

(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  
31. Dezember 2008 (31.12.2008)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 2009/000356 A1**

(51) Internationale Patentklassifikation:  
**B23K 26/04** (2006.01)

Asperg (DE). **MILICH, Andreas** [DE/DE]; Gartenstr.  
11, 71282 Hemmingen (DE). **RITTER, Ulrich** [DE/DE];  
Hördtstr. 93a, 70435 Stuttgart (DE).

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2008/003297

(74) Anwalt: **KOHLER SCHMID MÖBUS**; Patentanwälte,  
Ruppmannstrasse 27, 70565 Stuttgart (DE).

(22) Internationales Anmeldedatum:

24. April 2008 (24.04.2008)

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für  
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,  
AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ,  
CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE,  
EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID,  
IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC,  
LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN,  
MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH,  
PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SV,  
SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN,  
ZA, ZM, ZW.

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:

10 2007 029 787.6 27. Juni 2007 (27.06.2007) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von  
US): **TRUMPF WERKZEUGMASCHINEN GMBH +  
CO. KG** [DE/DE]; Johann-Maus-Strasse 2, 71254 Ditzingen  
(DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **WEICK, Jürgen-Michael** [DE/DE]; Eberhard Strasse 17/3, 71679

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für  
jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW,  
GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD FOR ASCERTAINING A POINT OF CONTACT OF A LASER BEAM AT AN EDGE OF A BODY AND  
LASER MACHINING APPARATUS

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUM ERMITTELN EINES BERÜHRPUNKTS EINES LASERSTRAHLS AN EINER  
KANTE EINES KÖRPERS UND LASERBEARBEITUNGSMASCHINE

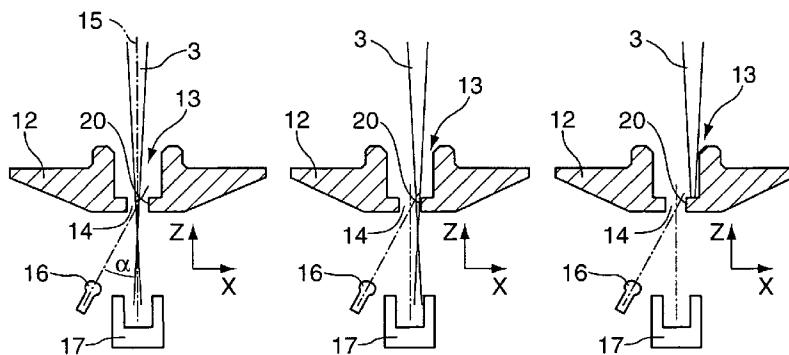


Fig. 3a

Fig. 3b

Fig. 3c

(57) Abstract: The invention relates to a method for ascertaining a point of contact of a focused, pulsed laser beam (3) at an edge (20) of a body (12), which edge is preferably formed at an opening (14) of the body (12), comprising the following steps: a) moving the laser beam (3) relative to the edge (20) in at least one spatial direction (X) preferably at right angles to the laser beam axis (15) until the laser beam (3) crosses the edge (20), b) measuring acoustic vibrations produced photoacoustically by the laser beam (3) as the laser beam (3) is moved, and c) ascertaining the point of contact of the laser beam (3) at the edge (20) by evaluating the measured acoustic vibrations. If the laser beam (3) crosses the opening (14) completely in a first spatial direction (X), two mutually opposite points of contact of the laser beam (3) at the edge (20) of the opening (14) can be ascertained and a desired position of the laser beam (3) in the opening (14) can be determined therefrom. The invention also relates to a laser machining apparatus with a laser machining nozzle (12) at a laser machining head, which can be used to carry out the method described above.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2009/000356 A1



ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

**Veröffentlicht:**

— mit internationalem Recherchenbericht

---

**(57) Zusammenfassung:** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Ermitteln eines Berührpunktes eines fokussierten, gepulsten Laserstrahls (3) an einer Kante (20) eines Körpers (12), die bevorzugt an einer Öffnung (14) des Körpers (12) gebildet ist, umfassend die Schritte: a) Bewegen des Laserstrahls (3) relativ zur Kante (20) in zumindest einer Raumrichtung (X) bevorzugt rechtwinklig zur Laserstrahlachse (15), bis der Laserstrahl (3) die Kante (20) überstreicht, b) Messen von beim Bewegen des Laserstrahls (3) durch den Laserstrahl (3) photoakustisch erzeugten akustischen Schwingungen, und c) Ermitteln des Berührpunktes des Laserstrahls (3) an der Kante (20) durch Auswerten der gemessenen akustischen Schwingungen. Überstreicht der Laserstrahl (3) die Öffnung (14) in einer ersten Raumrichtung (X) vollständig, können zwei gegenüberliegende Berührpunkte des Laserstrahls (3) an der Kante (20) der Öffnung (14) ermittelt und daraus eine Sollposition des Laserstrahls (3) in der Öffnung (14) bestimmt werden. Die Erfindung betrifft auch eine Laserbearbeitungsmaschine mit einer Laserbearbeitungsdüse (12) an einem Laserbearbeitungskopf, an der das oben beschriebene Verfahren durchgeführt werden kann.

Verfahren zum Ermitteln eines Berührpunkts eines Laserstahls an einer Kante eines  
Körpers und Laserbearbeitungsmaschine

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Ermitteln eines Berührpunktes eines fokussierten, gepulsten Laserstrahls an einer Kante eines Körpers, die bevorzugt an einer Öffnung des Körpers gebildet ist, sowie eine Laserbearbeitungsmaschine mit einer Laserbearbeitungsdüse an einem Laserbearbeitungskopf.

In Laserbearbeitungsmaschinen ist es erforderlich, eine Ist-Position (X-Y-Position) des Laserstrahls innerhalb der Laserbearbeitungsdüse und eine Fokusposition (Z-Position) des Laserstrahls relativ zu einer Werkstückoberfläche möglichst genau zu kennen bzw. den Laserstrahl auszurichten, d.h. den Laserstrahl an einer Sollposition relativ zur Düsenöffnung und/oder relativ zur Werkstückoberfläche zu positionieren. Hierzu kann ein Berührpunkt des Laserstrahls an einer Kante der Düsenöffnung oder der Kante eines anderen geeignet positionierten Körpers ermittelt werden.

Die Sollposition des Laserstrahls relativ zur Laserbearbeitungsdüse befindet sich in der Regel in der Mitte der Düsenöffnung. Die Ausrichtung wird im Stand der Technik normalerweise manuell durchgeführt. Dazu wird über die Düsenöffnung ein Klebestreifen geklebt und mit geringer Laserleistung ein kleines Loch in den Klebestreifen eingearbeitet. Die Abweichung der Strahllage von der Düsenmitte wird mit bloßem Auge und einer Lupe bestimmt. Zur Korrektur der Strahllage dienen entsprechende Positioniereinheiten mit Justierschrauben, mittels derer die Lage des Laserstrahls in einer rechtwinklig zur Düsenachse verlaufenden X-Y-Ebene der Düsenöffnung in X- und Y-Richtung verändert werden kann. Dieser Vorgang ist ungenau, zeitintensiv und aufgrund notwendiger manueller Eingriffe für einen automatisierten Prozessablauf ungeeignet.

