



(19)  
 Bundesrepublik Deutschland  
 Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2008 030 783 B3** 2009.08.13

(12)

## Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2008 030 783.1**  
 (22) Anmeldetag: **28.06.2008**  
 (43) Offenlegungstag: –  
 (45) Veröffentlichungstag  
 der Patenterteilung: **13.08.2009**

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: **B23K 26/38** (2006.01)  
**B23K 26/02** (2006.01)  
**B23K 26/14** (2006.01)

Innerhalb von drei Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:  
**TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG,**  
**71254 Ditzingen, DE**

(74) Vertreter:  
**Kohler Schmid Möbus Patentanwälte, 70565**  
**Stuttgart**

(72) Erfinder:  
**Sepp, Florian, 86972 Altenstadt, DE; Metsch,**  
**Volker, 74379 Ingersheim, DE**

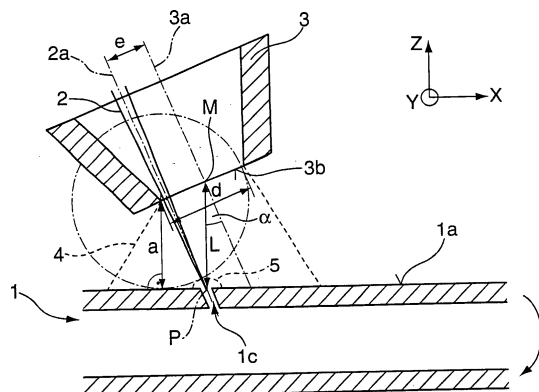
(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
 gezogene Druckschriften:

**EP 16 84 046 A1**  
**EP 08 73 813 B1**  
**JP 05-0 57 470 A**

**WILLACH, J. [u.a.]: Melt expulsion by a coaxial gas  
 jet in trepanning of CMSX-4 with microsecond  
 Nd: YAG laser radiation. Proceedings of the  
 SPIE, 2003, Vol.5063, S.435-440**

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Laserstrahlschrägschneiden und Laserbearbeitungsmaschine**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Laserstrahlschrägschneiden eines Werkstücks (1), bei dem ein aus einer Schneidgasdüse (3) austretender Überschall-Schneidgasstrom (4) unter einem Schrägschneidwinkel ( $\alpha$ ) zur Werkstückoberfläche (1a) ausgerichtet wird, und bei dem das Werkstück (1) und der Laserschneidstrahl (2) beim Laserstrahlschrägschneiden relativ zueinander bewegt werden, wobei der Schrägschneidwinkel ( $\alpha$ ) rechtwinklig zu einer Vorschubrichtung (Y) verläuft. Während der Relativbewegung wird die Position (P) des Laserschneidstrahls (2) auf der Werkstückoberfläche (1a) so eingestellt, dass der Laserschneidstrahl (2) in einem innerhalb des Überschall-Schneidgasstroms (4) gebildeten Hochdruckbereich (5) auf die Werkstückoberfläche (1a) auftrifft. Die Erfindung betrifft auch eine Laserbearbeitungsmaschine zur Durchführung des Verfahrens.



## Beschreibung

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Laserstrahlschrägschneiden eines Werkstücks, bei dem ein aus einer Schneidgasdüse austretender Überschall-Schneidgasstrom unter einem Schrägschneidwinkel zur Werkstückoberfläche ausgerichtet wird, und bei dem das Werkstück und der Laserschneidstrahl beim Laserstrahlschrägschneiden relativ zueinander bewegt werden, wobei der Schrägschneidwinkel rechtwinklig zu einer Vorschubrichtung verläuft. Die Erfindung betrifft auch eine Laserbearbeitungsmaschine zum Laserstrahlschrägschneiden eines Werkstücks, umfassend: eine unter einem Schrägschneidwinkel relativ zu einer Werkstückoberfläche ausrichtbare Schneidgasdüse zur Erzeugung eines Überschall-Schneidgasstroms, eine Bewegungseinrichtung zur Bewegung des Werkstücks und des Laserschneidstrahls relativ zueinander unter einem rechtwinklig zu einer Vorschubrichtung verlaufenden Schrägschneidwinkel, und einen Laserbearbeitungskopf zum Positionieren eines Laserschneidstrahls an einer Position auf der Werkstückoberfläche.

**[0002]** Um zwei insbesondere rohrförmige Werkstücke unter Ausbildung eines Winkels von z. B. 90° miteinander zu verbinden, können diese zunächst schräg unter einem Winkel von 45° abgetrennt und anschließend an den Schnittkanten miteinander verschweißt werden. Für das Schweißen sollten die Schnittkanten möglichst flächig aneinander anliegen, was jedoch nicht möglich ist, wenn der Laserschneidstrahl während des Schneidvorgangs senkrecht zur Flächennormalen der Werkstückoberfläche ausgerichtet ist, da in diesem Fall beim Trennen verwundene Schnittflächen entstehen. Um dies zu vermeiden, wird beim sog. Laserstrahlschrägschneiden der Laserschneidstrahl und der das Laserschneiden unterstützende Überschall-Schneidgasstrom unter einem Winkel zur Flächennormalen geneigt, dem sog. Schrägschneidwinkel. Wird der Schrägschneidwinkel während des Schneidprozesses variiert, kann auch bei einem schrägen Schnitt an einem Rohr eine plane Schnittfläche erzeugt werden, so dass das Verschweißen der Schnittkanten wesentlich vereinfacht wird. Es versteht sich, dass das Schrägschneiden nicht nur an rohrförmigen, sondern auch insbesondere an dicken, plattenförmigen Werkstücken vorgenommen werden kann, um diese an den beim Schrägschneiden gebildeten, schrägen Schnittkanten leichter miteinander verschweißen zu können.

**[0003]** Der oben beschriebene Laserstrahlschrägschneidprozess ist aber bis jetzt noch keineswegs beherrscht, d. h. es muss mit deutlichen Vorschubreduzierungen (bei einem Schrägschneidwinkel von 45° bis zu 70%) und deutlichen Qualitätseinbußen gegenüber dem konventionellen Laserstrahlschneiden mit senkrecht zur Werkstückoberfläche ausge-

richtetem Laserschneidstrahl gerechnet werden. Insbesondere wiesen die beim Laserstrahlschrägschneiden erzeugten Schnittkanten in Abhängigkeit vom Schrägschneidwinkel unterschiedliche Oberflächengüten auf, wobei an einer Schnittkante eine starke Gratbildung, an der anderen Schnittkante eine raue Oberflächenstruktur zu beobachten ist.

