

Bei einer weiteren Variante umfasst das Verfahren das Speichern der ermittelten positionsabhängigen Kenngröße und/oder des Störpositionsbereichs und/oder der ermittelten richtungsabhängigen Kenngröße und/oder des Störrichtungsbereichs in einem Datenspeicher. In dem Datenspeicher, beispielsweise in der Maschinensteuerung, auf einem zentralen Computer oder in der Cloud werden Daten über den/die Störpositionsbereich(e) bzw. den/die Störpositionsrichtung(en) gesammelt. Insbesondere können in dem Datenspeicher die positionsabhängige(n) bzw. winkelabhängige(n) Kenngröße(n) bzw. die Störpositions- bzw. Winkelbereich(e) von mehreren Bearbeitungsmaschinen, die an unterschiedlichen Orten betrieben werden, zusammengeführt werden.

Bei einer Variante ist die Kenngröße ausgewählt aus der Gruppe umfassend: Schneidfrontwinkel einer Schneidfront einer Schnittfuge und Öffnungs-Winkel zwischen zwei Schnittflanken der Schnittfuge. Der Schneidfrontwinkel stellt eine Kenngröße für die Prozessqualität insbesondere beim Brennschneiden dar und kann beispielsweise auf die in der eingangs zitierten WO2012107331A1 oder auf die in der eingangs zitierten WO2015036140A1 beschriebene Weise ermittelt werden. Die Abnahme der Breite der Schnittfuge des Schnittspalts in Dickenrichtung des

Werkstücks, die z.B. durch den Öffnungs-Winkel zwischen den Schnittflanken der Schnittfuge bzw. durch eine für diesen indikative Messgröße ermittelt werden kann (vgl. die eingangs zitierte WO2018069291A1) stellt eine Kenngröße für die Prozessqualität bzw. die Prozessrobustheit beim Schmelzschneiden dar.

5

Bei einer weiteren Variante ist die Kenngröße ausgewählt aus der Gruppe umfassend: Positioniergenauigkeit und Richtungsgenauigkeit beim Bewegen des Bearbeitungswerkzeugs und des Werkstücks relativ zueinander. Auch die Positionier- bzw. die Richtungsgenauigkeit hat einen Einfluss auf die Prozessqualität und hängt aufgrund der Aufhängung des Bearbeitungswerkzeugs bzw. der Lagerung des Werkstücks von der Bearbeitungsposition bzw. von der Bearbeitungsrichtung ab. Die Richtungsgenauigkeit bei der Bearbeitung kann beispielsweise mit Hilfe des in der eingangs zitierten DE102005022095A1 beschriebenen Verfahrens ermittelt werden, welches die laterale Relativbewegung zwischen Bearbeitungswerkzeug und Werkstück beschreibt. Durch einen Vergleich mit der Soll-Bearbeitungsrichtung, die sich aus der Bahnplanung ergibt, kann die Richtungsgenauigkeit der Relativbewegung an einer jeweiligen Bearbeitungsposition ermittelt werden. Entsprechend kann auch die momentane Bearbeitungsposition über einen geeigneten Sensor bzw. eine geeignete Überwachungseinrichtung ermittelt und mit der sich aus der Bahnplanung ergebenden Soll-Bearbeitungsposition verglichen werden, um die Positionsgenauigkeit zu ermitteln.

10
15
20

Ein weiterer Aspekt der Erfindung betrifft eine Bearbeitungsmaschine der eingangs genannten Art, bei der die Auswerteeinrichtung konfiguriert bzw. programmiert ist, mindestens eine positionsabhängige Kenngröße für die Prozessqualität anhand einer Mehrzahl von Messwerten der mindestens einen Kenngröße an derselben Bearbeitungsposition und/oder mindestens eine richtungsabhängige Kenngröße für die Prozessqualität anhand einer Mehrzahl von Messwerten der mindestens einen Kenngröße entlang derselben Bearbeitungsrichtung, insbesondere entlang derselben Bearbeitungsrichtung an ein- und derselben Bearbeitungsposition, zu ermitteln. Wie weiter oben in Zusammenhang mit dem Verfahren beschrieben wurde, können an der Bearbeitungsmaschine anhand der positions- und/oder richtungsabhängigen Kenngröße positions- und/oder richtungsabhängige Störungen ermittelt werden. Bei der Bearbeitungsmaschine kann es sich insbesondere um eine so genannte 2D-

25
30

Laserschneidmaschine handeln, bei der das Werkstück typischerweise auf einer Werkstückauflage ruht und das Bearbeitungswerkzeug in Form eines Laserbearbeitungskopfs in lateraler Richtung über das Werkstück bewegt wird.

- 5 Bei einer Ausführungsform ist die Auswerteeinrichtung konfiguriert bzw. programmiert, zum Ermitteln der positionsabhängigen Kenngröße und/oder der richtungsabhängigen Kenngröße für die Prozessqualität eine statistische Analyse der Mehrzahl von Messwerten durchzuführen. Wie oben beschrieben wurde, kann eine statistische Analyse bzw. Auswertung der Messwerte dazu verwendet werden, um
- 10 Einflüsse auf die Prozessqualität zu eliminieren, die nicht von der Bearbeitungsposition und/oder von der Bearbeitungsrichtung abhängig sind.

- Bei einer weiteren Ausführungsform ist die Überwachungseinrichtung ausgebildet, die mindestens eine Kenngröße kontinuierlich zu überwachen und die
- 15 Auswerteeinrichtung ist ausgebildet, einen momentan ermittelten Messwert der Kenngröße einer jeweiligen Bearbeitungsposition und/oder einer jeweiligen Bearbeitungsrichtung zuzuordnen. Die Auswerteeinrichtung kann in dem Bearbeitungswerkzeug vorgesehen sein, aber auch einen Teil einer Steuerungseinrichtung der Bearbeitungsmaschine bilden.

- 20 Bei einer weiteren Ausführungsform ist die Auswerteeinrichtung konfiguriert bzw. programmiert, anhand der positionsabhängigen Kenngröße Bearbeitungspositionen zu ermitteln, die mindestens einen Störpositionsbereich bei der Bearbeitung bilden und/oder anhand der richtungsabhängigen Kenngröße Bearbeitungsrichtungen zu
- 25 ermitteln, die mindestens einen Störwinkelbereich bei der Bearbeitung bilden. Hinsichtlich dieser Ausführungsform sei auf die obigen Ausführungen im Zusammenhang mit dem Verfahren verwiesen.

- Bei einer weiteren Ausführungsform umfasst die Bearbeitungsmaschine eine
- 30 Steuerungseinrichtung zur Steuerung der Bewegung des Bearbeitungswerkzeugs und des Werkstücks relativ zueinander, die bevorzugt konfiguriert ist, Bearbeitungspositionen und/oder Bearbeitungsrichtungen bei der Bewegung des Bearbeitungswerkzeugs und des Werkstücks relativ zueinander in Abhängigkeit von der ermittelten positionsabhängigen Kenngröße, insbesondere von dem

Störpositionsbereich, und/oder anhand der richtungsabhängigen Kenngröße, insbesondere von dem Störwinkelbereich, festzulegen. Wie weiter oben beschrieben wurde, können die Störpositionsbereiche bzw. die Störwinkelbereiche bei der Arbeitsplanung bzw. beim Blechbelegungsplan berücksichtigt werden, um diese bei dem Bearbeitungsprozess möglichst zu vermeiden.

Bei einer Ausführungsform sind die Überwachungseinrichtung und die Auswerteeinrichtung konfiguriert, anhand des überwachten Bereichs als Kenngröße für die Prozessqualität einen Schneidfrontwinkel einer Schneidfront einer Schnittfuge, einen Öffnungs-Winkel zwischen zwei Schnittflanken der Schnittfuge, eine Positioniergenauigkeit und/oder eine Richtungsgenauigkeit beim Bewegen des Bearbeitungswerkzeugs und des Werkstücks relativ zueinander zu ermitteln. Bei der Kenngröße, welche die Positioniergenauigkeit und/oder Richtungsgenauigkeit bei der Relativbewegung beschreibt, kann es sich beispielsweise um eine Abweichung der Ist-Bewegung von der Soll-Bewegung handeln, die beispielsweise auf eine ungleichmäßige Bewegung (Rattern) der Antriebe zurückzuführen ist. Weitere Kenngrößen, die ermittelt werden können, sind die Schnittspaltbreite bzw. die Abweichung der Schnittspaltbreite von einer Soll-Schnittspaltbreite, die Strahllage einer Bearbeitungsdüse, die Abweichung des Abstands zwischen der (Bearbeitungs-)Düse und dem Werkstück von einem Sollwert, die Abweichung des Druck- bzw. Gas-Durchflusses durch die Düse von einem Sollwert, der elektrische Widerstand zwischen der Düse und dem Werkstück, sowie die mittels eines Sensors coaxial gemessene Strahlungsintensität in dezidierten bzw. vorgegebenen Wellenlängenbändern, z.B. mittels einer Fotodiode bei der Einstechsensorik. Die Ermittlung dieser Kenngrößen kann insbesondere auf die weiter oben in Zusammenhang mit dem Verfahren beschriebene Weise erfolgen.