Aus der US 5,574,225 und der JP 04295711 A sind eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Lagebestimmung eines gepulsten Laserstrahls mit Hilfe von zwei oder mehr akustischen Sensoren bekannt, die eine exakte Position relativ zu einem plattenförmigen optischen Element besitzen, das im Strahlengang angeordnet ist. Der gepulste Laserstrahl löst durch den photoakustischen Effekt eine akustische Welle im optischen Element aus, welche von den akustischen Sensoren detektiert wird. Der Phasenunterschied des zeitversetzt in die akustischen Sensoren einlaufenden Signals dient als Maß für den Versatz des Laserstrahls bezüglich der durch die Mitte des optischen Elements verlaufenden optischen Achse. Die in der US 5,574,225 und der JP 04295711 A beschriebenen Vorrichtungen erfordern für eine genaue Ausrichtung des Strahls eine sehr exakte Positionierung der akustischen Sensoren.

Zur Bestimmung der Fokuslage des Laserstrahls, d.h. der Position des Strahlfokus relativ zur Werkstückoberfläche sind verschiedene Verfahren bekannt. In der JP 63108985 A ist ein Verfahren unter Verwendung des photoakustischen Effekts beschrieben. Bei der Bewegung des Laserbearbeitungskopfes der Laserbearbeitungsmaschine entlang der Ausbreitungsrichtung des Strahls variiert der Strahldurchmesser auf einem Werkstück. Prinzipiell hat ein kleiner Strahldurchmesser auf dem Werkstück eine große Intensität des erzeugten akustischen Signals zur Folge und umgekehrt. Liegt der Fokuspunkt in der Ebene des Werkstücks, so ist der Durchmesser des Laserflecks auf der Materialoberfläche minimal und die Intensität des photoakustischen Signals ist maximal. Wird bei der Auswertung des akustischen Signals eine maximale Intensität detektiert, so befindet sich der Fokuspunkt in der Ebene des Werkstücks und die Fokuslage ist damit bestimmt.

#### Aufgabe der Erfindung

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, ein Verfahren und eine Laserbearbeitungsmaschine der eingangs genannten Art bereitzustellen, welche die Ermittlung eines Berührpunktes des Laserstrahls an einer bevorzugt an der Öffnung einer Laserbearbeitungsdüse oder eines Werkstücks gebildeten Kante und damit ein Ausrichten des Laserstrahls auf einfache und automatisierbare Weise erlauben.

#### Gegenstand der Erfindung

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß gelöst durch ein Verfahren umfassend die Schritte: a) Bewegen des Laserstrahls relativ zur Kante in zumindest einer Raumrichtung bevorzugt rechtwinklig zur Laserstrahlachse, bis der Laserstrahl die Kante überstreicht, b) Messen von beim Bewegen des Laserstrahls durch den Laserstrahl photoakustisch erzeugten akustischen Schwingungen, und c) Ermitteln des Berührpunktes des Laserstrahls an der Kante durch Auswerten der gemessenen akustischen Schwingungen. Die Ortskoordinaten des Berührpunktes können nachfolgend in einer Speichereinrichtung, welche z.B. in einer Steuerungseinheit gebildet ist, gespeichert werden.

Zur Ermittlung des Berührpunktes des Laserstrahls wird erfindungsgemäß der photo-

akustische Effekt genutzt. Der entlang einer im Wesentlichen der Richtung der Düsenachse entsprechenden Propagationsrichtung (Z-Richtung) durch die Düsenöffnung hindurchtretende, gepulste Laserstrahl wird in einer rechtwinklig dazu liegenden Ebene (X-Y-Ebene) innerhalb der Öffnung in dem Düsenkörper oder gegen eine Kante bzw. innerhalb einer Öffnung eines (Test)Werkstücks verschoben, bis er auf den in der Regel metallischen Düsenkörper oder das Werkstück trifft und dort eine akustische Welle erzeugt, die von einem akustischen Sensor, vorzugsweise einem Mikrofon, empfangen werden kann. Für das erfindungsgemäße Verfahren wird somit nur ein Sensor benötigt, dessen exakte Positionierung nicht ausschlaggebend ist. Durch das erfindungsgemäße Verfahren werden die Ortskoordinaten eines Berührpunktes des Laserstrahls an der Kante bestimmt. Bei Kenntnis der Ortskoordinaten des Startpunkts vor dem Bewegen des Laserstrahls wird außerdem die Wegstrecke des Laserstrahls bis zur Berührung der Kante und damit auch die Ausdehnung des Strahls in der X-Y-Ebene bestimmt.

Wird das erfindungsgemäße Verfahren nach einer Verstellung der Fokuslage des Laserstrahls in Richtung der Laserstrahlachse (Z-Richtung) erneut ausgeführt, so lässt sich durch mehrmaliges Wiederholen die Form des Laserstrahls in Z-Richtung (Strahlkaustik) bezogen auf die Kante und die Position des geringsten Strahl-durchmessers bestimmen. Auf diese Weise wird die Fokuslage des Laserstrahls relativ zur Öffnung der Laserbearbeitungsdüse oder zum Werkstück ermittelt.

Bei einer bevorzugten Variante des erfindungsgemäßen Verfahrens wird zum Ermitteln des Berührpunkts an der Kante die am Rand der Kante in einer Flanke ansteigende Schwingungsleistung in Abhängigkeit vom Ort vermessen und die Berührpunkt wird einem vorgegebenen Bruchteil, z.B. 50 %, einer maximalen Schwingungsleistung zugeordnet. Im Idealfall empfängt das Mikrofon kein Signal, solange der Laserstrahl berührungslos durch die Öffnung oder an der Kante vorbei geht. Erst wenn der Laserstrahl beginnt, den Rand der Öffnung und damit die Kante zu streifen, wird mit zunehmendem Berührungsanteil ein Anstieg der Signalintensität beobachtet, welcher als Flanke in einer Kennlinie, bei der die akustische Leistung in Abhängigkeit vom Ort aufgetragen wird, erkennbar ist.

Der Laserstrahl wird beim erfindungsgemäßen Verfahren vorzugsweise derart

bewegt, dass er die Öffnung in einer ersten Raumrichtung, beispielsweise der X-Richtung, vollständig überstreicht, d.h. dass er an zwei gegenüberliegenden Berührpunkten auf den Düsenkörper oder auf das Werkstück auftrifft, was durch einen Anstieg des akustischen Signals (Signalflanke) festgestellt werden kann. Der Laserstrahl wird hierbei bevorzugt entlang einer Linie in der ersten Raumrichtung bewegt. Alternativ ist es auch möglich, den Laserstrahl entlang einer Kreisbahn oder einer anderen Kurve relativ zur Öffnung zu bewegen, bis dieser an zwei gegenüberliegenden Punkten auf den Düsenkörper oder auf das Werkstück auftrifft. In diesem Fall ist die erste Raumrichtung, in der die Ist- oder Sollposition bestimmt wird, festgelegt als diejenige Linie, welche die zwei Berührpunkte miteinander verbindet.

Wie oben dargestellt, können anhand des gemessenen akustischen Signals die zwei Berührpunkte in der ersten Raumrichtung ermittelt werden. Aus der Kenntnis der Berührpunkte und der Bewegungsbahn bei der Bewegung des Laserstrahls relativ zur Öffnung kann eine Ist-Position des Laserstrahls relativ zur Öffnung bestimmt werden. Alternativ oder zusätzlich kann bei Kenntnis der Berührpunkte auch eine Sollposition des Laserstrahls bestimmt werden, welche in der Regel in der Mitte zwischen den beiden Berührpunkten liegt, da üblicherweise eine zentrische Ausrichtung des Laserstrahls in der Öffnung gewünscht ist. Es versteht sich, dass auf die oben beschriebene Weise die Ist- bzw. Sollposition nicht nur in X-Richtung, sondern auch in Y-Richtung bestimmt werden kann. Ist die Sollposition in zwei Richtungen bekannt, kann der Laserstrahl in die Mitte der Öffnung, vorzugsweise also in die Düsenmitte ausgerichtet werden.