**[0004]** Aus dem Artikel „Melt Expulsion by a Coaxial Gas Jet in Trepanning of CMSX-4 with Microsecond Nd:YAG Laser Radiation“ von J. Willach et al., Proceedings of the SPIE, Vol. 5063, pp. 435–440, ist es bekannt, beim Trepanieren von Mikrobohrungen in Turbinenschaufeln den unter einem Schrägschneidwinkel zum Werkstück ausgerichteten Laserschneidstrahl und den parallel zu diesem ausgerichteten Überschall-Schneidgasstrom bzw. die Schneidgasdüse lateral zueinander zu verschieben, um den Stagnationspunkt bzw. das Hochdruckgebiet des Überschall-Schneidgasstroms unmittelbar über der Bohrung zu positionieren. Auf diese Weise soll verhindert werden, dass der Gasdruck und die Dicke der erstarrten Schmelze periodisch entlang der Wand der Bohrung variieren, wie dies bei koaxialer Ausrichtung von Gasströmung und Laserstrahlachse der Fall ist. Durch den Lateralversatz sollen diese Oszillationen unterbunden und ein erhöhter Gasfluss durch die Bohrung und damit ein leichter Austritt der Schmelze an der Unterseite der Bohrung erreicht werden. Um eine durch Trepanieren erhaltene Bohrung zu vergrößern, wird eine weitere Bohrung mit Überlappung daneben platziert, wobei sich Überlappungen zwischen den Bohrungen im Bereich zwischen 50% und 80% als besonders günstig ergeben haben.

**[0005]** Die JP 05 057 470 A beschreibt ein Verfahren zum Laserstrahlschneiden eines Werkstücks, bei dem ein aus einer Schneidgasdüse austretender Schneidgasstrom unter einem Schrägschneidwinkel zur Oberfläche des Werkstücks ausgerichtet wird und bei dem das Werkstück und ein Laserschneidstrahl relativ zueinander bewegt werden. In einer Ausführung des dort beschriebenen Verfahrens wird eine optische Achse des Laserschneidstrahls gegenüber dem Zentrum der Schneidgasdüse in Richtung auf das Werkstück hin verschoben.

## Aufgabe der Erfindung

**[0006]** Es ist die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren zum Laserstrahlschrägschneiden sowie eine Laserbearbeitungsmaschine zur Durchführung des Verfahrens dahingehend weiterzubilden, dass ein qualitativ hochwertiger Schnitt bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten ermöglicht wird.

## Gegenstand der Erfindung

**[0007]** Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß gelöst durch ein Verfahren der eingangs genannten Art, bei

dem während der Relativbewegung die Position des Laserschneidstrahls auf der Werkstückoberfläche so eingestellt wird, dass der Laserschneidstrahl in einem innerhalb des Überschall-Schneidgasstroms gebildeten Hochdruckbereich auf die Werkstückoberfläche auftrifft. Die Position des Hochdruckbereichs innerhalb des Überschall-Schneidgasstroms ist hierbei vom sich ggf. während des Laserschneidens verändernden Schrägschneidwinkel abhängig. Der Hochdruckbereich und damit die Position des Laserschneidstrahls auf der Werkstückoberfläche sind hierbei für Winkel, bei denen der Laserschneidstrahl nicht senkrecht zur Werkstückoberfläche ausgerichtet ist, zur Düsenachse der Schneidgasdüse, welche dem Zentrum des Überschall-Schneidgasstroms entspricht, versetzt.

**[0008]** Die Erfinder haben erkannt, dass ein Versatz zwischen Laserschneidstrahl und Zentrum des Überschall-Schneidgasstroms nicht nur bei der Erzeugung von Bohrungen (Trepanieren) günstig ist, sondern auch beim Laserstrahlschrägschneiden, d. h. bei einer Vorschubbewegung zwischen Werkstück und Laserschneidstrahl, da in diesem Fall die Schneidgasdynamik den limitierenden Faktor darstellt: Ein Großteil des Schneidgases strömt an der schräg zum Überschall-Schneidgasstrom verlaufenden Werkstückoberfläche ab und steht somit dem Schneidprozess nicht mehr zur Verfügung, weshalb das hierbei erzeugte statische Druckniveau im Schnittspalt zu gering ist.

**[0009]** Durch Erzeugen eines gewollten Versatzes (Exzentrizität) zwischen dem Laserschneidgasstrahl und dem Zentrum des Überschall-Schneidgasstroms lässt sich eine Verschiebung des Schnittspalts in einen strömungstechnisch günstigeren Bereich erzielen. Die Verschiebung des Laserschneidstrahls bzw. des Schnittspalts findet dabei rechtwinklig zur Vorschubrichtung und um einen definierten Wert statt, der vom (variablen) Schrägschneidwinkel abhängt. Die auf diese Weise verbesserte Einkopplung des Überschall-Schneidgasstroms in den Schnittspalt hat eine Steigerung des statischen Druckniveaus im Schnittspalt um mehrere Größenordnungen zur Folge. Beispielhafte numerische Strömungsberechnungen ergaben im Vergleich zur bisherigen Verfahrensvariante eine Steigerung um ca. 350%. Eine Erhöhung des statischen Druckniveaus im Schnittspalt hat nachweislich einen verbesserten Schmelzaustrieb zur Folge, was wiederum eine Überhitzung des Schnittspaltes aufgrund des Anstauens von Metallschmelze verhindert. Das so optimierte Austriebsvermögen der Schmelze kann daher direkt in eine Vorschubssteigerung umgewandelt werden. Die maximal erreichten Vorschübe unterscheiden sich hierbei kaum von den blechdickenabhängigen Vorschüben, die beim herkömmlichen Laserstrahlschneiden erreicht werden können. Auch lassen sich an den Schnittkanten auf beiden Seiten Kanten- und Ober-

flächenqualitäten erzeugen, die mit denjenigen beim senkrechten Laserstrahlschneiden konkurrenzfähig sind.

**[0010]** Die Variation des Schrägschneidwinkels ist hierbei insbesondere beim Schrägschneiden von Rohren erforderlich, da zur Erzeugung einer ebenen Schnittfläche bei einem 45°-Abschnitt an einem Rohr der Schrägschneidwinkel senkrecht zur Vorschubrichtung z. B. zwischen -45° und 45° variiert werden muss. Bei rechtwinkliger Ausrichtung des Werkstücks (Schrägschneidwinkel 0°) liegt das Hochdruckgebiet auf dem Werkstück hierbei im Zentrum des Überschall-Schneidgasstroms, bei nicht rechtwinkliger Ausrichtung weist die Position des Hochdruckgebiets davon ab und variiert mit dem Schrägschneidwinkel, so dass die Position des Laserstrahls auf dem Werkstück nachgeführt werden muss, um sicherzustellen, dass der Laserstrahl während des Schrägschneidens im Hochdruckgebiet verbleibt.

**[0011]** In einer bevorzugten Variante wird zum Einstellen der Position des Laserschneidstrahls während des Laserstrahlschneidens der Abstand zwischen der Schneidgasdüse und dem Werkstück bestimmt. Der Abstand zwischen Schneidgasdüse und Werkstück ändert sich in der Regel während des Schrägschneidprozesses mit der Veränderung des Schrägschneidwinkels. Da die Position des Hochdruckgebiets auf dem Werkstück auch vom Abstand zwischen Schneidgasdüse und Werkstück abhängt, ist es günstig, den Abstand während des Schrägschneidprozesses möglichst kontinuierlich zu erfassen und den erfassten Abstand zur Einstellung bzw. Anpassung der Position des Laserschneidstrahls zu nutzen.