Weitere Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der Beschreibung und der Zeichnung. Ebenso können die vorstehend genannten und die noch weiter aufgeführten Merkmale je 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:

Fig. 1 eine schematische Darstellung eines Ausführungsbeispiels einer
Bearbeitungsmaschine in Form einer Laserbearbeitungsmaschine zum
schneidenden Bearbeiten eines Werkstücks,

Fig. 2a,b eine Darstellung eines Laserbearbeitungskopfs der
Laserbearbeitungsmaschine von Fig. 1, der eine
Überwachungseinrichtung aufweist, sowie einer Blende der
Überwachungseinrichtung, und

Fig. 3 eine dreidimensionale Darstellung eines Details einer bei dem
Laserschneidprozess an einem Werkstück gebildeten Schnittfuge.

In der folgenden Beschreibung der Zeichnungen werden für gleiche bzw.
funktionsgleiche Bauteile identische Bezugszeichen verwendet.

Fig. 1 zeigt eine Laserbearbeitungsmaschine **1** mit einer Laserquelle **2**, einem
Laserbearbeitungskopf **4** und einer Werkstückauflage **5**. Ein von der Laserquelle **2**
erzeugter Laserstrahl **6** wird mittels einer Strahlführung **3** mit Hilfe von (nicht
gezeigten) Umlenkspiegeln zum Laserbearbeitungskopf **4** geführt und in diesem
fokussiert sowie mit Hilfe von ebenfalls nicht bildlich dargestellten Spiegeln senkrecht
zur Oberfläche **8a** eines Werkstücks **8** ausgerichtet, d.h. die Strahlachse (optische
Achse) des Laserstrahls **6** verläuft senkrecht zum Werkstück **8**. Im gezeigten Beispiel
handelt es sich bei der Laserquelle **2** um eine CO₂-Laserquelle. Alternativ kann der
Laserstrahl **6** beispielsweise durch einen Festkörperlaser erzeugt werden.

Zum Laserschneiden des Werkstücks **8** wird mit dem Laserstrahl **6** zunächst ein-
gestochen, d.h. das Werkstück **8** wird an einer Stelle punktförmig aufgeschmolzen
oder oxidiert und die hierbei entstehende Schmelze wird ausgeblasen. Nachfolgend
wird der Laserstrahl **6** über das Werkstück **8** bewegt, so dass eine durchgängige
Schnittfuge **9** entsteht, an der entlang der Laserstrahl **6** das Werkstück **8** durchtrennt.

Sowohl das Einstechen als auch das Laserschneiden können durch Hinzufügen eines Gases unterstützt werden. Als Schneidgase **10** können Sauerstoff, Stickstoff, Druckluft und/oder anwendungsspezifische Gase eingesetzt werden. Entstehende Partikel und Gase können mithilfe einer Absaugeinrichtung **11** aus einer
5 Absaugkammer **12** abgesaugt werden.

Die Laserbearbeitungsmaschine 1 umfasst auch eine Bewegungseinrichtung **13** zur Bewegung des Laserbearbeitungskopfs 4 und des Werkstücks 8 relativ zueinander. Im gezeigten Beispiel ruht das Werkstück 8 während der Bearbeitung auf der
10 Werkstückauflage 5 und der Laserbearbeitungskopf 4 wird bei der Bearbeitung entlang von zwei Achsen X, Y eines XYZ-Koordinatensystems bewegt. Zu diesem Zweck weist die Bewegungseinrichtung 13 ein mit Hilfe eines durch einen Doppelpfeil angedeuteten Antriebs in X-Richtung verschiebbares Portal **14** auf. Der Laserbearbeitungskopf 4 kann mit Hilfe eines weiteren durch einen Doppelpfeil
15 angedeuteten Antriebs der Bewegungseinrichtung 13 in X-Richtung verschoben werden, um an beliebige Bearbeitungspositionen $B_{x,y}$ in X-Richtung und in Y-Richtung in einem durch die Verschiebbarkeit des Laserbearbeitungskopfs 4 bzw. durch das Werkstück 8 vorgegebenen Arbeitsfeld bewegt zu werden. An einer jeweiligen Bearbeitungsposition $B_{x,y}$ weist der Laserstrahl 6 eine (instantane)
20 Bearbeitungsrichtung B_φ auf, die durch einen Bearbeitungswinkel φ beschrieben wird, der (willkürlich) von der negativen Y-Richtung ausgehend gemessen wird und bei dem in Fig. 1 gezeigten Beispiel bei $\varphi = 0^\circ$ liegt.

Wie in **Fig. 2a** zu erkennen ist, wird der Laserstrahl 6 für die Durchführung einer
25 schneidenden Bearbeitung an dem Werkstück 8 mittels einer Fokussiereinrichtung in Form einer Fokussierlinse **15** auf das Werkstück 8 fokussiert. Bei der Fokussierlinse 15 handelt es sich im gezeigten Beispiel um eine Linse aus Zinkselenid, die den Laserstrahl 6 durch eine Laserbearbeitungsdüse **16**, genauer gesagt durch deren Düsenöffnung **16a**, auf das Werkstück 8 fokussiert, und zwar im gezeigten Beispiel
30 auf eine Fokusposition **F** an der Oberseite 8a des Werkstücks 8. Der Laserstrahl 6 bildet dort einen Wechselwirkungsbereich **17** mit dem Werkstück 8, hinter dem entgegen der Bearbeitungsrichtung B_φ bzw. entgegen der Schnittrichtung des Laserschneidprozesses die in Fig. 1 gezeigte Schnittfuge 9 erzeugt wird. Im Falle

eines Laserstrahls 6 aus einem Festkörperlaser kann eine Fokussierlinse bspw. aus Quarzglas eingesetzt werden.

In Fig. 2 ebenfalls zu erkennen ist ein teildurchlässig ausgebildeter Umlenkspiegel
5 **18**, welcher den einfallenden Laserstrahl 2 (bspw. mit einer Wellenlänge von ca. 10,6 μm) reflektiert und für eine Prozessüberwachung relevante Beobachtungsstrahlung zu einem weiteren teildurchlässigen Umlenkspiegel **19** transmittiert. Der Umlenkspiegel 18 ist im gezeigten Beispiel für Beobachtungsstrahlung in Form von Wärmestrahlung bei Wellenlängen λ von ca. 700 nm bis 2000 nm teildurchlässig
10 ausgebildet. Der weitere teildurchlässige Umlenkspiegel 19 reflektiert die Beobachtungsstrahlung zu einer Überwachungseinrichtung **20**. Eine Beleuchtungsquelle **21** dient zur koaxialen Beleuchtung des Werkstücks 8 mit Beleuchtungsstrahlung **22**. Die Beleuchtungsstrahlung 22 wird von dem weiteren teiltransmissiven Umlenkspiegel 19 sowie von dem Umlenkspiegel 18 transmittiert
15 und durch die Düsenöffnung 16a der Laserbearbeitungsdüse 16 hindurch auf das Werkstück 8 gelenkt.

Alternativ zu den teildurchlässigen Umlenkspiegeln 18, 19 können auch
Scraperspiegel oder Lochspiegel, welche einfallende Strahlung nur aus einem
20 Randbereich reflektieren, eingesetzt werden, um die Beobachtungsstrahlung der Überwachungseinrichtung 20 zuzuführen bzw. um die Beleuchtungsstrahlung 22 dem Werkstück 8 zuzuführen. Auch mindestens ein seitlich in den Strahlengang des Laserstrahls 6 eingebrachter Spiegel kann verwendet werden, um die Beobachtung zu ermöglichen.