Bei einer bevorzugten Variante wird der Laserstrahl nach dem Bestimmen der bevorzugt in der Mitte zwischen den zwei Berührpunkten liegenden Sollposition an die Sollposition bewegt. Bei der Bestimmung der Sollposition in zwei Richtungen kann hierdurch der Laserstrahl in der Düsenmitte positioniert werden. Vor der Bewegung in die Düsenmitte kann zunächst die jeweilige Sollposition in den beiden Raumrichtungen der X-Y-Ebene nach dem oben beschriebenen Verfahren bestimmt werden. Bevorzugt wird jedoch zunächst die Sollposition in der X-Richtung bestimmt und der Laserstrahl nachfolgend in der X-Richtung in der Öffnung zentriert. Erst danach wird die Sollposition in der Y-Richtung bestimmt und es erfolgt eine

Zentrierung des Laserstrahls in dieser Richtung. Dadurch wird sichergestellt, dass bei einer beispielsweise kreisförmigen Öffnung der gesamte Durchmesser der Öffnung in Y-Richtung für die Bestimmung des Sollwerts zur Verfügung steht, wodurch die Genauigkeit bei der Ermittlung der Berührpunkte und damit bei der Bestimmung des Sollwerts in Y-Richtung erhöht werden kann.

Insbesondere wenn der Laserstrahl vor der Bestimmung der Sollposition in X-Richtung nahe am Rand der Öffnung positioniert war, sodass zwei Berührpunkte ermittelt wurden, die einen geringen Abstand in X-Richtung zueinander aufweisen, kann zur Erhöhung der Genauigkeit die Bestimmung der Sollposition in X-Richtung nach dem Bewegen des Laserstrahls in die Sollposition in Y-Richtung wiederholt werden. Bei der nochmaligen Bestimmung der Sollposition in X-Richtung steht bei z.B. kreisförmigen Öffnungen ein größerer Abstand zwischen den beiden Berührpunkten zur Verfügung, was die Genauigkeit bei der Bestimmung der Sollposition erhöht. Es versteht sich, dass die zweite Richtung nicht notwendiger Weise rechtwinklig zur ersten Richtung verlaufen muss. Vielmehr können beide Richtungen auch beispielsweise einen Winkel von 120° oder 60° zueinander aufweisen und müssen nicht mit den Bewegungssachsen (X bzw. Y) der Laserbearbeitungsmaschine übereinstimmen.

Aus der Kenntnis der beiden Berührpunkte kann entweder der Durchmesser der Öffnung, vorzugsweise der Düsenöffnung, oder – bei bekanntem Öffnungs durchmesser – der Durchmesser des Laserstrahls in der ersten Raumrichtung aus dem jeweiligen Bewegungsweg des Laserstrahls von einem Startpunkt der Bewegung bis zu den gegenüberliegenden Berührpunkten bestimmt werden.

Bei einer vorteilhaften Variante wird aus dem Abstand zwischen den zwei Berühr punkten in der ersten Raumrichtung und dem Abstand zwischen zwei weiteren Berührpunkten in einer zweiten Raumrichtung ein Querschnittmaß der Öffnung bestimmt. Insbesondere bei kreisförmigen Düsenbohrungen kann auf diese Weise der Bohrungsdurchmesser bestimmt werden. Das erfindungsgemäße Verfahren dient so als Plausibilitätskontrolle nach einem Düsenwechsel, wobei Kalibriermessungen zur Korrelation der gemessenen Werte mit dem realen Durchmesser herangezogen werden.

Bei einer weiteren vorteilhaften Variante wird der Laserstrahl relativ zur ortsfesten Kante bewegt, wobei entweder der Laserbearbeitungskopf bewegt oder bevorzugt eine im Strahlengang angeordnete Fokussieroptik insbesondere automatisiert verkippt und/oder quer zum Laserstrahl verschoben und/oder mindestens ein im Strahlengang vor dem Düsenkörper angeordneter Umlenkspiegel insbesondere automatisiert verkippt oder in seinem Krümmungsradius verändert wird. Bei der Verschiebung quer zum Laserstrahl wird die Fokussieroptik in einer Ebene senkrecht zu ihrer optischen Achse bewegt. Alternativ oder zusätzlich kann die Bewegung des Laserstrahls durch Verkippen z.B. des letzten oder vorletzten Umlenkspiegels vor der Fokussieroptik erfolgen oder es kann bei ortsfest gehaltenem Laserstrahl der Düsenkörper verschoben werden. Zur Bewegung des Laserstrahlfokus entlang der Laserstrahlachse (in Z-Richtung) wird bevorzugt der Krümmungsradius eines vor der Fokussieroptik angeordneten Umlenkspiegels verändert.

Bei einer weiteren, besonders vorteilhaften Variante werden die Schwingungen mittels mindestens eines akustischen Sensors, bevorzugt eines Mikrofons, gemessen. Das Mikrofon wird so ausgerichtet, dass es möglichst nur photoakustisch generierte akustische Signale empfängt. Das Mikrofon empfängt entweder den Körperschall aus dem Düsenkörper oder dem Werkstück selbst oder das akustische Signal aus der Luft. Eine Messeinrichtung wandelt das vom Mikrofon ausgegebene Spannungssignal in ein digitales Signal um. Von dem digitalen Signal wird das Frequenzspektrum berechnet (Fourieranalyse) und als frequenzbezogene Leistung (FFT Leistung) dargestellt. Ein oder mehrere weitere akustische Sensoren können für Kontrollmessungen oder zur Verbesserung der Genauigkeit vorgesehen sein.

Bei einer bevorzugten Variante werden beim Auswerten der gemessenen Schwingungen deren Eigenschaften mit Kenngrößen des gepulsten Laserstrahls verglichen. Die Eigenschaften der gemessenen Schwingungen, insbesondere Frequenz und Phase, werden in diesem Fall mit der Pulsdauer, Pulsfrequenz und Phase des gepulsten Laserstrahls verglichen, um Fehlmessungen (z.B. Störgeräusche aus Antrieben) auszuschließen.

Bei einer weiteren bevorzugten Variante erfolgt das Bewegen und Messen unter

Schutzgas. Zum Schutz der Fokussieroptik und des Düsenkörpers kann hierbei eine Schutzgasströmung erzeugt werden, wobei als Schutzgas z.B. Stickstoff verwendet wird. Das Schutzgas erlaubt die Durchführung der Messung auch bei hohen Laserleistungen, insbesondere Arbeitsleistungen, sodass auch die Auswirkungen der thermischen Veränderungen von optischen Elementen im Strahlengang vor der Düse erfasst werden können und insbesondere Abweichungen der Strahllage von der optischen Achse erfasst werden können.

Bei einer besonders vorteilhaften Variante werden die gemessenen Schwingungen von einem im Strahlengang nach einem Düsenkörper angeordneten, bevorzugt plattenförmigen Körper (Werkstück) erzeugt. Wenn der Laserstrahl in der X-Y-Ebene der Düsenöffnung verschoben wird und auf den Rand der Düsenöffnung trifft, so steht weniger Laserleistung auf dem plattenförmigen Körper zur Verfügung. Dies führt zu einer Intensitätsminderung des in dem Körper erzeugten akustischen Signals. Es versteht sich, dass in diesem Fall das im Düsenkörper generierte photoakustische Signal abgeschirmt werden muss, um lediglich das aus dem plattenförmigen Körper resultierende Signal mit dem akustischen Sensor messen zu können.