**[0012]** In einer vorteilhaften Weiterbildung wird zum Bestimmen des Abstands die Kapazität zwischen Schneidgasdüse und Werkstück gemessen, wobei der Einfluss des Schrägschneidwinkels auf die Kapazität bei der Bestimmung des Abstands berücksichtigt wird. Die kapazitive Messung des Abstandes zwischen Werkstück und Schneidgasdüse ist prinzipiell bekannt und kann wie in der EP 0 873 813 B1 oder der EP 1 684 046 A1 der Anmelderin dargestellt erfolgen, welche bezüglich dieses Aspekts durch Bezugnahme zum Inhalt dieser Anmeldung gemacht werden. Bei der Veränderung des Schrägschneidwinkels verändert sich die Ausrichtung der Schneidgasdüse relativ zum Werkstück, was eine Veränderung der elektrischen Feldlinien zwischen Schneidgasdüse und Werkstück und damit einhergehend eine Veränderung der Kapazität auch bei gleichem Abstand zur Folge hat. Die Veränderung der Kapazität mit dem Schrägschneidwinkel muss daher für die Abstandsmessung berücksichtigt werden, um zu einem jeweiligen Schrägschneidwinkel einen jeweils korrekten Abstandswert zu erhalten.

**[0013]** In einer vorteilhaften Variante wird die Position des Laserschneidstrahls in Abhängigkeit vom Abstand  $a$  zwischen der Schneidgasdüse und der Werkstückoberfläche sowie dem Durchmesser  $d$  der Düsenöffnung bestimmt. Der Abstand  $e$  zwischen dem Zentrum des Überschall-Schneidgasstroms und einem parallel zum Überschall-Schneidgasstrom ausgerichteten Laserschneidstrahl, der in seiner idealen Schnittspaltposition in der Mitte des Hochdruckgebietes angeordnet ist, lässt sich in Abhängigkeit der drei Parameter  $\alpha$ ,  $a$  und  $d$  wie folgt bestimmen:

$$e = \sin(\alpha)(a + (d/2)\sin(\alpha)),$$

wie weiter unten im Einzelnen dargestellt wird. Da der momentane Schrägschneidwinkel  $\alpha$ , der Düsendurchmesser  $d$  sowie der Abstand  $a$  (ggf. durch eine Abstandsmessung) der Maschinensteuerung bekannt sind, kann eine Laserbearbeitungsmaschine, an der das Verfahren durchgeführt wird, die Exzentrizität  $e$  selbst bestimmen und während des Laserstrahlschrägschneidens geeignet anpassen. Insbesondere können hierbei alle benötigten Größen im Maschinencode der numerischen Steuerung („numerical control“) bereits vorgegeben werden. Es versteht sich, dass unter dem Düsendurchmesser nicht notwendiger Weise der Durchmesser einer kreisförmigen Düsenöffnung verstanden wird, sondern dass ggf. auch Schneidgasdüsen mit anderen geometrischen Formen, z. B. mit elliptischer Form der Düsenöffnung eingesetzt werden können. In diesem Fall bezieht sich der Durchmesser der Düsenöffnung auf deren momentane (maximale) Ausdehnung senkrecht zur Vorschubrichtung.

**[0014]** In einer bevorzugten Variante werden der Laserschneidstrahl und die Düsenachse der Schneidgasdüse parallel ausgerichtet und die Position des Laserschneidstrahls auf der Werkstückoberfläche wird durch Verändern des Abstands zwischen dem Laserschneidstrahl und der Düsenachse eingestellt. Dies kann durch Verschieben des Linsenrohrs mit dem Laserstrahl relativ zur (ortsfesten) Schneidgasdüse, durch Verschieben der Schneidgasdüse beim ortsfestem Laserstrahl oder durch Überlagern dieser beiden Bewegungen erfolgen. In jedem Fall kann zur Bestimmung der Exzentrizität  $e$  die obige Formel verwendet werden, wobei diese ggf. noch durch das Hinzufügen von (konstanten) Korrekturfaktoren an die konkreten Prozessbedingungen angepasst werden kann.

**[0015]** Bei einer besonders vorteilhaften Variante werden der Laserschneidstrahl und die Düsenachse der Schneidgasdüse nicht parallel ausgerichtet und bevorzugt wird die Position des Laserschneidstrahls auf der Werkstückoberfläche durch winkelschiefe Fokussierung des Laserschneidstrahls eingestellt. Die Erfinder haben erkannt, dass es nicht zwingend erforderlich ist, den Laserschneidstrahl parallel zur Dü-

senachse auszurichten bzw. diesen als Ganzes lateral zur Düsenöffnung zu verschieben, um einen Versatz auf der Werkstückoberfläche zu erzeugen. Vielmehr kann der für die vorliegende Anwendung erforderliche, verhältnismäßig geringe Strahlversatz z. B. auch dadurch erreicht werden, dass der Laserschneidstrahl winkelschief fokussiert wird, d. h. der Laserschneidstrahl trifft nicht wie sonst im Wesentlichen senkrecht auf ein fokussierendes Element, sondern seine optische Achse ist bezüglich des fokussierenden Elements geneigt, so dass der Laserschneidstrahl an dem fokussierenden Element umgelenkt wird und sich dadurch ebenfalls eine laterale Verschiebung bezüglich der Düsenachse ergibt.

**[0016]** In einer bevorzugten Weiterbildung wird zur winkelschiefen Fokussierung des Laserschneidstrahls ein fokussierendes Element und/oder ein im Strahlengang des Laserschneidstrahls vor dem fokussierenden Element angeordneter Umlenkspiegel verkippt. Eine relativ geringe Auslenkung des Umlenkspiegels bzw. des fokussierenden (Linsen-)Elements ist ausreichend, um eine vergleichsweise große Exzentrizität des Laserbearbeitungsstrahls auf dem Werkstück zu erreichen. Insbesondere bei der Verkipfung des Umlenkspiegels ist die Verstelleinrichtung hinreichend weit vom eigentlichen Prozess entfernt, so dass dieser störungsunempfindlicher wird.

**[0017]** In einer besonders vorteilhaften Variante wird der Laserschneidstrahl in einem Abstand von mehr als 50%, bevorzugt von mehr als 70% der Dicke des Werkstücks unterhalb der Werkstückoberseite fokussiert. Die Erfinder haben herausgefunden, dass im Gegensatz zu herkömmlichen Laserschneidprozessen, bei denen der Fokus auf der Werkstückoberfläche oder im oberen Drittel bzw. der oberen Hälfte des Werkstücks fokussiert wird, um einen trichterförmigen Schnittspalt zu erhalten, bei der vorliegenden Anwendung eine Fokussierung in der unteren Hälfte des Werkstücks, ggf. sogar noch unterhalb der Werkstückunterseite günstig ist, um eine hohe Qualität des Laserschneidprozesses zu gewährleisten.