25

Als Beleuchtungsquelle 21 können Diodenlaser oder LEDs oder Blitzlampen vorgesehen werden, die wie in Fig. 2a gezeigt koaxial, aber auch off-axis zur Laserstrahlachse **24** angeordnet werden können. Die Beleuchtungsquelle 21 kann beispielsweise auch außerhalb (insbesondere neben) dem Laserbearbeitungskopf 4
30 angeordnet und auf das Werkstück 8 gerichtet sein; alternativ kann die Beleuchtungsquelle 21 innerhalb des Laserbearbeitungskopfs 4 angeordnet, jedoch nicht koaxial zum Laserstrahl 6 auf das Werkstück 8 ausgerichtet sein. Gegebenenfalls kann der Laserbearbeitungskopf 4 auch ohne eine Beleuchtungsquelle 21 betrieben werden.

Teil der Überwachungseinrichtung 20 ist eine im Beobachtungsstrahlengang **23** hinter dem weiteren teildurchlässigen Umlenkspiegel 19 angeordnete geometrisch hochauflösende Kamera **25**. Bei der Kamera 25 kann es sich um eine

5 Hochgeschwindigkeitskamera handeln, die koaxial zur Laserstrahlachse 24 bzw. zur Verlängerung der Laserstrahlachse 24 und somit richtungsunabhängig angeordnet ist. Beim dargestellten Beispiel erfolgt die Aufnahme von Bildern durch die Kamera 25 im Auflichtverfahren im NIR/IR-Wellenlängenbereich, um das Prozesseigenleuchten bzw. ein Wärmebild des Schneidprozesses aufzunehmen. Bei
10 dem in Fig. 2a gezeigten Beispiel kann ein Filter vor der Kamera 25 angeordnet werden, wenn weitere Strahlungs- bzw. Wellenlängenanteile von der Erfassung mit der Kamera 25 ausgeschlossen werden sollen. Der Filter kann z.B. als schmalbandiger Bandpassfilter mit einer Halbwertsbreite von beispielsweise ca. 15 nm ausgebildet sein, der Wellenlängen λ im Bereich um ca. 800 nm transmittiert.

15 Zur Erzeugung von Bildern eines in **Fig. 3** gezeigten zu überwachenden Bereichs **26** des Werkstücks 8, welcher der Schnittfuge 9 bzw. einen Abschnitt der Schnittfuge 9 mit der Schneidfront 9a enthält, auf einer Detektorfläche **25a** der Kamera 25 weist die Überwachungseinrichtung 20 eine Abbildungsoptik **27** auf. Im gezeigten Beispiel
20 weist die Abbildungsoptik 27 eine Blende **28** auf, die um eine zentrale Drehachse D drehbar gelagert ist, so dass sich bei der Drehung die Position einer exzentrisch angeordneten Blendenöffnung **28a** auf einem Kreisbogen um die Drehachse D bewegt (vgl. Fig. 2b).

25 Durch die Anordnung der Blende 28 in dem mittels einer Linse **29** fokussierten Strahlengang der Abbildungsoptik 27 tritt nur ein Teil des Beobachtungsstrahlengangs 23, welcher einen Randbereich der Fokussierlinse 15 durchläuft und im konvergenten Strahlengang nach der Fokussierlinse 15 unter einem Winkel β zur Strahlachse 24 des Laserstrahls 6 ausgerichtet ist, durch die
30 exzentrisch zur Verlängerung der Strahlachse 24 des Laserstrahls 6 angeordnete Blendenöffnung 28a hindurch und bildet einen Beobachtungsstrahl **23a**, welcher auf der Detektorfläche 25a abgebildet wird. Bei dem in Fig. 2a gezeigten Beispiel verläuft eine Beobachtungsrichtung R1 des Beobachtungsstrahls 23a in der Projektion in die XY-Ebene bzw. in die Werkstückebene parallel zur Bearbeitungsrichtung B_ϕ (hier: ϕ

= 0), entlang derer der Laserstrahl 6 und das Werkstück 8 in der XY-Ebene relativ zueinander bewegt werden, um die gewünschte Schnittkontur zu bilden, d.h. es erfolgt eine stechende Beobachtung. Der Winkel β , unter dem die Beobachtungsrichtung R1 zur Strahlachse 24 des Laserstrahls 6 ausgerichtet ist, liegt im gezeigten Beispiel zwischen ca. 1° und ca. 5°, beispielsweise bei ca. 4°.

Wie in Fig. 2a zu erkennen ist, ist an der Blende 28 ein Polarisationsfilter **30** angebracht, der sich gemeinsam mit dem Blende 28 um die Drehachse D dreht. Der Polarisationsfilter 30 ist zur Filterung einer linearen Polarisationskomponente p ausgebildet, die im gezeigten Beispiel parallel zu einer Ebene (XZ-Ebene) ausgerichtet ist, welche die (momentane) Bearbeitungsrichtung B_φ sowie die Z-Richtung bzw. die Strahlachse 24 des Laserstrahls 6 enthält. Wie in Fig. 2a zu erkennen ist, weist der Beobachtungsstrahl 23a nach dem Polarisationsfilter 30 nur noch eine senkrecht zur XZ-Ebene ausgerichtete Polarisationskomponente s auf. Die Filterung einer linearen Polarisationskomponente des Beobachtungsstrahls 23a hat sich für die Beobachtung der Schnittfuge 9 bzw. des zu überwachenden Bereichs 26 als günstig erwiesen. Es versteht sich, dass an Stelle der parallel zur XZ-Ebene ausgerichteten Polarisationskomponente p gegebenenfalls auch die senkrecht zur XZ-Ebene ausgerichtete Polarisationskomponente s oder eine anders ausgerichtete Polarisationskomponente mit Hilfe des Polarisationsfilters 30 gefiltert werden kann. Die Verwendung der s-polarisierten Polarisationskomponente hat sich für die Beobachtung der Schnittfuge 9 als besonders günstig erwiesen, da die in Fig. 3 gezeigten gestrichelt dargestellten Linien, die im Wesentlichen zwei Leuchtstreifen **31a,b** entsprechen, einen optimalen Winkel aufweisen, um viel s-polarisierte Strahlung zu emittieren.

An Stelle einer mechanisch verstellbaren Blende 28 kann auch eine elektrisch verstellbare Blende, beispielsweise in Form eines LCD-Arrays, verwendet werden, bei der einzelne Pixel oder Pixelgruppen elektronisch an- bzw. ausgeschaltet werden, um die Blendenwirkung zu erzeugen. Auch kann die mechanische Blende 28 anders als in Fig. 2a,b gezeigt quer zum Beobachtungsstrahlengang 23, beispielsweise in der YZ-Ebene, bewegt bzw. verschoben werden, um unterschiedliche Teile des Beobachtungsstrahlengangs 23 abzuschatten bzw. für die Beobachtung zu öffnen. Die Blende 28 kann auch in Form eines oder mehrerer auf-

und zuklappbarer mechanischer Elemente realisiert werden. Entsprechend kann auch der Polarisationsfilter 30 als LCD-Polarisator ausgebildet sein, um die Ausrichtung der gefilterten Polarisationskomponente geeignet zu wählen, insbesondere um die Ausrichtung der gefilterten Polarisationskomponente zu drehen.

- 5 Gegebenenfalls kann die Blende 28 und/oder der Polarisationsfilter 30 vollständig aus dem Beobachtungsstrahlengang 23 entfernt werden, sofern dies für die Überwachung des Laserschneidprozesses vorteilhaft ist.

- 10 Mit Hilfe einer mit der Überwachungseinrichtung 20 in signaltechnischer Verbindung stehenden Auswerteeinrichtung **32** können unterschiedliche Kenngrößen für die Prozessqualität des Laserschneidprozesses ermittelt werden. Beispielsweise kann anhand des Verlaufs der in Fig. 3 gezeigten Leuchtstreifen 32a,b auf den Verlauf der Spaltbreite **b(z)** der Schnittfuge 9 in Dickenrichtung Z des Werkstücks 8 (mit Dicke **d**), genauer gesagt auf einen Winkel γ zwischen den beiden seitlichen Schnittflanken
- 15 **33a,b** der Schnittfuge 9 geschlossen werden. Als Messgrößen für den Winkel γ kann/können der Abstand und/oder der Winkel zwischen den beiden Leuchtstreifen 31a,b mit Hilfe der Auswerteeinrichtung 32 bestimmt werden, beispielsweise wie dies in der eingangs zitierten WO2018069291A1 beschrieben ist, welche durch Bezugnahme in ihrer Gesamtheit zum Inhalt dieser Anmeldung gemacht wird. Der
- 20 Öffnungs-Winkel γ zwischen den beiden Schnittflanken 33a,b der Schnittfuge 9 stellt eine Kenngröße für die Prozessqualität bzw. für die Prozessrobustheit typischerweise beim Schmelzschneiden dar, d.h. je größer der Öffnungs-Winkel γ ist, desto stärker ist die V-Form der Schnittfuge 9 ausgeprägt und desto schlechter ist typischerweise die Schneidqualität.