Bei einer vorteilhaften Weiterbildung dieser Variante wird zum Bestimmen einer Fokuslage des Laserstrahls, d.h. des Abstands zwischen Fokuspunkt und Werkstückebene, der Abstand zwischen dem Fokuspunkt des Laserstrahls und dem plattenförmigen Körper entlang der Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls variiert, wie es aus der JP 63108985 A grundsätzlich bekannt ist. Bei der Bewegung des Körpers entlang der Ausbreitungsrichtung variiert der Fokusdurchmesser auf dem plattenförmigen Körper. Prinzipiell hat ein kleiner Fokusdurchmesser auf dem Körper eine große Intensität des erzeugten akustischen Signals zur Folge und umgekehrt. Liegt der Fokuspunkt in der Ebene des Körpers, so ist der Durchmesser des Laserflecks auf der Materialoberfläche minimal und die Intensität des photoakustischen Signals ist maximal. Wird bei der Auswertung des akustischen Signals eine maximale Intensität detektiert, so befindet sich der Fokuspunkt in der Ebene des plattenförmigen Körpers und die Fokuslage ist damit bestimmt. Die auf diese Weise bestimmte Fokuslage kann mit einer vorgegebenen Soll-Fokuslage verglichen werden, die in der Regel derart gewählt wird, dass der Fokuspunkt in der

Arbeitsebene bzw. Werkstückebene liegt. Weichen die vorgegebene Soll-Fokuslage und die anhand der Messung ermittelte Fokuslage voneinander ab, so kann die Fokuslage mittels der Messergebnisse korrigiert werden.

Zur Variation der Fokuslage und dadurch des Fokussdurchmessers auf dem Körper bestehen folgende Möglichkeiten: Eine Fokussieroptik für den Laserstrahl und/oder der plattenförmige Körper können in Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls verfahren werden. Alternativ oder zusätzlich wird der ganze Laserbearbeitungskopf in Z-Richtung verfahren, während der plattenförmige Körper ruht. Bevorzugt ist es jedoch, wenn ein adaptiver Umlenkspiegel im Strahlengang vor dem Düsenkörper verstellt wird. Ein solcher adaptiver Umlenkspiegel wird z.B. an seiner Rückseite von Wasser umspült. Durch den unterschiedlichen Wasserdruck werden der Krümmungsgrad des Spiegels und damit der Fokus verändert.

Bei einer weiteren vorteilhaften Weiterbildung wird das Material des plattenförmigen Körpers derart gewählt, dass dieses mehr Laserleistung absorbiert als das Material des Düsenkörpers. Wird für den plattenförmigen Körper ein Material, beispielsweise eine Keramik, verwendet, welches mehr Energie absorbiert als das in der Regel metallische Material des Düsenkörpers, wird das akustische Signal verstärkt und die Messung kann mit geringeren Laserleistungen durchgeführt werden, sodass der Düsenkörper mit geringer Leistung getroffen und dadurch geschont wird.

Das erfindungsgemäße Verfahren ermöglicht also sowohl eine Zentrierung des Laserstrahls in einer Laserbearbeitungsdüse als auch das Ermitteln und Einstellen der Fokuslage des Laserstrahls bezogen auf die Laserbearbeitungsdüse oder ein (Test)Werkstück. Das Verfahren erlaubt es, sowohl die Zentrierung als auch die Fokuslageneinstellung nur mit Hilfe der Laserbearbeitungsdüse als Messobjekt vorzunehmen, wenn das akustische Signal direkt am Rand der Düsenöffnung erzeugt wird. Auf diese Weise muss für die Messung nicht zwangsläufig ein gesonderter Körper in den Strahlengang eingeführt werden.

Die Erfindung ist auch realisiert in einer Laserbearbeitungsmaschine mit einer Laserbearbeitungsdüse an einem Laserbearbeitungskopf, durch deren Öffnung ein gepulster, fokussierter Laserstrahl hindurchtritt, wobei der Laserstrahl und die

Öffnung relativ zueinander in zumindest einer ersten Raumrichtung rechtwinklig zur Laserstrahlachse bewegbar sind, bis der Laserstrahl eine Kante eines Körpers überstreicht, die bevorzugt an einer Öffnung des Körpers gebildet ist, mindestens einem akustischen Sensor, bevorzugt einem Mikrofon, zur Messung von bei der Bewegung des Laserstrahls photoakustisch erzeugten akustischen Schwingungen, und einer Auswerteeinrichtung, welche ausgelegt ist, einen Berührpunkt des Laserstrahls an der Kante durch Auswerten der gemessenen Schwingungen zu ermitteln.

Bei einer bevorzugten Ausführungsform umfasst die Laserbearbeitungsmaschine weiterhin eine bevorzugt automatisierte Bewegungseinrichtung zur Verkippung und/oder Verschiebung einer im Strahlengang vor dem Düsenkörper angeordneten Fokussieroptik quer zum Laserstrahl. Die Verschiebung kann beispielsweise mittels Schrittmotoren geschehen, wodurch gleichzeitig eine Information über den Bewegungsweg bereitgestellt wird.

Bei einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform ist die Bewegungseinrichtung in einem Laserbearbeitungskopf oder an einer Justagestation der Laserbearbeitungsmaschine angebracht, in die der Laserbearbeitungskopf zur Bestimmung einer Ist- oder Sollposition des Laserstrahls in der Öffnung und/oder einer Fokuslage sowie zur Bewegung des Laserstrahls an die Sollposition und/oder zur Einstellung der Fokuslage verbracht werden kann. Die als Bewegungseinrichtung dienenden Schrittmotoren sind im ersten Fall direkt am Laserbearbeitungskopf an Stelle der üblichen Justierschrauben montiert, sodass eine automatisierte Ausrichtung des Laserstrahls relativ zum Düsenrand erreicht werden kann. Im letzteren Fall befinden sich die Schrittmotoren an Verstellspindeln gekoppelt in der Justagestation an einer Justageposition, in die der Laserbearbeitungskopf zur Einstellung der Strahllage verfahren werden kann.

Bei einer weiteren bevorzugten Ausführungsform weist die Laserbearbeitungsmaschine weiterhin einen bevorzugt plattenförmigen Körper auf, der im Strahlengang nach dem Düsenkörper angeordnet ist und der bevorzugt eine insbesondere an einer Öffnung des plattenförmigen Körpers gebildete Kante aufweist. Wie oben beschrieben kann das Material des Körpers so gewählt werden, dass es mehr Laserstrahlung als das Material des Düsenkörpers absorbiert, sodass die Messung

bei geringeren Strahlleistungen durchgeführt werden kann, wodurch der Düsenkörper geschont wird. Außerdem kann der Körper eine Öffnung oder Kante aufweisen, so dass die Fokuslage des Laserstrahls in Bezug auf diese Öffnung oder Kante eingestellt werden kann.

Bei einer vorteilhaften Ausführungsform weist die Laserbearbeitungsmaschine weiterhin eine Strahlfalle zum Schutz des akustischen Sensors vor Streulicht auf. Die Strahlfalle wird im geeigneten Abstand zum Rand der Öffnung unterhalb des Düsenkörpers im Strahlengang angeordnet und absorbiert den Laserstrahl, wodurch der akustische Sensor vor Zerstörung durch die Laserstrahlung geschützt wird.