**[0018]** Als Schneidgas kann ein inertes Gas, insbesondere Stickstoff gewählt werden. Der Überschall-Schneidgasstrom wird in der Regel mit inertem Gasen durchgeführt, d. h. ein zusätzlicher Energieeintrag durch reaktive Gase wie z. B. Sauerstoff findet nicht statt. Das Schneidgas steht hierbei unter einem hohen Druck von mehr als 10 bar, typischer Weise ca. 15 bar, ggf. auch von 20 bar oder mehr.

**[0019]** Die Erfindung ist auch verwirklicht in einer Laserbearbeitungsmaschine der eingangs genannten Art, welche zusätzlich aufweist: eine Einstelleinrichtung zum Einstellen der Position des Laserschneidstrahls auf der Werkstückoberfläche relativ zum Überschall-Schneidgasstrom, sowie eine Steue-

zungseinrichtung, die ausgelegt ist, die Position des Laserschneidstrahls auf der Werkstückoberfläche so einzustellen, dass der Laserschneidstrahl bei der Relativbewegung in einem innerhalb des Überschall-Schneidgasstroms gebildeten Hochdruckgebiet verbleibt. Die Laserbearbeitungsmaschine kann insbesondere zum Laserstrahlschneiden von rohrförmigen Werkstücken ausgelegt sein. Es versteht sich aber, dass ggf. auch ein Schrägschneiden an anderen, insbesondere plattenförmigen Werkstücken erfolgen kann, bei denen der Schrägschneidwinkel ggf. während des Laserstrahlschneidens konstant bleibt.

**[0020]** In einer bevorzugten Ausführungsform weist die Laserbearbeitungsmaschine eine Abstandsmesseinrichtung zur Abstandsmessung zwischen der Schneidgasdüse und dem Werkstück auf. Die Abstandsmessung kann z. B. optisch oder mechanisch erfolgen. Mit Hilfe der Abstandsmesseinrichtung kann der Abstand so eingestellt werden, dass er einerseits groß genug ist, um das Berühren der Schneidgasdüse an dem Werkstück bzw. an von diesem abstehenden Teilen zu verhindern, und andererseits klein genug, um eine gute Einkopplung des Schneidgasstrahls in das Werkstück zu ermöglichen.

**[0021]** In einer besonders vorteilhaften Ausführungsform ist die Abstandsmesseinrichtung ausgelegt, die Kapazität zwischen der Schneidgasdüse und dem Werkstück zu messen und unter Berücksichtigung des Einflusses des Schrägschneidwinkels auf die Kapazität den Abstand zwischen Schneidgasdüse und Werkstückoberfläche zu bestimmen. Zu diesem Zweck können Kennlinien in der Abstandsmesseinrichtung hinterlegt werden, welche den Zusammenhang zwischen Kapazität und Abstand bei einem jeweiligen Schrägschneidwinkel (z. B. bei 0°, 15°, 30°, 45° etc.) definieren. Die Kennlinien können hierbei durch Kalibrations-Messungen erhalten werden, bei denen der (bekannte) Abstand zwischen Schneidgasdüse und Werkstückoberfläche bei festem Schrägschneidwinkel variiert wird.

**[0022]** In einer besonders bevorzugten Ausführungsform ist die Steuerungseinrichtung ausgelegt, die an den Schrägschneidwinkel angepasste Position des Laserschneidstrahls in Abhängigkeit vom Abstand zwischen der Schneidgasdüse und der Werkstückoberfläche sowie dem Durchmesser der Düsenöffnung zu bestimmen. Dies kann auf besonders einfache Weise durch die oben angegebene Formel erfolgen.

**[0023]** In einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform umfasst die Einstellereinrichtung eine Verschiebeeinrichtung zur Einstellung der Position des Laserschneidstrahls auf der Werkstückoberfläche durch Verändern des Abstands zwischen der Düsenachse der Schneidgasdüse und dem parallel zur Düsenach-

se ausgerichteten Laserschneidstrahl. Als Verschiebeeinrichtung können z. B. Linearmotoren dienen, welche am Laserbearbeitungskopf angebracht sind und die Bewegung der Schneidgasdüse relativ zum Laserbearbeitungskopf entlang einer typischer Weise senkrecht zur Düsenachse ausgerichteten Raumrichtung ermöglichen. Alternativ oder zusätzlich kann auch das Linsenrohr bzw. können optische Elemente, z. B. Umlenkspiegel, in der Strahlführung verschoben oder verkippt werden, um die Position des Laserschneidstrahls in der Düsenöffnung zu verändern und auf diese Weise einen Lateralversatz zwischen Düsenachse und Laserschneidstrahl zu erreichen.

**[0024]** In einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform umfasst die Einstellereinrichtung eine Verkipfungseinrichtung zum Verkippen eines fokussierenden Elements und/oder eines im Strahlengang des Laserschneidstrahls vor dem fokussierenden Element angeordneten Umlenkspiegels, um die Position des Laserschneidstrahls auf der Werkstückoberfläche durch winkelschiefe Fokussierung einzustellen. Durch winkelschiefe Fokussierung kann ebenfalls der Strahlversatz bzw. die Exzentrizität des Laserschneidstrahls relativ zum Überschall-Schneidgasstrom auf der Werkstückoberfläche eingestellt werden, wobei in diesem Fall die Düsenachse der Schneidgasdüse und die Strahlachse des Laserschneidstrahls nicht parallel zueinander verlaufen.

**[0025]** Es versteht sich, dass neben den oben aufgezeigten Möglichkeiten zur Erzeugung eines lateralen Versatzes zwischen Laserschneidstrahl und Überschall-Schneidgasstrom noch weitere Möglichkeiten bestehen, z. B. kann der Laserschneidstrahl exzentrisch durch eine insbesondere nicht radialsymmetrische Düsenöffnung hindurch treten und durch Drehen des Düsenkörpers ebenfalls ein lateraler Versatz zwischen dem Laserbearbeitungsstrahl und dem Überschall-Schneidgasstrom erzeugt werden.

**[0026]** Die Erfindung ist weiterhin verwirklicht in einem Computerprogrammprodukt, welches Codemittel zum Erstellen eines Bearbeitungsprogramms aufweist, das zum Durchführen aller Schritte des oben beschriebenen Verfahrens angepasst ist, wenn das Bearbeitungsprogramm auf der Steuerungseinrichtung der Laserbearbeitungsmaschine abläuft. Das Computerprogrammprodukt kann z. B. eine Diskette oder ein anderer Datenträger sein, auf dem ein Programmcode als Codemittel gespeichert ist, der geeignet ist, das Bearbeitungsprogramm anhand von durch einen Benutzer über eine geeignete Bedienoberfläche vorgebbaren Angaben über den gewünschten Schrägschneidprozess (Art des Werkstücks, Art der Kontur, etc.) zu erstellen. Das Bearbeitungsprogramm kann schon lange vor dem Bearbeiten des Werkstückes erstellt werden und erst unmittelbar vor dem Bearbeiten mittels eines computerlesbaren Mediums oder mittels einer anderen Form

der Datenübertragung an die Steuerungseinrichtung übermittelt werden.

[0027] 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.