25

- Wie in Fig. 3 ebenfalls zu erkennen ist, bildet sich bei der schneidenden Bearbeitung an dem Werkstück 8 an der Vorderkante der Schnittfuge 9 die im Wesentlichen zylindrische Schneidfront 9a aus, die sich entlang der Dicke d des Werkstücks 8 unter einem Schneidfrontwinkel α bezüglich der Oberseite 8a und der Unterseite **8b**
- 30 des Werkstücks 8 erstreckt. Mit Hilfe der Überwachungseinrichtung 20 kann anhand des überwachten Bereichs 26, genauer gesagt anhand des Wechselwirkungsbereichs 17, mit Hilfe der Auswerteeinrichtung 32 der Schneidfrontwinkel α ermittelt werden. Dies kann beispielsweise auf eine Weise erfolgen, wie sie in der eingangs zitierten WO2015036140A1 beschrieben ist, welche

durch Bezugnahme in ihrer Gesamtheit zum Inhalt dieser Anmeldung gemacht wird. In diesem Fall ist es für die Ermittlung des Schneidfrontwinkels α günstig, wenn die Beobachtung des Wechselwirkungsbereichs 17 mit einer schleppenden oder stechenden Beobachtungsrichtung erfolgt, wobei auf die Verwendung des

5 Polarisationsfilters 30 verzichtet werden kann. Alternativ kann der Schneidfrontwinkel α auch anhand von Geometriemerkmalen der Schnittfuge 9 ermittelt werden, beispielsweise wie dies in der eingangs zitierten WO2012107331A1 beschrieben ist, welche ebenfalls durch Bezugnahme in ihrer Gesamtheit zum Inhalt dieser Anmeldung gemacht wird.

10

Mit Hilfe der Überwachungseinrichtung 20 bzw. der Auswerteeinrichtung 32 können auch andere Kenngrößen für die Prozessqualität, beispielsweise die Positioniergenauigkeit $P_{x,y}$ bei der Positionierung des Laserbearbeitungskopfs 4 an der Bearbeitungsposition $B_{x,y}$, d.h. die Abweichung zwischen Ist- und Soll-

15

Bearbeitungsposition sowie die Richtungsgenauigkeit R_ϕ , d.h. die Abweichung der der momentanen Bearbeitungsrichtung B_ϕ an der Bearbeitungsposition $B_{x,y}$ von einer Soll-Bearbeitungsrichtung ermittelt werden. Die Richtungsungenauigkeit R_ϕ kann von der Überwachungseinrichtung 20 in Kombination mit der

20

DE102005022095A1 beschriebene Verfahren zur Bestimmung der lateralen Relativbewegung zwischen dem Laserbearbeitungskopf 4 und dem Werkstück 8 durchgeführt wird und die auf diese Weise ermittelte laterale Relativbewegung bzw. momentane Bearbeitungsrichtung B_ϕ mit einem Wert für die Soll-

25

Bearbeitungsrichtung verglichen wird, der in der Auswerteeinrichtung 32 oder an einem anderen Ort hinterlegt ist. Die Positionsgenauigkeit $P_{x,y}$ sowie die Richtungsgenauigkeit R_ϕ stellen Kenngrößen für die Prozessqualität dar, da es bei Abweichungen vom jeweiligen Sollwert zu Abweichungen der Geometrie der Schnittfuge 9 von einer Soll-Geometrie kommt.

30

Es versteht sich, dass mit Hilfe der Überwachungseinrichtung 20 bzw. der Auswerteeinrichtung 32 auch andere Kenngrößen für die Prozessqualität ermittelt werden können, die beispielsweise das Auftreten einer Gratbildung an der Schnittfuge 9 etc. betreffen, wie dies ebenfalls in der WO2012107331A1 beschrieben ist. Die Art der Kenngröße(n) für die Prozessqualität, die in der Auswerteeinrichtung

32 ermittelt werden, können von der Art des Laserschneidprozesses abhängen, beispielsweise kann der Schneidfrontwinkel α bei einem Brennschneidprozess als Kenngröße dienen, während der Öffnungs-Winkel γ der Schnittfuge typischerweise bei einem Schmelzschneidprozess als Kenngröße für die Prozessqualität dient.

5

Eine in Fig. 1 gezeigte Steuerungseinrichtung **34**, die Steuerungsaufgaben der Laserschneidmaschine 1 übernimmt, steht mit der Auswerteeinrichtung 32 in signaltechnischer Verbindung. Die Steuerungseinrichtung 34 weist eine Regeleinrichtung **35** auf, um bei dem Bearbeitungsprozess eine optimale Prozessqualität zu erzeugen. Die Regeleinrichtung 35 kann beispielsweise ausgebildet sein, den Schneidfrontwinkel α auf einen vorgegebenen, konstanten Wert zu regeln, indem mindestens ein Stellparameter, beispielsweise die Vorschubgeschwindigkeit und/oder die Leistung des Laserstrahls 6 geeignet beeinflusst wird.

10

15

Nachfolgend wird beispielhaft für den Schneidfrontwinkel α als Kenngröße für die Prozessqualität beschrieben, wie positions- und/oder richtungsabhängige Störungen bei der Bearbeitung des Werkstücks 8 mittels der Bearbeitungsmaschine 1 ermittelt werden. Wie weiter oben beschrieben wurde, wird der Schneidfrontwinkel α während des Schneidprozesses kontinuierlich von der Überwachungseinrichtung 20 erfasst. Ein jeweiliger instantan ermittelter Messwert des Schneidfrontwinkels α wird der momentanen Bearbeitungsposition $B_{X,Y}$ zugeordnet, die im gezeigten Beispiel einer XY-Koordinate im Arbeitsfeld der Bearbeitungsmaschine 1 entspricht. Die Zuordnung kann beispielsweise in einer Datenbank oder dergleichen gespeichert werden, die in der Auswerteeinrichtung 32, der Steuerungseinrichtung 34 oder in einem Datenspeicher **36** hinterlegt ist, der ggf. auf einem externen, zentralen Computer oder in der Cloud bereitgestellt wird. Die Zuordnung des Schneidfrontwinkels α zu den jeweiligen Bearbeitungspositionen $B_{X,Y}$ im Arbeitsfeld wird für eine Mehrzahl von schneidenden Bearbeitungsprozessen und somit für eine Mehrzahl von Messwerten $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$ vorgenommen, wobei N die Anzahl der Messwerte beschreibt, die typischerweise bei mehr als $N = 10$ liegt. Aus den Messwerten $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$, die an einer jeweiligen Bearbeitungsposition $B_{X,Y}$, d.h. an einer jeweiligen XY-Koordinate, in dem Arbeitsfeld ermittelt wurden, wird ein von der XY-Koordinate bzw. der XY-Position im Arbeitsfeld abhängiger Schneidfrontwinkel $\alpha(X,Y)$ ermittelt. Der

20

25

30

positionsabhängige Schneidfrontwinkel $\alpha(X,Y)$ ist somit eine Funktion in Abhängigkeit von der XY-Koordinate.

- Um den Einfluss des jeweiligen Bearbeitungsprozesses bzw. der jeweiligen
- 5 Bearbeitungsparameter auf den positionsabhängigen Schneidfrontwinkel $\alpha(X,Y)$ zu eliminieren, wird eine statistische Analyse der Mehrzahl N von Messwerten $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$ durchgeführt, die zu unterschiedlichen Zeiten bzw. bei unterschiedlichen Bearbeitungsprozessen an der jeweiligen Bearbeitungsposition $B_{X,Y}$ ermittelt wurden. Im einfachsten Fall kann zur Ermittlung des positionsabhängigen
- 10 Schneidfrontwinkels $\alpha(X,Y)$ der Mittelwert aus den Messwerten $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$ an der jeweiligen Bearbeitungsposition $B_{X,Y}$ berechnet werden. Es versteht sich, dass an Stelle des Mittelwerts auch ein anderes geeignetes statistisches Maß für die Ermittlung des positionsabhängigen Schneidfrontwinkels $\alpha(X,Y)$ verwendet werden kann, welches den Einfluss von Störungen, die nicht von der jeweiligen
- 15 Bearbeitungsposition $B_{X,Y}$ abhängig sind, möglichst vollständig eliminiert.