Bei einer besonders bevorzugten Ausführungsform ist der akustische Sensor in einer Raumrichtung zur Laserstrahlachse versetzt außerhalb des Strahlengangs positioniert und unter einem Winkel zur Laserstrahlachse oder zum plattenförmigen Körper ausgerichtet. Auf diese Weise wird der Beitrag von Störgeräuschen, welche nicht durch den photoakustischen Effekt hervorgerufen werden, reduziert. Die Positionierung des akustischen Sensors dient aber nicht nur dem Ausblenden von Störgeräuschen durch gezielte Ausrichtung zur Düse oder zum plattenförmigen Körper hin, sondern hat auch einen entscheidenden Einfluss auf die gemessene Intensität. Unter bestimmten Positionen/Winkeln des optischen Sensors werden bei konstanter Laserleistung deutlich größere Maxima gemessen als unter anderen Positionen/Winkeln. Intensivere Maxima in der Kennlinie ermöglichen eine höhere Genauigkeit bei der Bestimmung der Berührpunkte, weil in diesem Fall die Flanken der Kennlinie steiler sind. Auch bei einer kreisförmigen Öffnung hat nicht nur der Winkel, sondern auch die Raumrichtung, in welcher der akustische Sensor versetzt zur Düsenachse positioniert ist, einen entscheidenden Einfluss auf die Intensitätsmaxima, da nicht rotationssymmetrisch zur Öffnung angeordnete Bauelemente in der Laserbearbeitungsmaschine die Messung beeinflussen können.

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 abschlie-

ßende Aufzählung zu verstehen, sondern haben vielmehr beispielhaften Charakter für die Schilderung der Erfindung.

Es zeigen:

Fig. 1 eine schematische Darstellung einer Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Laserbearbeitungsmaschine,

Fig. 2a,b schematische Darstellungen eines Schnitts durch einen Laserbearbeitungskopf der Laserbearbeitungsmaschine von Fig. 1,

Fig. 3a-c schematische Darstellungen der Bewegung eines Laserstrahls aus einer Ausgangsposition zu einer ersten Seite eines Rands einer Öffnung,

Fig. 4a-c schematische Darstellungen der Bewegung des Laserstrahls von Fig. 3a-c zu einer gegenüberliegenden Seite des Rands der Öffnung,

Fig. 5 eine schematische Darstellung einer Messkurve der akustischen Leistung, welche bei der Bewegung des Laserstrahls in Fig. 3a-c und Fig. 4a-c entsteht, und

Fig. 6 eine schematische Darstellung einer Öffnung einer Laserbearbeitungsdüse in einer Draufsicht mit Sollpositionen des Laserstrahls zwischen Berührpunkten der Öffnung.

Fig. 1 zeigt eine Laserbearbeitungsmaschine 1 mit einer eine Mehrzahl von optischen Elementen 2.1 bis 2.5 aufweisenden Optik zur Strahlführung für einen Laserstrahl 3 an einen Laserbearbeitungskopf 4 zur Bearbeitung eines (nicht gezeigten) Werkstücks. Zur Bewegung des Laserberarbeitungskopfs 4 entlang einer Arbeitsebene 5 definierenden Bearbeitungstisches in einer ersten Raumrichtung X eines XYZ-Koordinatensystems ist der Laserbearbeitungskopf 4 an einem in der ersten Raumrichtung X verfahrbaren Schlitten 6 befestigt, wie durch einen Doppelpfeil angedeutet ist. Der Laserbearbeitungskopf 4 kann weiterhin in einer zweiten Raumrichtung Y in der Arbeitsebene 5 verfahren werden, indem er entlang

des Schlittens 6 verschoben wird, wie ebenfalls durch einen Doppelpfeil angedeutet ist. Auf diese Weise kann der Laserbearbeitungskopf 4 in beiden Raumrichtungen X, Y über die gesamte Arbeitsebene 5 des Bearbeitungstisches verschoben und ein auf diesem positioniertes Werkstück bearbeitet werden. Weiterhin kann der Laserbearbeitungskopf 4 in eine Justageposition am Rand des Bearbeitungstisches 5 verbracht werden, wo eine Justagestation 7 vorgesehen ist, an welcher der Laserbearbeitungskopf 4 justiert werden kann, wie weiter unten näher beschrieben ist.

Der gepulste Laserstrahl 3 wird ausgehend von einer nicht gezeigten Laserquelle über einen ersten Spiegel 2.1 auf ein Ausgleichselement 8 geführt, das zwei weitere Spiegel 2.2 und 2.3 aufweist und das in der ersten Raumrichtung X verschiebbar ist, wie durch einen weiteren Doppelpfeil angedeutet. Durch die Verschiebung des Ausgleichselementes 8 kann der Strahlweg des Laserstrahls 3 in der Laserbearbeitungsmaschine 1 konstant gehalten werden. Nachdem der Laserstrahl 3 mittels zweier weiterer, in dem Schlitten 6 angeordneter Spiegel 2.4 und 2.5 aus der ersten Raumrichtung X in die zweite Raumrichtung Y umgelenkt wurde, tritt der Laserstrahl 3 in den Laserbearbeitungskopf 4 ein, wo er mit Hilfe eines ersten und zweiten Umlenkspiegels 9.1, 9.2 aus der zweiten Raumrichtung Y in eine dritte Raumrichtung Z umgelenkt wird. Der zweite Umlenkspiegel 9.2 ist hierbei als adaptiver Spiegel ausgeführt, d.h. er kann seine Form verändern, um den Laserstrahl 3 abschließend zu formen. Nach dem zweiten Umlenkspiegel 9.2 tritt der Laserstrahl 3 durch eine Fokussieroptik 10 zur Fokussierung des Laserstrahls 3 auf einen Fokuspunkt F in der Arbeitsebene 5 einer Laserbearbeitungsdüse 11, wie in Fig. 2a,b im Detail in einer Schnittdarstellung des Laserbearbeitungskopfes 4 gezeigt ist. Die Laserbearbeitungsdüse 11 weist einen metallischen Düsenkörper 12 auf, in dem eine Düsenbohrung 13 mit einer kreisförmigen Öffnung 14 vorgesehen ist, durch deren Zentrum in Fig. 2a,b die Laserstrahlachse 15 verläuft.

Um die Lage des Laserstrahls 3 relativ zur Öffnung 14 zu bestimmen, wird der Laserbearbeitungskopf 4 an die Justagestation 7 verbracht. In dieser ist, wie in Fig. 3a gezeigt, ein Mikrofon 16 als akustischer Sensor derart angeordnet, dass dieses nach dem Verfahren des Laserbearbeitungskopfs 4 in die Justageposition in der ersten Raumrichtung X versetzt zur Laserstrahlachse 15 außerhalb des Strahlengangs nach dem Düsenkörper 12 und unter einem Winkel  $\alpha$  von 30° zur

Laserstrahlachse 15 ausgerichtet ist. Zum Schutz des Mikrofons 16 von durch den Laserstrahl 3 hervorgerufenem Streulicht wird der Laserstrahl 3 von einer Strahlfalle 17 absorbiert. Weiterhin wird zum Schutz des Düsenkörpers 12 vor Beschädigung dieser von einem (nicht gezeigten) Schutzgasstrom aus Stickstoff geschützt.

Um den Laserstrahl 3 an einer Sollposition in der Düsenmitte zu positionieren, welche bei der kreisrunden Öffnung 14 mit der Lage der Laserstrahlachse 15 im Düsenzentrum zusammenfällt, ist es erforderlich, zunächst eine Sollposition in der ersten Raumrichtung X (im Folgenden kurz: X-Richtung) zu bestimmen. Zu diesem Zweck wird der Laserstrahl 3 aus der in Fig. 3a gezeigten Ausgangsposition entlang der positiven X-Richtung bewegt, indem die in Fig. 2 gezeigte Fokussieroptik 10 in X-Richtung verschoben wird. Bei der Bewegung berührt der Laserstrahl 3 zunächst den Rand der Öffnung 14, vgl. **Fig. 3b**, um danach weiter in X-Richtung verschoben zu werden, bis er vollständig auf den Düsenkörper 12 auftrifft, vgl. **Fig. 3c**. Nachfolgend wird der Laserstrahl 3 entlang der negativen X-Richtung zunächst in die Ausgangsposition zurück bewegt, welche in **Fig. 4a** gezeigt ist, um danach zunächst den Rand der Düsenöffnung 14 (**Fig. 4b**) zu berühren, bevor der Laserstrahl 3 vollständig auf den Düsenkörper 12 auftrifft (**Fig. 4c**). Bei der in Fign. 3a-c und Fign. 4a-c gezeigten Bewegung des Laserstrahls 3 überstreicht dieser die Düsenöffnung 12 somit vollständig in X-Richtung und trifft an zwei gegenüberliegenden Seiten auf eine Kante 20 der Öffnung 14.