[0028] Es zeigen:

[0029] [Fig. 1a](#), b eine schematische Darstellung eines rohrförmigen Werkstücks mit einem 45°-Abschnitt mit ebener Schnittfläche (a) und einen erfindungsgemäßen Laserstrahlschrägschneidprozess zur Erzeugung eines solchen Abschnitts mittels eines exzentrisch zu einem Überschall-Schneidgasstrom ausgerichteten Laserschneidstrahl,

[0030] [Fig. 2a–c](#) schematische Darstellungen der elektrischen Feldstärke zwischen einem Werkstück und einer Schneidgasdüse bei einem Schrägschneidwinkel von 0°, 30° bzw. 45°,

[0031] [Fig. 3a](#), b schematische Darstellungen von Teilbereichen einer erfindungsgemäßen Laserbearbeitungsmaschine zur Bearbeitung von rohrförmigen bzw. von plattenförmigen Werkstücken, und

[0032] [Fig. 4a](#), b schematische Darstellungen der winkelschiefen Fokussierung des Laserschneidstrahls (a) sowie einer drehbaren Schneidgasdüse mit elliptischem Querschnitt (b) jeweils zur Erzeugung eines lateralen Versatzes zwischen Laserschneidstrahl und Überschall-Schneidgasstrom.

[0033] [Fig. 1a](#) zeigt ein rohrförmiges Werkstück 1, an dem ein 45°-Abschnitt mit einer ebenen Schnittfläche 1b gebildet ist, welche mit einem weiteren (nicht gezeigten) rohrförmigen Werkstück mit ebener Schnittfläche unter Bildung eines 90°-Winkels entlang einer die Schnittflächen verbindenden dünnen Schweißnaht verschweißt werden kann. Um die ebene Schnittfläche 1b zu erzeugen, ist es erforderlich, an dem rohrförmigen Werkstück 1 einen Schrägschneidprozess durchzuführen, bei dem der Schrägschneidwinkel  $\alpha$  (vgl. [Fig. 1b](#)) im Bereich zwischen  $-45^\circ$  und  $45^\circ$  variiert wird, da bei einem herkömmlichen Schneidprozess mit konstantem Schrägschneidwinkel  $\alpha$  eine verwundene Schnittfläche an dem Werkstück 1 entstehen würde.

[0034] [Fig. 1b](#) zeigt eine Momentaufnahme eines solchen Laserstrahl-Schrägschneidprozesses an dem rohrförmigen Werkstück 1 bei einem Schrägschneidwinkel  $\alpha$  von ca.  $-20^\circ$ , bei dem ein Laser-

schneidstrahl 2 mit seiner Strahlachse 2a bezüglich der Flächennormalen auf die Werkstückoberfläche 1a ausgerichtet ist. Parallel zum Laserschneidstrahl 2 ist die Düsenachse 3a einer Schneidgasdüse 3 ausgerichtet, aus der ein Überschall-Schneidgasstrom 4 austritt und auf die Werkstückoberfläche 1a gerichtet wird. Der Überschall-Schneidgasstrom 4 bildet hierbei einen Hochdruckbereich 5 an der Werkstückoberfläche 1a aus, der zur Düsenachse 3a der Schneidgasdüse 3 versetzt ist und dessen Lage bezüglich der Düsenachse 3a neben dem Schrägschneidwinkel  $\alpha$  auch vom Durchmesser d der Schneidgasdüse 3 und dem Abstand a zwischen dem Rand der Düsenöffnung 3b der Schneidgasdüse 3 und der Werkstückoberfläche 1a abhängt.

[0035] Um den Laserschneidstrahl 2 im Hochdruckbereich 5 auf der Werkstückoberfläche 1a zu positionieren, wird die Strahlachse 2a des Laserschneidstrahls 2 und damit auch die Schnittfuge 1c bei dem Laserstrahlschrägschneidprozess um einen Abstand (Exzentrizität) e zur Düsenachse 3a versetzt. Zur Bestimmung der Exzentrizität e in Abhängigkeit von den Parametern  $\alpha$ , d und a wird im Folgenden ein einfaches geometrisches Modell verwendet, welches auf dem Impulserhaltungssatz basiert: Der höchste Druck und damit die Mitte des Hochdruckgebiets 5 befinden sich dort, wo die Atome des Überschall-Schneidgasstroms 4 im Wesentlichen senkrecht auf die Werkstückoberfläche 1a auftreffen. Geht man davon aus, dass die Gasmoleküle annähernd konzentrisch aus der Düsenöffnung 3b austreten, so ist diese Position P festgelegt durch denjenigen Punkt auf der Werkstückoberfläche 1a, welcher direkt unterhalb des Mittelpunkts M der Düsenöffnung 3b und um eine Länge L von diesem beabstandet auf der Werkstückoberfläche 1a liegt.

[0036] Wie aus [Fig. 1b](#) unmittelbar zu ersehen ist, gilt:  $e = L \sin(\alpha)$ . Wie aus [Fig. 1b](#) ebenfalls direkt abgelesen werden kann, gilt für die Länge  $L = a + d/2 \sin(\alpha)$ . Somit ergibt sich insgesamt für die Exzentrizität zwischen Strahlachse 2a des Laserschneidstrahls 2 und der Düsenachse 3a der Laserbearbeitungsdüse 3 der folgende Zusammenhang:

$$e = \sin(\alpha)(a + (d/2)\sin(\alpha)).$$

[0037] Aus obiger Formel kann bei gegebenem, während des gesamten Schrägschneidens konstantem Düsendurchmesser d sowie dem vorgebbaren, variablen Abstand a zwischen Schneidgasdüse 3 und Werkstückoberfläche 1a und dem Schrägschneidwinkel  $\alpha$  die Exzentrizität e bestimmt werden, die eingestellt werden muss, damit der Laserschneidstrahl 2 im Hochdruckgebiet 5 verbleibt, wenn das rohrförmige Werkstück 1 unter Variation des Schrägschneidwinkels  $\alpha$  entlang einer Vorschubrichtung Y eines XYZ-Koordinatensystems gedreht wird, wie in [Fig. 1b](#) durch einen Pfeil angedeutet ist. Ein solcher

Vorschub ist notwendig, damit an dem rohrförmigen Werkstück **1** der in [Fig. 1a](#) gezeigte, 45°-Abschnitt erzeugt werden kann. Bei der Variation des Schrägschneidwinkels  $\alpha$  in X-Richtung, d. h. rechtwinklig zur Vorschubrichtung Y in einem Bereich zwischen  $-45^\circ$  und  $45^\circ$  muss die Position P des Laserschneidstrahls **2** entsprechend nachgeführt werden, damit der Laserschneidstrahl **2** im Hochdruckbereich **5** verbleibt.