- Anhand des positionsabhängigen Schneidfrontwinkels $\alpha(X,Y)$ in dem Arbeitsfeld können Bearbeitungspositionen $B_{X,Y}$ bestimmt werden, bei denen der
- positionsabhängige Schneidfrontwinkel $\alpha(X,Y)$ so klein ist, dass die Prozessqualität
- 20 gering ist oder der Prozess ggf. nicht mehr stabil verläuft. Um diese Bearbeitungspositionen $B_{X,Y}$ zu ermitteln, kann der positionsabhängige Schneidfrontwinkel $\alpha(X,Y)$ mit einem (in der Regel konstanten, d.h. nicht von der Position abhängigen) Schwellwert verglichen werden. Die Bearbeitungspositionen $B_{X,Y}$, an denen der Schwellwert unterschritten wird, bilden Teilbereiche in Form von
- 25 Störpositionsbereichen **37** innerhalb des Arbeitsfeldes, von denen beispielhaft zwei in Fig. 1 dargestellt sind. Die Teilbereiche des Arbeitsfeldes, die außerhalb der Störpositionsbereiche 37 liegen, bilden Vorzugspositionsbereiche für den Schneidprozess an dem Werkstück 8.
- 30 Bei der Bahnplanung in der Steuerungseinrichtung 34 werden die beim Schneiden zu erzeugenden Schnittkonturen der aus dem Werkstück 8 zu schneidenden Werkstückteile so gewählt, dass diese idealerweise vollständig außerhalb der Störpositionsbereiche 37 liegen bzw. dass ein möglichst geringer Teil des Bearbeitungsprozesses innerhalb der Störpositionsbereiche 37 erfolgt. Die auf die

weiter oben beschriebene Weise ermittelten Störpositionsbereiche 37 der Bearbeitungsmaschine 1 können in dem Datenspeicher 36 abgespeichert werden.

Die Ermittlung der Störpositionsbereiche 37 auf die weiter oben beschriebene Weise kann ggf. in vorgegebenen Zeitintervallen wiederholt werden. Wird für die Ermittlung des positionsabhängigen Schneidfrontwinkels α eine ausreichend große Anzahl von Messwerten $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$ herangezogen, verändern sich die Störpositionsbereiche 37 in der Regel nicht bzw. nur unwesentlich, d.h. diese sind zeitlich im Wesentlichen konstant. Die Information über die Störpositionsbereiche 37 einer Mehrzahl von Bearbeitungsmaschinen 1 gleicher Bauart kann in einem gemeinsamen Datenspeicher 36 gespeichert werden. Anhand der dort gespeicherten Daten über die Störpositionsbereiche 37 und/oder über den positionsabhängigen Schneidfrontwinkel $\alpha(x, y)$ können Schwachstellen der Maschinenkonstruktion erkannt werden.

Analog zur weiter oben beschriebenen Ermittlung des positionsabhängigen Schneidfrontwinkels $\alpha(X, Y)$ kann der Schneidfrontwinkel α auch in Abhängigkeit von der Bearbeitungsrichtung B_φ ermittelt werden. Im einfachsten Fall wird hierbei ein momentan ermittelter Messwert für den Schneidfrontwinkel α einer jeweiligen momentanen Bearbeitungsrichtung B_φ – ohne Berücksichtigung der jeweiligen Bearbeitungsposition $B_{X,Y}$ – zugeordnet, d.h. es wird der richtungsabhängige Schneidfrontwinkel α_φ der Bearbeitungsmaschine 1 unabhängig von der Bearbeitungsposition $B_{X,Y}$ ermittelt, indem eine Mehrzahl von Messwerten für den richtungsabhängigen Schneidfrontwinkel α_φ auf die weiter oben beschriebene Weise statistisch ausgewertet wird. Bevorzugt wird der richtungsabhängige Schneidfrontwinkel α_φ aber zusätzlich in Abhängigkeit von der Bearbeitungsposition $B_{X,Y}$ ermittelt, d.h. der richtungsabhängige Schneidfrontwinkel α_φ wird anhand einer Mehrzahl von Messwerten $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$ in einer jeweiligen Bearbeitungsrichtung B_φ an ein- und derselben Bearbeitungsposition $B_{X,Y}$ ermittelt. Der richtungsabhängige Schneidfrontwinkel $\alpha_\varphi(X, Y)$ ist somit zusätzlich von der XY-Position im Arbeitsfeld abhängig.

Analog zur weiter oben beschriebenen Ermittlung der Störpositionsbereiche 37 können auch Störwinkelbereiche 38 ermittelt werden, die ggf. von der jeweiligen

Bearbeitungsposition $B_{X,Y}$ abhängig sind (s.o.). Beispielsweise kann zu diesem Zweck der jeweilige Wert für den richtungsabhängigen Schneidfrontwinkel α_φ mit einem Schwellwert verglichen werden. In Fig. 1 ist beispielhaft ein Störwinkelbereich 38 an einer Bearbeitungsposition $B_{X,Y}$ dargestellt, der sich über ein Winkelintervall φ zwischen ca. 35° und ca. 45° erstreckt. Wie weiter oben im Zusammenhang mit der Störpositionsbereichen 37 beschrieben ist, können auch die Bearbeitungsrichtungen B_φ bei der Bearbeitung des Werkstücks 8 so gewählt werden, dass die Störwinkelbereiche 38 bei der Bearbeitung möglichst vermieden werden. Der richtungsabhängige, typischerweise zusätzlich positionsabhängige Schneidfrontwinkel $\alpha_\varphi(X,Y)$ bzw. der/die Störwinkelbereiche 38 können ebenfalls in dem Datenspeicher 36 gespeichert werden, um eine Fehlerdiagnose durchführen zu können bzw. um die Arbeitsplanung zu optimieren.

Wie weiter oben beschrieben wurde, kann der Schneidfrontwinkel α auf einen vorgegebenen, konstanten Wert geregelt werden, indem mindestens ein Stellparameter, beispielsweise die Vorschubgeschwindigkeit und/oder die Leistung des Laserstrahls 6, geeignet beeinflusst wird. Bei einer (idealen) Regelung ist die Regelgröße zwar konstant, d.h. nicht von der Position und/oder von der Richtung abhängig, die für die Regelung verwendete(n) Messgröße(n) können aber aufgrund von Störungen positions- und/oder richtungsabhängig variieren, was bei der Regelung berücksichtigt werden sollte, um die Regelgröße, im hier beschriebenen Beispiel den Schneidfrontwinkel α , konstant zu halten.

Beim Laserschneiden über einen Steg der Werkstückauflage 5 kann sich z.B. ein hohes Mess-Signal einer optischen Laserschneid-Sensorik ergeben, welche die Prozessstrahlung als Messgröße erfasst. An einer solchen Bearbeitungsposition $B_{X,Y}$ darf daher entweder gar nicht geregelt werden oder es muss ein hoher Wert der Messgröße erwartet werden, um die Regelgröße, z.B. den Schneidfrontwinkel α , konstant zu halten. In diesem Fall handelt es sich bei dem Mess-Signal der Prozessstrahlung um eine positionsabhängige Kenngröße, die mit Hilfe des oben beschriebenen Verfahrens ermittelt wird und deren von der Bearbeitungsposition $B_{X,Y}$ abhängige Variation bei der Regelung der Regelgröße auf ihren Soll-Wert berücksichtigt wird. Es versteht sich, dass ein solches Vorgehen auch für andere Kenngrößen möglich ist.

Beim Laserschneiden mit einem Laserstrahl 6 mit ovalem Strahlquerschnitt, der beispielsweise durch eine unrunde Innenkontur 16a der Düse 16 hervorgerufen wird, kann für das Regeln des Schnittpalts 9 auf eine konstante Breite b (Regelgröße) bspw. die Fokusposition F des Laserstrahls 6 in Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls 6 (in Z-Richtung) als Stellgröße verstellt werden. Schneidet man mit der langen Seite des Laserstrahls 6 quer zum Schnittpalt 9, sollte die Fokusposition F so gewählt werden, dass der Strahlquerschnitt des Laserstrahls 6 auf dem Werkstück 9 klein ist, während beim Schneiden mit der schmalen Laserstrahlseite quer zum Schnittpalt 9 der Strahlquerschnitt im Fokus groß eingestellt werden sollte, so dass insgesamt die Breite b des Schnittpalts 9 konstant gehalten werden kann. In diesem Fall ist somit eine richtungsabhängige Einstellung der Fokusslage bzw. der Fokusposition in Z-Richtung erforderlich.