Sobald bei der oben beschriebenen Bewegung der gepulste Laserstrahl 3 auf den metallischen Düsenkörper 12 (vgl. Fig. 3b,c und Fig. 4b,c) auftrifft, löst er dort eine photoakustische Welle aus. Der gepulste Laserstrahl 3 löst somit ein akustisches Signal mit einer Frequenz aus, welche seiner Pulsfrequenz entspricht. Bei entsprechend gewählter Pulsfrequenz befindet sich das akustische Signal im hörbaren Bereich und kann durch das Mikrofon 16 detektiert werden, wobei eine Erhöhung der Laserfrequenz aufgrund der Massenträgheit erwartungsgemäß zu einer Reduzierung der Signalintensität führt. Zwar wird der Gasdruck der Luft auch direkt durch die Erwärmung infolge der Lasereinstrahlung verändert. Diese Druckschwankungen sind aber in der Regel zu schwach bzw. die Umgebungsgeräusche zu stark, um mit herkömmlichen Mikrofonen gemessen zu werden.

Um aus der in Fign. 3a-c und Fign. 4a-c gezeigten Bewegung des Laserstrahls in X-Richtung die Berührpunkte der Öffnung 14 zu ermitteln, zwischen denen eine Sollposition bestimmt werden kann, werden die bei der Bewegung des Laserstrahls mit dem Mikrofon 16 gemessenen und von diesem in ein analoges Spannungssignal umgewandelten akustischen Schwingungen in einer Auswerteeinheit 18 der Laserbearbeitungsmaschine 1 (vgl. Fig. 1) in ein digitales Signal umgewandelt. Von dem digitalen Signal wird das Frequenzspektrum berechnet (Fourieranalyse) und als frequenzbezogene Leistung (Fast-Fourier-Transformation, FFT-Leistung) dargestellt. Frequenz und Phase des digitalen Signals werden hierbei mit der Pulsfrequenz und der Phase der Laserpulse des Laserstrahls 3 verglichen, um Fehlmessungen (z.B. Störgeräusche aus Antrieben) auszuschließen.

Eine bei der Auswertung erzeugte Messkurve 19, bei der die frequenzbezogene, d.h. bei der Pulsfrequenz gemessene Leistung **P** über dem Ort entlang der X-Richtung aufgetragen ist, ist in Fig. 5 gezeigt. Bei der Auswertung wird an einer Anzahl von Messpunkten die maximale Schallintensität des akustischen Signals gemessen und als frequenzbezogene Leistung dargestellt. Wie aus Fig. 5 zu erkennen, empfängt das Mikrofon 16 kein Signal, solange der Laserstrahl 3 berührungslos durch die Öffnung 12 hindurchtritt. Erst wenn der Laserstrahl 3 beginnt, die Kante 20 der Öffnung 14 zu streifen, wird mit zunehmendem Berührungsanteil ein Anstieg der Signalintensität beobachtet, welcher als Flanken **19a**, **19b** in der Messkurve 19 erkennbar ist. Der Steilheitsgrad der Flanken 19, 19b ist unter anderem von der Lage (Winkel, Entfernung) des Mikrofons 16 bezüglich der Öffnung 14 abhängig. Wenn der komplette Strahldurchmesser auf den Düsenkörper 12 trifft, reduziert sich bei weiterer Auslenkung die Signalintensität der Messkurve 19. Hierdurch bildet sich an jeder Flanke 19a, 19b ein definiertes Maximum **M1**, **M2** aus.

Im gezeigten Beispiel wurde die Fokussieroptik 10 in X-Richtung über den gesamten möglichen Verstellbereich von  $\pm 2$  mm verschoben, wodurch der Laserstrahl 3 in dieser Richtung bewegt wurde, wie in Fig. 5 durch sich überlappende Strahlquerschnitte dargestellt ist. Bei der in Fig. 5 gezeigten Messkurve 19 betrug die Laserleistung 1,5 kW und die Pulsfrequenz des Laserstrahls 3 lag bei 500 Hz. Jeweils im Abstand von 90  $\mu\text{m}$  wurden Messungen des akustischen Signals durchgeführt. Der Verlauf der Messkurve 19 zeigt hierbei einen Anstieg, sobald der

Laserstrahl 3 die Kante 20 der Öffnung 14 berührt, welcher ebenfalls in Fig. 5 dargestellt ist.

Zur Bestimmung der Berührpunkte wird an beiden Messflanken 19a, 19b ein Ort bestimmt, an dem die relative Intensität bezüglich des jeweiligen Maximums M1, M2 denselben Bruchteil aufweist, der im vorliegenden Fall bei 50 % liegt. Die so bestimmten Orte werden mit einem ersten und einem zweiten, in X-Richtung gegenüberliegenden Berührpunkt **B1**, **B2** der Öffnung 14 identifiziert, vgl. **Fig. 6a**. Eine Sollposition **S1** für die Zentrierung des Laserstrahls 3 in der Düsenmitte wird als Mittelpunkt dieser Berührpunkte B1, B2 in X-Richtung bestimmt. Alternativ oder zusätzlich kann bei Kenntnis der Berührpunkte B1, B2 und der Bewegungsbahn des Laserstrahls 3 auch die Ist-Position des Laserstrahls 3 relativ zur Öffnung 14 bestimmt werden.

Nach der Bestimmung der Sollposition S1 wird der Laserstrahl 3 an diese bewegt und der oben dargestellte Messprozess wird in der zweiten Raumrichtung Y (im Folgenden kurz: Y-Richtung) wiederholt. Hierbei werden ein dritter und ein vierter Berührpunkt **B3**, **B4** der Öffnung 14 ermittelt und eine zweite Sollposition **S2** am Mittelpunkt zwischen dem dritten und vierten Berührpunkt B3, B4 bestimmt, vgl. **Fig. 6b**. Nachdem der Laserstrahl 3 an die zweite Sollposition S2 bewegt wurde, ist dieser im Idealfall in der Mitte der Öffnung 14 positioniert. Allerdings ist im vorliegenden Fall der für die Bestimmung des ersten Sollwerts S1 zur Verfügung stehende Abstand zwischen dem ersten und zweiten Berührpunkt B1, B2 recht gering, sodass die Bestimmung des ersten Sollwerts gegebenenfalls nicht mit ausreichender Präzision erfolgt ist. Daher kann, wie in **Fig. 6c** dargestellt, die oben beschriebene Messung noch ein weiteres Mal in X-Richtung durchgeführt werden, wobei ein fünfter und sechster Berührpunkt **B5**, **B6** ermittelt werden. Durch den größeren Abstand zwischen dem fünften und sechsten Berührpunkt B5, B6 kann eine dritte Sollposition **S3** bestimmt werden, welche genauer als die erste Sollposition S1 in X-Richtung ist.