**[0038]** Hierzu ist es günstig, den Abstand  $a$  zwischen der Scheidgasdüse **3** und dem Werkstück **1** während des Schrägschneidprozesses zu überwachen und ggf. zu regeln. Zu diesem Zweck kann wie in [Fig. 2a–c](#) gezeigt eine kapazitive Abstandsmesseinrichtung **6** vorgesehen sein, welche wie in der eingangs zitierten EP 1 684 046 A1 oder der EP 0 873 813 B1 ausgebildet sein kann, und deren Funktionsweise hier nicht im Einzelnen beschrieben wird. Die Abstandsmesseinrichtung **6** erzeugt eine Potentialdifferenz zwischen dem metallischen Düsenkörper der Schneidgasdüse **3** und dem ebenfalls metallischen Werkstück **1**, so dass sich zwischen beiden ein elektrisches Feld  $E$  ausbildet, dessen Feldlinien in [Fig. 2a–c](#) für Schrägschneidwinkel  $\alpha$  von  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  und  $45^\circ$  gezeigt sind. In Abhängigkeit von der Kapazität, die zwischen der Schneidgasdüse **3** und dem metallischen Werkstück **1** gemessen wird, verändert sich die Lage der Feldlinien  $E$  und somit die Kapazität zwischen Werkstück **1** und Schneidgasdüse **3**. Um den Zusammenhang zwischen Kapazität und Abstand  $a$  bei gegebenem Schrägschneidwinkel  $\alpha$  zu ermitteln, kann z. B. bei den drei in [Fig. 2a–c](#) gezeigten Schrägschneidwinkeln  $\alpha$  jeweils eine Kapazitätsmessung bei variablem, bekanntem Abstand vorgenommen werden, um Kennlinien für den Abstand in Abhängigkeit von der Kapazität bei konstantem Schrägschneidwinkel zu erhalten. Für die Abstandsmessung bei Schrägschneidwinkeln  $\alpha$ , für die keine solche Kennlinie bestimmt wurde, kann zwischen den bekannten Kennlinien interpoliert werden. Der kapazitiv gemessene Abstand  $a'$  wird hierbei zwischen der Außenkante der Schneidgasdüse **3** und dem Werkstück **1** bestimmt, wohingegen der in [Fig. 1b](#) gezeigte Abstand  $a$  zwischen der Kante der Düsenöffnung **3b** und dem Werkstück **1** definiert ist. Es versteht sich, dass bei bekannter Düsengeometrie der Schneidgasdüse **3** in der Abstandsmesseinrichtung **6** eine Umrechnung des kapazitiv gemessenen Abstands  $a'$  in den Abstand  $a$  zwischen der Kante der Düsenöffnung **3a** und dem Werkstück **1** erfolgen kann, um letzteren in die oben angegebene Formel einzusetzen.

**[0039]** Wie in [Fig. 2a–c](#) ebenfalls zu erkennen ist, wird die Strahlachse **2a** des Laserschneidstrahls **2** bei den unterschiedlichen Schrägschneidwinkeln  $\alpha$  in unterschiedlichem Abstand  $e$  zur Düsenachse **3a** ausgerichtet, um den Schneidgasstrahl **2** im Hochdruckgebiet **5** zu halten. Weiterhin wird der Laserschneidstrahl **2** nicht auf der Werkstückoberfläche **1a**

fokussiert, sondern darunter, und zwar in einem Abstand von mehr als 50% der Dicke  $d$  des Werkstücks **1** von dessen Werkstückoberseite **1a**. Durch eine solche Fokussierung kann die Qualität der Schnittkanten beim Schrägschneiden zusätzlich gesteigert werden. Die Fokussierung kann hierbei auch in einem Abstand von mehr als 70% der Dicke des Werkstücks **1** von der Werkstückoberseite **1a** erfolgen; abhängig von den Prozessbedingungen kann der Laserschneidstrahl **2** auch unterhalb der Unterseite des Werkstücks **1** fokussiert werden.

**[0040]** [Fig. 3a](#) zeigt einen Ausschnitt einer Laserbearbeitungsmaschine **7**, welche zur Durchführung des oben beschriebenen Verfahrens an dem rohrförmigen Werkstück **1** ausgelegt ist. In der Laserbearbeitungsmaschine **7** wird der Laserschneidstrahl **2** mittels einer nicht näher beschriebenen Strahlführung auf einen adaptiven Umlenkspiegel **8** gelenkt und tritt nachfolgend in einen Laserbearbeitungskopf **9** ein, in dem ein weiterer Umlenkspiegel **10** angeordnet ist, von dem der Laserschneidstrahl **2** in einen Gehäuseteil **11** des Laserbearbeitungskopfs umgelenkt wird, der mittels einer Dreheinrichtung **11a** (vgl. Doppelpfeil) um eine Achse parallel zur Y-Richtung drehbar ist, um unterschiedliche Schrägschneidwinkel  $\alpha$  an dem Werkstück **1** einstellen zu können. In dem drehbaren Gehäuseteil **11** befinden sich ein erster und zweiter Umlenkspiegel **12a**, **12b** sowie eine Fokussierlinse **13** zur Fokussierung des Laserschneidstrahls **2** auf dem Werkstück **1** bzw. wie oben beschrieben unterhalb der Werkstückoberfläche **1a**. Die Fokusslage des Laserstrahls **2** kann hierbei durch den adaptiven Umlenkspiegel **8** in gewissen Grenzen verändert werden, indem dessen Form z. B. mit Hilfe von Piezo-Elementen oder durch Druckbeaufschlagung mit einem Fluid an seiner Rückseite geeignet verändert wird. Als Bewegungseinrichtung zur Bewegung des Werkstücks **1** in der ZY-Ebene weist die Laserbearbeitungsmaschine **7** ein Spannfutter **14** (vgl. Pfeil) auf, welches zur Erzeugung einer Drehbewegung des Werkstücks **1** dient, wobei mittels des Spannfutters **14** gleichzeitig auch eine Bewegung des Werkstücks **1** in X-Richtung erfolgen kann, um den in [Fig. 1a](#) gezeigten 45°-Abschnitt zu erzeugen. Es versteht sich, dass ggf. auch der Laserbearbeitungskopf **9** mittels konventioneller Verschiebeeinheiten in X-Richtung verschiebbar sein kann, um den in [Fig. 1a](#) gezeigten 45°-Abschnitt an dem Werkstück **1** zu erzeugen.

**[0041]** Zur Erzeugung der Exzentrizität des Laserschneidstrahls **2** relativ zur an dem Laserbearbeitungskopf **9** befestigten Schneidgasdüse **3** kann diese mittels einer als Einstelleinrichtung dienenden Verschiebeeinrichtung **15** in Form eines konventionellen Linearantriebs in X-Richtung bewegt werden. Eine Steuerungseinrichtung **16** dient hierbei der Steuerung der Verschiebeeinrichtung **15** auf eine solche Weise, dass der Laserschneidgasstrahl **2** in der

X-Richtung im gewünschten Abstand zum (in **Fig. 3** nicht gezeigten) Überschall-Schneidgasstrahl **4** ausgerichtet ist. Die oben angegebene Formel für die Exzentrizität  $e$  kann hierbei in der Maschinensteuerung der Laserbearbeitungsmaschine **1** hinterlegt werden, so dass die Steuerungseinrichtung **16** die optimale Exzentrizität selbst berechnen kann.