Mit zunehmender Betriebsdauer der Laserbearbeitungsmaschine 1 kann es zu einer Verschmutzung z.B. der Fokussierlinse 15 kommen. Die Verschmutzung kann zu einer so genannten thermischen Linse führen, die eine Veränderung der Fokusposition F (Abweichung von einer nominellen Fokusposition) zur Folge hat. Wird die Fokusposition F (in Ausbreitungsrichtung) des Laserstrahls 6 als Kenngröße bei mehreren zeitlich aufeinander folgenden Bearbeitungsprozessen an der Laserbearbeitungsmaschine 1 ermittelt, kann es daher sinnvoll sein, eine zeitliche Änderung der Messwerte bei der Ermittlung der richtungs- und/oder positionsabhängigen Fokusposition F zu berücksichtigen. Beispielsweise können bei der Ermittlung der Fokusposition F nur diejenigen Messwerte berücksichtigt werden, die bei noch nicht lange zurückliegenden Bearbeitungsprozessen ermittelt wurden und daher dem aktuellen Verschmutzungsgrad der Fokussierlinse 15 entsprechen.

Es versteht sich, dass das weiter oben beschriebene Verfahren auf analoge Weise auch mit anderen Kenngrößen für die Prozessqualität als dem Schneidfrontwinkel α , der Fokusposition F , etc. durchgeführt werden kann.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Ermitteln mindestens einer Kenngröße (α , γ , $P_{X,Y}$, R_ϕ) für die Prozessqualität bei einem Bearbeitungsprozess, insbesondere bei einem Laserschneidprozess, umfassend:
Insbesondere schneidendes Bearbeiten eines Werkstücks (8) unter Bewegen eines Bearbeitungswerkzeugs, insbesondere eines Laserbearbeitungskopfs (4), und des Werkstücks (8) relativ zueinander,
Überwachen eines Bereichs (26) an dem Werkstück (8), der bevorzugt einen Wechselwirkungsbereich (17) des Bearbeitungswerkzeugs, insbesondere des Laserbearbeitungskopfs (4), mit dem Werkstück (8) umfasst, sowie
Ermitteln mindestens einer Kenngröße (α , γ , $P_{X,Y}$, R_ϕ) für die Prozessqualität anhand des überwachten Bereichs (26),
gekennzeichnet durch
Ermitteln mindestens einer positionsabhängigen Kenngröße ($\alpha(x, y)$) für die Prozessqualität anhand einer Mehrzahl von Messwerten ($\alpha_1, \dots \alpha_N$) der mindestens einen Kenngröße (α) an derselben Bearbeitungsposition ($B_{X,Y}$) und/oder mindestens einer richtungsabhängigen Kenngröße (α_ϕ , $\alpha_\phi(x, y)$) für die Prozessqualität anhand einer Mehrzahl von Messwerten ($\alpha_1, \dots \alpha_N$) der mindestens einen Kenngröße (α) in derselben Bearbeitungsrichtung (B_ϕ), insbesondere in derselben Bearbeitungsrichtung (B_ϕ) an ein- und derselben Bearbeitungsposition ($B_{X,Y}$).
2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem zum Ermitteln der positionsabhängigen Kenngröße ($\alpha(x, y)$) und/oder der richtungsabhängigen Kenngröße (α_ϕ , $\alpha_\phi(x, y)$) für die Prozessqualität eine statistische Analyse der Mehrzahl von Messwerten ($\alpha_1, \dots \alpha_N$) durchgeführt wird.
3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Kenngröße (α) während eines Bearbeitungsprozesses kontinuierlich erfasst wird und ein momentan ermittelter Messwert der Kenngröße (α) einer jeweiligen

Bearbeitungsposition ($B_{x,y}$) und/oder einer jeweiligen Bearbeitungsrichtung (B_φ) zugeordnet wird.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem anhand der positionsabhängigen Kenngröße ($\alpha(x, y)$) Bearbeitungspositionen ($B_{x,y}$) ermittelt werden, die mindestens einen Störpositionsbereich (37) bei der Bearbeitung bilden und/oder bei dem anhand der richtungsabhängigen Kenngröße ($\alpha_\varphi, \alpha_\varphi(x, y)$) Bearbeitungsrichtungen (B_φ) bestimmt werden, die mindestens einen Störwinkelbereich (38) bei der Bearbeitung bilden.
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem Bearbeitungspositionen ($B_{x,y}$) und/oder Bearbeitungsrichtungen (B_φ) bei der Bewegung des Bearbeitungswerkzeugs und des Werkstücks (8) relativ zueinander in Abhängigkeit von der ermittelten positionsabhängigen Kenngröße ($\alpha(x, y)$), insbesondere von dem Störpositionsbereich (37), und/oder anhand der richtungsabhängigen Kenngröße ($\alpha_\varphi, \alpha_\varphi(x, y)$), insbesondere von dem Störwinkelbereich (38), festgelegt werden.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Mehrzahl der Messwerte ($\alpha_1, \dots \alpha_N$) der mindestens einen Kenngröße (α) bei mehreren Bearbeitungsprozessen an derselben Bearbeitungsmaschine (1) ermittelt wird und/oder die positionsabhängige Kenngröße ($\alpha(x, y)$) und/oder die richtungsabhängige Kenngröße ($\alpha_\varphi, \alpha_\varphi(x, y)$) wird/werden auf mehreren baugleichen Bearbeitungsmaschinen (1) ermittelt.
7. Verfahren nach Anspruch 6, bei dem die Mehrzahl der Messwerte ($\alpha_1, \dots \alpha_N$) der mindestens einen Kenngröße (α) bei mehreren Bearbeitungsprozessen an derselben Bearbeitungsmaschine (1) ermittelt wird und bei dem beim Ermitteln der positionsabhängigen Kenngröße ($\alpha(x, y)$) und/oder der richtungsabhängigen Kenngröße ($\alpha_\varphi, \alpha_\varphi(x, y)$) eine zeitliche Änderung der Messwerte ($\alpha_1, \dots \alpha_N$) berücksichtigt wird.
8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, weiter umfassend:
Speichern der ermittelten positionsabhängigen Kenngröße ($\alpha(x, y)$) und/oder des

Störpositionsbereichs (37) und/oder der ermittelten richtungsabhängigen Kenngröße (α_ϕ , $\alpha_\phi(x,y)$) und/oder des Störwinkelbereichs (38) in einem Datenspeicher (36).

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Kenngröße ausgewählt ist aus der Gruppe umfassend: Schneidfrontwinkel (α) einer Schneidfront (9a) einer Schnittfuge (9) und Öffnungs-Winkel (γ) zwischen zwei Schnittflanken (33a,b) der Schnittfuge (9).
10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Kenngröße ausgewählt ist aus der Gruppe umfassend: Positioniergenauigkeit ($P_{x,y}$) und Richtungsgenauigkeit (R_ϕ) beim Bewegen des Bearbeitungswerkzeugs und des Werkstücks (8) relativ zueinander.
11. Bearbeitungsmaschine, insbesondere Laserbearbeitungsmaschine (1), umfassend:
 - ein Bearbeitungswerkzeug, insbesondere ein Laserbearbeitungskopf (4), zur insbesondere schneidenden Bearbeitung eines Werkstücks (8),
 - eine Bewegungseinrichtung (13) zur Bewegung des Bearbeitungswerkzeugs und des Werkstücks (8) relativ zueinander, sowie
 - eine Überwachungseinrichtung (20) zur Überwachung eines Bereichs (26) an dem Werkstück (8), der bevorzugt einen Wechselwirkungsbereich (17) des Bearbeitungswerkzeugs, insbesondere des Laserbearbeitungskopfs (4), mit dem Werkstück (8) umfasst, sowie
 - eine Auswerteeinrichtung (32), die konfiguriert ist, anhand des überwachten Bereichs (26) mindestens eine Kenngröße (α , γ , $P_{x,y}$, R_ϕ) für die Prozessqualität zu ermitteln,
 - dadurch gekennzeichnet,
 - dass die Auswerteeinrichtung (32) konfiguriert ist, mindestens eine positionsabhängige Kenngröße ($\alpha(x, y)$) für die Prozessqualität anhand einer Mehrzahl von Messwerten ($\alpha_1, \dots \alpha_N$) der mindestens einen Kenngröße (α) an derselben Bearbeitungsposition ($B_{x,y}$) und/oder mindestens eine richtungsabhängige Kenngröße (α_ϕ , $\alpha_\phi(x, y)$) für die Prozessqualität anhand einer Mehrzahl von Messwerten ($\alpha_1, \dots \alpha_N$) der mindestens einen Kenngröße (α)

entlang derselben Bearbeitungsrichtung (B_φ), insbesondere entlang derselben Bearbeitungsrichtung (B_φ) an ein- und derselben Bearbeitungsposition ($B_{x,y}$), zu ermitteln.