Nachdem der Laserstrahl 3 an die dritte Sollposition S3 bewegt wurde, ist dieser endgültig in der Mitte der Öffnung 12 zentriert. Zusätzlich kann aus den ermittelten Berührpunkten B1 bis B6 auch der Durchmesser der kreisförmigen Öffnung 12

bestimmt werden, wozu allerdings zusätzlich eine Kalibrierung erforderlich ist, bei der bestimmt wird, bei welchem Anteil der maximalen frequenzbezogenen Leistung der Durchmesser am genauesten bestimmt werden kann. Eine solche Bestimmung des Düsendurchmessers kann zur Plausibilitätskontrolle bei einem Wechsel der Laserbearbeitungsdüse 11 dienen.

Im Anschluss an die Zentrierung des Laserstrahls 3 in der Mitte der Laserbearbeitungsdüse 11 wird die Lage des Laserstrahl-Fokuspunkts relativ zur Laserbearbeitungsdüse bestimmt und eingestellt. Dazu wird ausgehend von einem Startpunkt **SP** in der X-Y-Ebene, dessen Koordinaten in der Steuerungseinheit gespeichert sind, wie oben beschrieben ein Berührpunkt (B1 bis B6) des Laserstrahls 3 an der Düsenöffnung ermittelt. Zu diesem Zweck wird der Laserstrahl 3, wie in Fig. 3a gezeigt, ausgehend vom Startpunkt SP entlang der positiven X- oder Y-Richtung bewegt, indem die in Fig. 2a,b gezeigte Fokussieroptik 10 in X- oder Y-Richtung verschoben wird. Bei der Bewegung berührt der Laserstrahl 3 zunächst die Kante 20 der Öffnung 14, vgl. **Fig. 3b**, um danach weiter in X-Richtung verschoben zu werden, bis er vollständig auf den Düsenkörper 12 auftrifft, vgl. **Fig. 3c**. Die Koordinaten des ermittelten Berührpunkts werden ebenfalls in der Steuerungseinheit gespeichert. Aus den gespeicherten Koordinaten lässt sich die Wegstrecke vom Startpunkt SP bis zum Auftreffen des Laserstrahls auf die Düsenöffnung und daraus die Ausdehnung des Laserstrahls in der X-Y-Ebene ermitteln. Wird die Messung ausgehend vom Startpunkt in die negative X- oder Y-Richtung wiederholt, so wird auf diese Weise bei bekanntem Durchmesser der Düsenöffnung der Durchmesser des Laserstrahls bestimmt. Anschließend wird der Fokuspunkt des Laserstrahls in Z-Richtung durch Ändern des Krümmungsradius des adaptiven Umlenkspiegels 9.2 verschoben und die Messung erneut durchgeführt. Bei mehrfacher Wiederholung lässt sich so die Form des Laserstrahls, d.h. die Strahlkaustik, in Bezug auf die Düsenöffnung bestimmen. Die Z-Einstellung, in der die geringste Ausdehnung bzw. der geringste Durchmesser des Strahls gemessen wird, zeigt dabei an, dass der Fokuspunkt des Laserstrahls genau in der X-Y-Ebene der Düsenöffnung liegt. Anschließend wird der Fokuspunkt definiert in eine Ebene unterhalb der Düsenöffnung, meistens genau in die Arbeitsebene 5, verschoben. Die Bestimmung der Fokuslage muss nicht mit Hilfe des Düsenkörpers durchgeführt werden, sondern kann in analoger Weise auch an einem (Test)Werkstück erfolgen, dass sich in der Arbeitsebene 5 befindet und eine

definierte Kante oder eine quadratische oder runde Öffnung aufweist, die vom Laserstrahl "angetastet" wird. Der Einsatz der Laserbearbeitungsdüse als Messobjekt bietet jedoch den Vorteil, dass kein zusätzliches Werkstück in den Strahlengang eingeführt werden muss.

Zur Bewegung des Laserstrahls 3 in der X-Y-Ebene wird die in Fig. 2 gezeigte Fokussieroptik 10 in X- und Y-Richtung verschoben. Diese Bewegung erfolgt mittels (nicht gezeigter, durch einen Doppelpfeil **B** angedeuteter) Schrittmotoren, wodurch gleichzeitig eine Information über den Bewegungsweg bereitgestellt wird. Die Schrittmotoren befinden sich an Verstellspindeln gekoppelt in der Justagestation 7 von Fig.1, in welche der Laserbearbeitungskopf 4 zur Einstellung der Strahllage fahren muss. Alternativ oder zusätzlich kann die Auslenkung des Laserstrahls durch Verkipfung des letzten oder vorletzten Umlenkspiegels 9.1, 9.2 vor der Fokussieroptik 10 erfolgen.

Alternativ zur Anordnung eines akustischen Sensors im Strahlengang nach dem Düsenkörper 12 kann dieser auch direkt am Düsenkörper 12 selbst angebracht sein, um dessen Körperschall zu empfangen. In diesem Fall ist es günstig, die Schrittmotoren zur Bewegung der Fokussieroptik 10 direkt am Laserbearbeitungskopf 4, und zwar an Stelle der üblichen Justierschrauben anzubringen. Hierbei kann auf das Vorsehen einer Justagestation verzichtet werden, d.h. die Justage kann prinzipiell an jedem Ort in der Arbeitsebene 5 vorgenommen werden, da bis auf die Auswerteeinrichtung 18 alle hierzu notwendigen Bauelemente im Laserbearbeitungskopf 4 angebracht sind.

Weiterhin können alternativ zum oben beschriebenen Vorgehen die Messungen auch vorgenommen werden, indem an Stelle der vom Düsenkörper 12 erzeugten akustischen Schwingungen die von einem in Fig. 2a gezeigten, plattenförmigen Körper 21 ausgesandten akustischen Schwingungen gemessen werden, auf den der Laserstrahl 3 unterhalb des Düsenkörpers 12 auftrifft. In diesem Fall ist ein Piezo-Sensor **16'** vorgesehen, der an der vom Düsenkörper 12 abgewandten Seite des Körpers 21 angeordnet ist, sodass der Körper 21 die vom Düsenkörper 12 ausgesandten akustischen Schwingungen abschirmt.

Beim Bewegen des Laserstrahls 3 in der X-Y-Ebene der Düsenöffnung 14 steht, sobald dieser auf die Kante 20 der Öffnung 14 auftrifft, weniger Laserleistung auf dem plattenförmigen Körper 21 zur Verfügung, was zu einer Intensitätsminderung des in dem plattenförmigen Körper 21 durch den Laserstrahl 3 erzeugten akustischen Signals führt. Zur Bestimmung der Düsenmitte wird der Laserstrahl 3 so lange nach außen verschoben, bis er beispielsweise zur Hälfte durch den Düsenkörper 12 abgeschirmt ist und somit die Intensität des von dem plattenförmigen Körper 21 ausgehenden Signals ebenfalls auf 50% des Maximalwertes abgesunken ist. Bei dieser Methode können für den plattenförmigen Körper 21 solche Materialien, beispielsweise Keramik, verwendet werden, die mehr Energie absorbieren als das in der Regel metallische Material des Düsenkörpers 12. Auf diese Weise kann die Messung mit geringeren Laserleistungen durchgeführt werden, um den Düsenkörper 12 zu schonen.