**[0042]** Es versteht sich weiterhin, dass die Laserbearbeitungsmaschine **7** von **Fig. 3a** auch zum Schrägschneiden eines plattenförmigen Werkstücks **1** ausgelegt sein kann, wie in **Fig. 3b** dargestellt ist, bei der die Vorschubrichtung in X-Richtung verläuft. Auch in diesem Fall kann die Exzentrizität  $e$  zwischen Laserstrahlachse **2** und Düsenachse **3a** auf die oben beschriebene oder auf andere Weise eingestellt werden. Insbesondere beim in **Fig. 3b** gezeigten Schneiden von plattenförmigen Werkstücken muss der Schrägschneidwinkel nicht zwingend während des Laserstrahlschneidens variiert werden. Vielmehr kann der Schrägschneidwinkel auch einen konstanten Wert annehmen, so dass eine plane, schräge Schnittkante an dem Werkstück **1** gebildet wird. Bei der Verbindung zweier solcher plattenförmiger Werkstücke unter einem Winkel von z. B.  $90^\circ$  entlang zweier schräger Schnittkanten liegen diese flächig aneinander an, so dass die zwei plattenförmigen Werkstücke leichter miteinander verschweißt werden können. Es versteht sich, dass auch an plattenförmigen Werkstücken kompliziertere geometrische Formen geschnitten werden können, die eine Veränderung des Schrägschneidwinkels während des Laserstrahlschneidens erfordern.

**[0043]** Es versteht sich weiterhin, dass zur Erzeugung eines Versatzes zwischen der Strahlachse **2a** des Laserschneidstrahls **2** und dem Überschall-Schneidgasstrom **4** bzw. der Düsenachse **3a** verschiedene Möglichkeiten bestehen, z. B. kann auch durch Verschieben oder Verkippen eines optischen Elements, z. B. der Umlenkspiegel **12a**, **12b** die gewünschte Exzentrizität  $e$  erzeugt werden. Da bei dem Schrägschneidprozess die Laserstrahlachse **2a** nicht zwingend parallel zur Düsenachse **3a** ausgerichtet sein muss, ist es auch möglich, die Exzentrizität  $e$  auf der Werkstückoberfläche **1a** durch winkelschiefes Fokussieren an der Fokussierlinse **13** zu erzeugen, wie im Folgenden anhand von **Fig. 4a** dargestellt wird.

**[0044]** Zur winkelschiefen Fokussierung kann der erste Umlenkspiegel **12a** mittels einer in **Fig. 3** angedeuteten, konventionellen Verkippungseinrichtung **17** z. B. in Form eines Piezoaktors verkippt werden, so dass der Laserschneidstrahl **2** nicht senkrecht, sondern unter einem Winkel  $\varphi$  bezüglich der Z-Richtung auf die Fokussierlinse **13** auftrifft und zusätzlich mit seiner Laserstrahlachse **2a** bezüglich der optischen Achse **13a** der Fokussierlinse **13** um einen Abstand  $e_L$  in X-Richtung versetzt auftrifft. Der zur Erzeugung

einer gewünschten Exzentrizität  $e$  auf dem Werkstück **1** erforderliche Kippwinkel  $\varphi$  lässt sich hierbei aus dem Abstand zwischen dem Umlenkspiegel **12a** und der Fokussierlinse **13** sowie der Fokussierlänge  $f$  durch einfache geometrische Überlegungen bestimmen. Es versteht sich, dass alternativ zum oben beschriebenen Vorgehen auch die Fokussierlinse **13** verkippt werden kann, um den gewünschten lateralen Versatz zwischen Laserschneidstrahl **2** und Düsenachse **3a** zu erhalten. Es versteht sich weiterhin, dass zur winkelschiefen Fokussierung nicht zwingend die Erzeugung eines Abstands  $e_L$  zwischen der optischen Achse **13a** der Fokussierlinse **13** und der Laserstrahlachse **2a** erforderlich ist, sondern dass die Laserstrahlachse **2a** idealer Weise die Fokussierlinse **13** zentrisch an deren optischen Achse **13a** schneidet.

**[0045]** Eine weitere Möglichkeit zur Erzeugung eines lateralen Versatzes zwischen Laserschneidstrahl **2** und Überschall-Schneidgasstrom ist in **Fig. 4b** anhand einer Schneidgasdüse **3** mit ellipsenförmiger Düsenöffnung **3b** gezeigt. Der Laserschneidstrahl **2**, hinter dem sich entlang der Vorschubrichtung Y ein Schnittspalt **18** ausbildet, ist hierbei nicht im Zentrum M der Düsenöffnung **3b** angeordnet, sondern zu dieser lateral versetzt. Die Schneidgasdüse **3** kann hierbei mittels einer durch einen Pfeil angedeuteten Dreheinrichtung **19** um die Laserstrahlachse des Laserschneidstrahls **2** gedreht werden, wodurch sich die Lage des Zentrums M der Düsenöffnung **3b** in X-Richtung verändert und sich ebenfalls ein lateraler Versatz zwischen Laserschneidstrahl **2** und dem Zentrum M der Düsenöffnung **3b** bzw. dem Überschall-Schneidgasstrom ergibt. Es versteht sich, dass zur Verbesserung des Schneidergebnisses zusätzlich ein Vorlauf des Laserschneidstrahls **2** (in Y-Richtung) in der Schneidgasdüse möglich ist, ohne dass hierbei gleichzeitig die Exzentrizität durch Drehen der Schneidgasdüse einstellbar sein muss.

**[0046]** Um geeignete Prozessbedingungen für den Schrägschneidprozess zu erhalten, wird als Schneidgas ein inertes Gas, z. B. Stickstoff, verwendet, das sich unter einem hohen Schneidgasdruck von typischer Weise mehr als 10 bar in einem (nicht gezeigten) Druckraum des Laserschneidkopfs **9** befindet, der sich an die Schneidgasdüse **3** anschließt. Ferner sollte der Abstand zwischen der Schneidgasdüse **3** und der Werkstückoberfläche **1a** möglichst gering gewählt werden, um optimale Schneidergebnisse zu erhalten. Weiterhin ist es für das Schrägschneiden bei großen Schrägschneidwinkeln von z. B.  $45^\circ$  günstig, wenn der (Innen-)Durchmesser der Schneidgasdüse **3** groß gewählt wird, z. B. 2 mm oder mehr, wobei wie in **Fig. 4b** gezeigt nicht zwingend ein runder Düsenquerschnitt gewählt werden muss.

**[0047]** Der oben beschriebene Prozess zum Laserstrahlschrägschneiden ist vom bearbeiteten Material

sowie von dessen Dicke weitgehend unabhängig und kann insbesondere zum Schneiden von Edelstahl, Baustahl oder Aluminium eingesetzt werden. Es versteht sich, dass der Schrägschneidprozess nicht auf das Trennschneiden von rohrartigen Werkstücken beschränkt ist, vielmehr können auf die oben beschriebene Weise mittels des Laserschneidstrahls beliebige Konturen z. B. auch an plattenförmigen Werkstücken geschnitten werden. In jedem Fall können sowohl eine hohe Qualität der beim Trennschnitt erzeugten Schnittkanten als auch Vorschubgeschwindigkeiten erreicht werden, die denen beim senkrechten Laserstrahlschneiden bezogen auf die effektive Schnitttiefe vergleichbar sind.