12. Bearbeitungsmaschine nach Anspruch 11, bei der die Auswerteeinrichtung (32) konfiguriert ist, zum Ermitteln der positionsabhängigen Kenngröße ($\alpha(x, y)$) und/oder der richtungsabhängigen Kenngröße ($\alpha_\varphi, \alpha_\varphi(x, y)$) für die Prozessqualität eine statistische Analyse der Mehrzahl von Messwerten ($\alpha_1, \dots, \alpha_N$) durchzuführen.
13. Bearbeitungsmaschine nach Anspruch 11 oder 12, bei dem die Überwachungseinrichtung (20) ausgebildet ist, die mindestens eine Kenngröße (α) kontinuierlich zu überwachen und bei dem die Auswerteeinrichtung (32) ausgebildet ist, einen momentan ermittelten Messwert der Kenngröße (α) einer jeweiligen Bearbeitungsposition ($B_{x,y}$) und/oder einer jeweiligen Bearbeitungsrichtung (B_φ) zuzuordnen.
14. Bearbeitungsmaschine nach einem der Ansprüche 11 bis 13, bei dem die Auswerteeinrichtung (32) konfiguriert ist, anhand der positionsabhängigen Kenngröße ($\alpha(x, y)$) Bearbeitungspositionen ($B_{x,y}$) zu ermitteln, die mindestens einen Störpositionsbereich (37) bei der Bearbeitung bilden und/oder anhand der richtungsabhängigen Kenngröße ($\alpha_\varphi, \alpha_\varphi(x, y)$) Bearbeitungsrichtungen (B_φ) zu ermitteln, die mindestens einen Störwinkelbereich (38) bei der Bearbeitung bilden.
15. Bearbeitungsmaschine nach einem der Ansprüche 11 bis 14, weiter umfassend: eine Steuerungseinrichtung (35) zur Steuerung der Bewegung des Bearbeitungswerkzeugs und des Werkstücks (8) relativ zueinander, die bevorzugt konfiguriert ist, Bearbeitungspositionen ($B(x,y)$) und/oder Bearbeitungsrichtungen ($B(\varphi)$) bei der Bewegung des Bearbeitungswerkzeugs und des Werkstücks (8) relativ zueinander in Abhängigkeit von der ermittelten positionsabhängigen Kenngröße ($\alpha(x, y)$), insbesondere von dem Störpositionsbereich (37), und/oder anhand der richtungsabhängigen Kenngröße ($\alpha_\varphi, \alpha_\varphi(x, y)$), insbesondere von dem Störwinkelbereich (38), festzulegen.

16. Bearbeitungsmaschine nach einem der Ansprüche 11 bis 15, bei dem die Überwachungseinrichtung (20) und die Auswerteeinrichtung (32) konfiguriert sind, anhand des überwachten Bereichs (26) als Kenngröße für die Prozessqualität einen Schneidfrontwinkel (α) einer Schneidfront (9a) einer Schnittfuge (9), einen Öffnungs-Winkel (γ) zwischen zwei Schnittflanken (33a,b) der Schnittfuge (9), eine Positioniergenauigkeit ($P_{x,y}$) und/oder eine Richtungsgenauigkeit (R_ϕ) beim Bewegen des Bearbeitungswerkzeugs und des Werkstücks (8) relativ zueinander zu ermitteln.

1 / 2

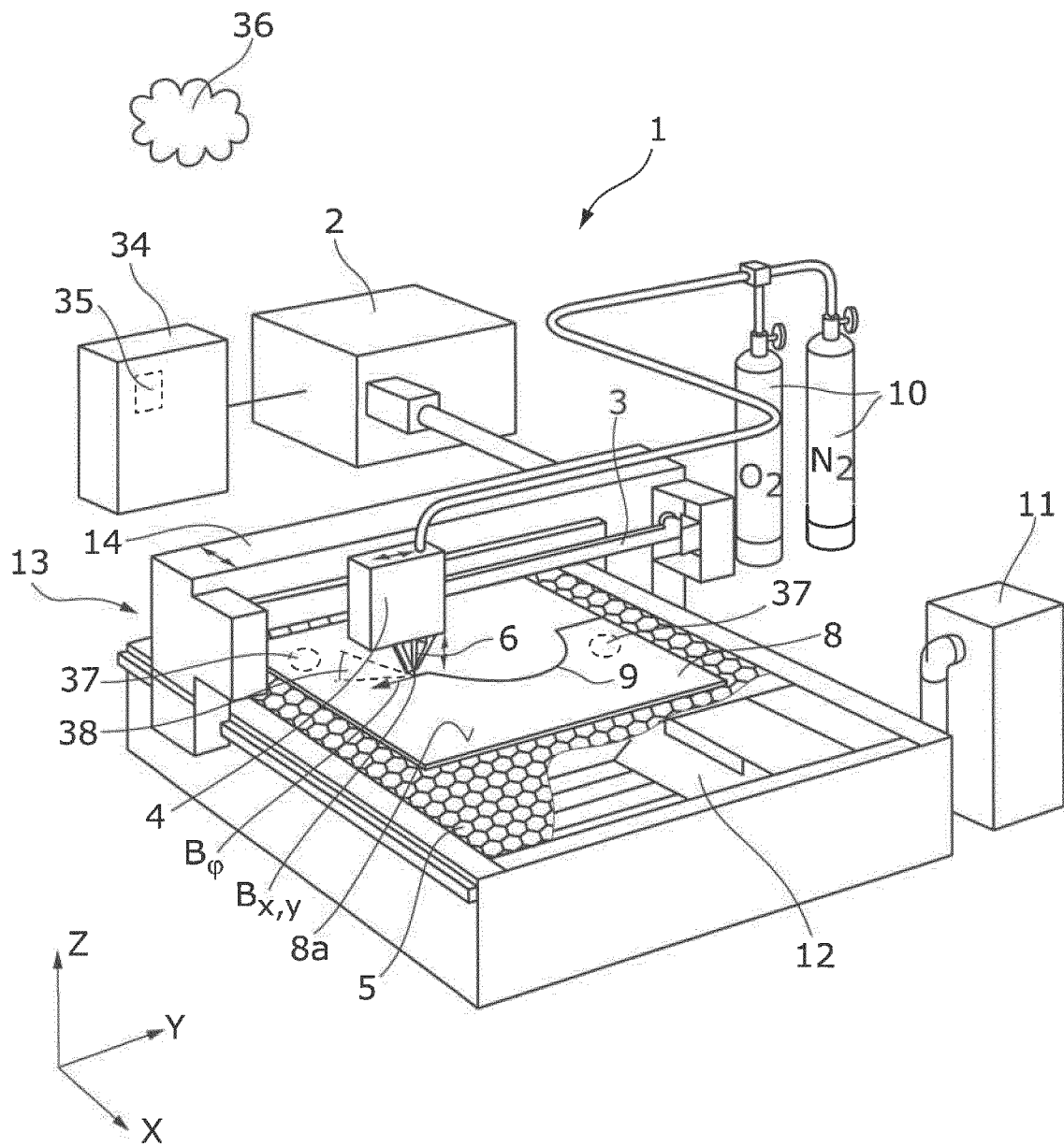


Fig. 1

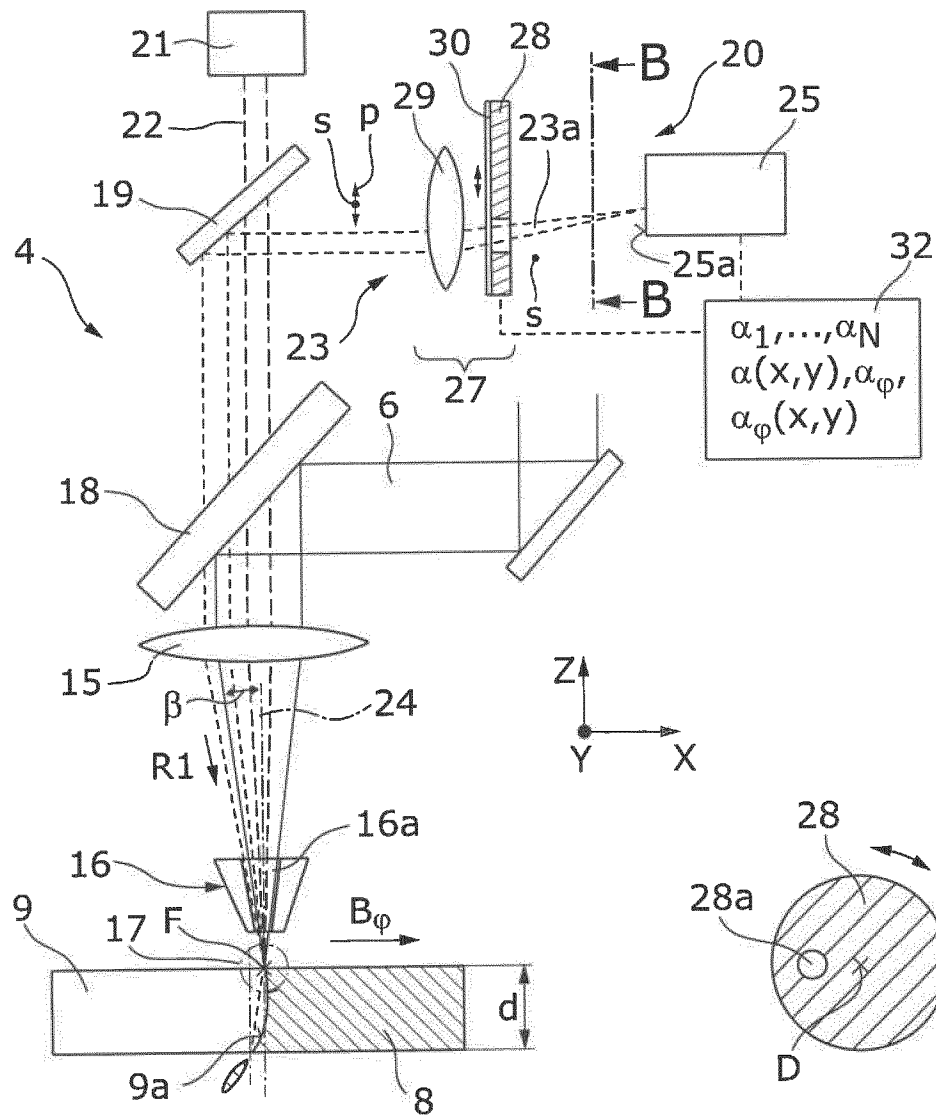


Fig. 2a

Fig. 2b

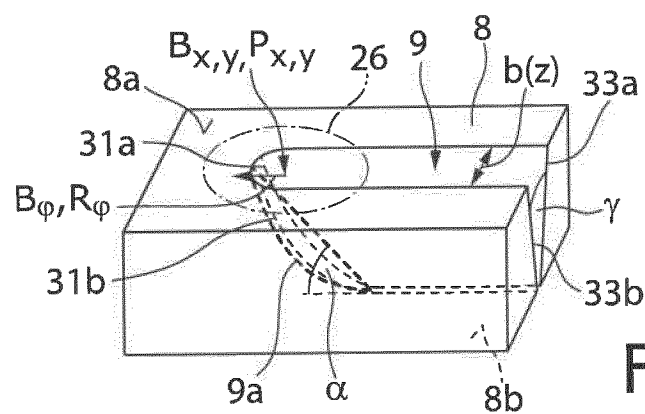


Fig. 3

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2019/077612**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**

B23K 26/03(2006.01)i; **B23K 26/042**(2014.01)i; **B23K 26/046**(2014.01)i; **B23K 26/08**(2014.01)i; **B23K 26/142**(2014.01)i;
B23K 26/38(2014.01)i; **B23K 31/12**(2006.01)i; **B25J 9/16**(2006.01)i; **G05B 23/02**(2006.01)i; **G05B 19/4061**(2006.01)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; B25J; G05B

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	EP 2357057 A1 (PRIMA IND SPA [IT]) 17 August 2011 (2011-08-17) paragraphs [0012], [0014], [0015], [0017], [0019], [0022] - [0024], [0026], [0044] - [0054]; figures 1-4	1-16
Y	DE 102008052592 A1 (TRUMPF WERKZEUGMASCHINEN GMBH [DE]) 22 April 2010 (2010-04-22) paragraphs [0008], [0010], [0048], [0051]	1,4,5,11,14,15
Y	EP 2883647 A1 (BYSTRONIC LASER AG [CH]) 17 June 2015 (2015-06-17) paragraphs [0035], [0077], [0087], [0091], [0092], [0101]	1,4,5,11,14,15
Y	US 2015210013 A1 (TEULET PATRICK [FR]) 30 July 2015 (2015-07-30) paragraphs [0007] - [0011]	1,4,5,11,14,15

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
 “E” earlier application or patent but published on or after the international filing date
 “L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
 “O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
 “P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
 “X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
 “Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
 “&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

16 January 2020

Date of mailing of the international search report

27 January 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

Kramer, Ellen

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/EP2019/077612

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
EP	2357057	A1	17 August 2011	CN	102147602	A	10 August 2011
				EP	2357057	A1	17 August 2011
				IT	1397985	B1	04 February 2013
				JP	5801564	B2	28 October 2015
				JP	2011183455	A	22 September 2011
				US	2011192825	A1	11 August 2011
DE	102008052592	A1	22 April 2010	CN	102224469	A	19 October 2011
				DE	102008052592	A1	22 April 2010
				EP	2340469	A1	06 July 2011
				JP	5871618	B2	01 March 2016
				JP	2012506578	A	15 March 2012
				KR	20110073550	A	29 June 2011
				PL	2340469	T3	28 February 2019
				US	2011210107	A1	01 September 2011
				WO	2010045935	A1	29 April 2010
EP	2883647	A1	17 June 2015	CN	104907700	A	16 September 2015
				EP	2883647	A1	17 June 2015
				US	2015165549	A1	18 June 2015
US	2015210013	A1	30 July 2015	EP	2877315	A1	03 June 2015
				FR	2993805	A1	31 January 2014
				JP	6224707	B2	01 November 2017
				JP	2015530285	A	15 October 2015
				US	2015210013	A1	30 July 2015
				WO	2014016402	A1	30 January 2014

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES

INV. B23K26/03 B23K26/042 B23K26/046 B23K26/08 B23K26/142
 B23K26/38 B23K31/12 B25J9/16 G05B23/02 G05B19/4061

ADD.

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

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)

B23K B25J G05B

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	EP 2 357 057 A1 (PRIMA IND SPA [IT]) 17. August 2011 (2011-08-17) Absätze [0012], [0014], [0015], [0017], [0019], [0022] - [0024], [0026], [0044] - [0054]; Abbildungen 1-4 -----	1-16
Y	DE 10 2008 052592 A1 (TRUMPF WERKZEUGMASCHINEN GMBH [DE]) 22. April 2010 (2010-04-22) Absätze [0008], [0010], [0048], [0051] -----	1,4,5, 11,14,15
Y	EP 2 883 647 A1 (BYSTRONIC LASER AG [CH]) 17. Juni 2015 (2015-06-17) Absätze [0035], [0077], [0087], [0091], [0092], [0101] -----	1,4,5, 11,14,15
Y	US 2015/210013 A1 (TEULET PATRICK [FR]) 30. Juli 2015 (2015-07-30) Absätze [0007] - [0011] -----	1,4,5, 11,14,15



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

16. Januar 2020

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

27/01/2020

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

Kramer, Ellen

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2019/077612

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
EP 2357057	A1	17-08-2011	CN 102147602 A 10-08-2011
			EP 2357057 A1 17-08-2011
			IT 1397985 B1 04-02-2013
			JP 5801564 B2 28-10-2015
			JP 2011183455 A 22-09-2011
			US 2011192825 A1 11-08-2011

DE 102008052592	A1	22-04-2010	CN 102224469 A 19-10-2011
			DE 102008052592 A1 22-04-2010
			EP 2340469 A1 06-07-2011
			JP 5871618 B2 01-03-2016
			JP 2012506578 A 15-03-2012
			KR 20110073550 A 29-06-2011
			PL 2340469 T3 28-02-2019
			US 2011210107 A1 01-09-2011
			WO 2010045935 A1 29-04-2010

EP 2883647	A1	17-06-2015	CN 104907700 A 16-09-2015
			EP 2883647 A1 17-06-2015
			US 2015165549 A1 18-06-2015

US 2015210013	A1	30-07-2015	EP 2877315 A1 03-06-2015
			FR 2993805 A1 31-01-2014
			JP 6224707 B2 01-11-2017
			JP 2015530285 A 15-10-2015
			US 2015210013 A1 30-07-2015
			WO 2014016402 A1 30-01-2014