### Patentansprüche

1. Verfahren zum Laserstrahlschrägschneiden eines Werkstücks (1), bei dem ein aus einer Schneidgasdüse (3) austretender Überschall-Schneidgasstrom (4) unter einem Schrägschneidwinkel ( $\alpha$ ) zur Werkstückoberfläche (1a) ausgerichtet wird, und bei dem das Werkstück (1) ein Laserschneidstrahl (2) beim Laserstrahlschrägschneiden relativ zueinander bewegt werden, wobei der Schrägschneidwinkel ( $\alpha$ ) rechtwinklig zu einer Vorschubrichtung (Y) verläuft, **dadurch gekennzeichnet**, dass während der Relativbewegung eine Position (P) des Laserschneidstrahls (2) auf der Werkstückoberfläche (1a) so eingestellt wird, dass der Laserschneidstrahl (2) in einem innerhalb des Überschall-Schneidgasstroms (4) gebildeten Hochdruckbereich (5) auf die Werkstückoberfläche (1a) auftrifft.

2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem zum Einstellen der Position (P) des Laserschneidstrahls (2) ein Abstand (a) zwischen der Schneidgasdüse (3) und dem Werkstück (1) während des Laserstrahlschrägschneidens bestimmt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 2, bei dem zum Bestimmen des Abstands (a) eine Kapazität zwischen Schneidgasdüse (3) und Werkstück (1) gemessen wird, wobei der Einfluss des Schrägschneidwinkels ( $\alpha$ ) auf die Kapazität bei der Bestimmung des Abstands (a) berücksichtigt wird.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Position (P) des Laserschneidstrahls (2) in Abhängigkeit vom Abstand (a) zwischen der Schneidgasdüse (3) und der Werkstückoberfläche (1a) sowie einem Durchmesser (d) einer Düsenöffnung (3b) bestimmt wird.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem der Laserschneidstrahl (2) und eine Düsenachse (3a) der Schneidgasdüse (3) parallel ausgerichtet werden und die Position des Laserschneidstrahls (2) auf der Werkstückoberfläche (1a) durch Verändern einer Abstands (e) zwischen dem

(2) und der Düsenachse (3a) eingestellt wird.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem der Laserschneidstrahl (2) und die Düsenachse (3a) der Schneidgasdüse (3) nicht parallel ausgerichtet werden und bevorzugt die Position (P) des Laserschneidstrahls (2) auf der Werkstückoberfläche (1a) durch winkelschiefe Fokussierung des Laserschneidstrahls (2) eingestellt wird.

7. Verfahren nach Anspruch 6, bei dem zur winkelschiefen Fokussierung des Laserschneidstrahls (2) ein fokussierendes Element (13) und/oder ein im Strahlengang des Laserschneidstrahls (2) vor dem fokussierenden Element (13) angeordneter Umlenkspiegel (12a) verkippt wird.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem der Laserschneidstrahl (2) in einem Abstand von mehr als 50%, bevorzugt von mehr als 70% der Dicke (D) des Werkstücks (1) unterhalb der Werkstückoberseite (1a) fokussiert wird.

9. Laserbearbeitungsmaschine (7) zum Laserstrahlschrägschneiden eines Werkstücks (1), umfassend:

eine unter einem Schrägschneidwinkel ( $\alpha$ ) relativ zur einer Werkstückoberfläche (1a) ausrichtbare Schneidgasdüse (3) zur Erzeugung eines Überschall-Schneidgasstroms (4), eine Bewegungseinrichtung (11a, 14) zur Bewegung des Werkstücks (1) und eines Laserschneidstrahls (2) relativ zueinander unter dem rechtwinklig zu einer Vorschubrichtung (Y) verlaufenden Schrägschneidwinkel ( $\alpha$ ),

einen Laserbearbeitungskopf (9) zum Positionieren des Laserschneidstrahls (2) an einer Position (P) auf der Werkstückoberfläche (1a), gekennzeichnet durch

einer Einstelleinrichtung (15, 17, 19) zur Einstellung der Position (P) des Laserschneidstrahls (2) auf der Werkstückoberfläche (1a) relativ zum Überschall-Schneidgasstrom (4), und einer Steuerungseinrichtung (16), die ausgelegt ist, die Position (P) des Laserschneidstrahls (2) auf der Werkstückoberfläche (1a) so einzustellen, dass der Laserschneidstrahl (2) bei der Relativbewegung in einem innerhalb des Überschall-Schneidgasstroms (4) gebildeten Hochdruckgebiet (5) verbleibt.

10. Laserbearbeitungsmaschine nach Anspruch 9, weiter umfassend eine Abstandsmesseinrichtung (6) zur Abstandsmessung zwischen der Schneidgasdüse (3) und dem Werkstück (1).

11. Laserbearbeitungsmaschine nach Anspruch 10, bei der die Abstandsmesseinrichtung (6) ausgelegt ist, eine Kapazität zwischen der Schneidgasdüse (3) und dem Werkstück (1) zu messen und unter Berücksichtigung des Einflusses des Schrägschneid-

winkels ( $\alpha$ ) auf die Kapazität einen Abstand (a) zu bestimmen.

12. Laserbearbeitungsmaschine nach einem der Ansprüche 9 bis 11, bei der die Steuerungseinrichtung (16) ausgelegt ist, die Position (P) des Laserschneidstrahls (2) in Abhängigkeit vom Abstand (a) zwischen der Schneidgasdüse (3) und der Werkstückoberfläche (1a) sowie einen Durchmesser (d) einer Düsenöffnung (3b) zu bestimmen.

13. Laserbearbeitungsmaschine nach einem der Ansprüche 9 bis 12, bei der die Einstellereinrichtung (15, 17, 19) eine Verschiebeeinrichtung (15) zur Einstellung der Position (P) des Laserschneidstrahls (2) auf der Werkstückoberfläche (1a) durch Verändern eines Abstands (e) zwischen einer Düsenachse (3a) der Schneidgasdüse (3) und dem parallel zur Düsenachse (3a) ausgerichteten Laserschneidstrahl (2) aufweist.

14. Laserbearbeitungsmaschine nach einem der Ansprüche 9 bis 13, bei der die Einstellereinrichtung (15, 17, 19) eine Verkippeeinrichtung (17) zum Verkippen eines fokussierenden Elements (13) und/oder eines im Strahlengang des Laserschneidstrahls (2) vor dem fokussierenden Element (13) angeordneten Umlenkspiegels (12a) aufweist, um die Position (P) des Laserschneidstrahls (2) auf der Werkstückoberfläche (1a) durch winkelschiefe Fokussierung einzustellen.

15. Computerprogrammprodukt, welches Code-mittel zum Erstellen eines Bearbeitungsprogramms aufweist, das zum Durchführen aller Schritte des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 8 angepasst ist, wenn das Bearbeitungsprogramm auf einer Steuerungseinrichtung (16) der Laserbearbeitungsmaschine (7) nach einem der Ansprüche 9 bis 14 abläuft.

Es folgen 3 Blatt Zeichnungen