Bei Verwendung des plattenförmigen Körpers 21 kann ebenfalls zusätzlich die Fokuslage **FL** des Laserstrahls 3 überprüft werden. In der Regel wird der Fokuspunkt **F** des Laserstrahls 3 mittels der Fokussieroptik 10 und des adaptiven Umlenkspiegels 9.2 derart eingestellt, dass dieser an der Soll-Fokuslage **FL** in der Arbeitsebene 5 liegt. Allerdings heizen sich im Betrieb der Laserbearbeitungsmaschine 1 die im Strahlengang des Laserstrahls 3 angeordneten optischen Elemente auf, wodurch sich der Fokuspunkt **F** aus der Soll-Fokuslage **FL** entfernen kann. Um zu überprüfen, ob die Fokuslage noch korrekt ist, wird der Fokuspunkt **F** entlang der dritten Raumrichtung **Z** (im Folgenden: **Z**-Richtung) verschoben, z.B. indem der adaptive Umlenkspiegel 9.2 verstellt wird. Prinzipiell hat ein kleiner Fokusdurchmesser auf dem plattenförmigen Körper 21 eine große Intensität des erzeugten akustischen Signals zur Folge und umgekehrt. Bei der Variation des Fokuspunkts **F** wird der Fokusdurchmesser auf dem plattenförmigen Körper 21 variiert. Liegt der Fokuspunkt **F** in der Ebene des plattenförmigen Körpers 21, so ist der Durchmesser des Laserflecks auf dem Körper 21 minimal und die Intensität des photoakustischen Signals ist maximal. Wird das Maximum an einem anderen Ort als an der Soll-Fokuslage **FL** entlang der **Z**-Richtung detektiert, muss der Fokuspunkt **F** entlang der **Z**-Richtung verschoben werden, was z.B. durch geeignete Verstellung des adaptiven Spiegels 9.2 erfolgen kann.

Alternativ kann bei der Bestimmung der Düsenmitte und der Fokuslage, wie in Fig. 2b gezeigt, der plattenförmige Körper 21 einen Bereich durchgehenden Materials, der größer ist als die Düsenöffnung 13, und eine gleichmäßige Kante 22, welche an einer quadratischen oder runden Öffnung 23 in dem plattenförmigen Körper 21 gebildet ist, aufweisen. In diesem Fall kann die Fokuslage FL des Laserstrahls 3 auch wie oben beschrieben durch "Antasten" der Kante 22 der Öffnung 23 des plattenförmigen Körpers 21 bei verschiedenen Fokuseinstellungen bestimmt werden. Dieses Verfahren ermöglicht es außerdem, nicht nur die Lage des Fokuspunkts, sondern auch die Form des Laserstrahls im Bereich des Fokuspunkts (Strahlkaustik) zu bestimmen.

Auf die oben dargestellte Weise kann die Strahllage des Laserstrahls 3 innerhalb der Öffnung 14, 23 bestimmt und der Laserstrahl 3 in dieser zentriert werden, wobei beides automatisiert erfolgen kann. Zusätzlich kann die Fokuslage überprüft und ggf. korrigiert werden. Es versteht sich, dass das oben beschriebene Verfahren nicht auf den Einsatz in Laserbearbeitungsmaschinen beschränkt ist, sondern auch in anderen Gerätschaften, bei denen die Position eines Laserstrahls in einer beliebigen Öffnung bestimmt und eingestellt, insbesondere zentriert, werden soll, vorteilhaft angewendet werden kann.

### Patentansprüche

1. Verfahren zum Ermitteln eines Berührpunktes (B1 bis B6) eines fokussierten, gepulsten Laserstrahls (3) an einer Kante (20, 22) eines Körpers (12, 21), die bevorzugt an einer Öffnung (14, 23) des Körpers (12, 21) gebildet ist, umfassend die Schritte:
  - a) Bewegen des Laserstrahls (3) relativ zur Kante (20, 22) in zumindest einer Raumrichtung (X, Y) bevorzugt rechtwinklig zur Laserstrahlachse (15), bis der Laserstrahl (3) die Kante (20, 22) überstreicht,
  - b) Messen von beim Bewegen des Laserstrahls (3) durch den Laserstrahl (3) photoakustisch erzeugten akustischen Schwingungen, und
  - c) Ermitteln des Berührpunktes (B1 bis B6) des Laserstrahls (3) an der Kante (20, 22) durch Auswerten der gemessenen akustischen Schwingungen.
2. Verfahren nach Anspruch 1, weiter umfassend den Schritt:  
Verstellen der Lage des Fokuspunkts (F) des Laserstrahls (3) in Richtung der Laserstrahlachse (15) und Wiederholen der Schritte a) bis c).
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, bei dem zum Ermitteln des Berührpunktes (B1 bis B6) an der Kante (20, 22) die an der Kante (20, 22) in einer Flanke (19a, 19b) ansteigende Schwingungsleistung in Abhängigkeit vom Ort vermessen und der Berührpunkt (B1 bis B6) einem vorgegebenen Bruchteil, z.B. 50 %, einer maximalen Schwingungsleistung (M1, M2) zugeordnet wird.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem der Laserstrahl (3) die Öffnung (14, 23) in einer ersten Raumrichtung (X) vollständig überstreicht, wobei zwei gegenüberliegende Berührpunkte (B1, B2; B5, B6) an der Kante (20, 22) der Öffnung (14, 23) ermittelt werden, und eine Ist- oder Sollposition (S1, S3) des Laserstrahls (3) in der Öffnung (14, 23) anhand der zwei ermittelten Berührpunkte (B1, B2; B5, B6) bestimmt wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4, bei dem der Laserstrahl (3) nach dem Bestimmen der bevorzugt in der Mitte zwischen den zwei Berührpunkten (B1, B2; B5, B6) liegenden Sollposition (S1; S3) an die Sollposition (S1; S3) bewegt wird.
6. Verfahren nach Anspruch 4 oder 5, bei dem aus dem Abstand zwischen den zwei Berührpunkten (B1, B2; B5, B6) in der ersten Raumrichtung (X) und dem Abstand zwischen zwei weiteren Berührpunkten (B3, B4) in einer zweiten Raumrichtung (Y) ein Querschnittmaß der Öffnung (14, 23) bestimmt wird.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 bis 6, bei dem aus dem jeweiligen Bewegungsweg des Laserstrahls (3) von einem Startpunkt (SP) der Bewegung bis zu den zwei gegenüberliegenden Berührpunkten (B1, B2) der Durchmesser des Laserstrahls (3) bestimmt wird.
8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Kante (20, 22) an einer Öffnung (14, 23) in einem Düsenkörper (12) einer Laserbearbeitungsdüse (11) ausgebildet wird.
9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem der Laserstrahl (3) relativ zur ortsfesten Kante (20, 22) bewegt wird, indem eine im Strahlengang vor der Kante (20, 22) angeordnete Fokussieroptik (10) insbesondere automatisiert verkippt und/oder quer zur Laserstrahlachse (15) verschoben und/oder mindestens ein im Strahlengang vor der Kante (20, 22) angeordneter Umlenkspiegel (9.1, 9.2) insbesondere automatisiert verkippt oder in seinem Krümmungsradius verändert wird.
10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Schwingungen mittels mindestens eines akustischen Sensors (16, 16'), bevorzugt eines Mikrofons (16), gemessen werden.
11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem beim Auswerten der gemessenen Schwingungen deren Eigenschaften mit Kenngrößen des gepulsten Laserstrahls (3) verglichen werden.

12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das Bewegen und Messen unter Schutzgas erfolgt.
13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die gemessenen Schwingungen von einem im Strahlengang nach einem Düsenkörper (12) angeordneten, bevorzugt plattenförmigen Körper (21) erzeugt werden.
14. Verfahren nach Anspruch 13, bei dem zum Bestimmen einer Fokuslage (FL) des Laserstrahls (3) der Abstand zwischen dem Fokuspunkt (F) des Laserstrahls (3) und dem plattenförmigen Körper (21) entlang der Laserstrahlachse (15) des Laserstrahls (3) variiert wird.
15. Verfahren nach einem der Ansprüche 13 oder 14, bei dem das Material des plattenförmigen Körpers (21) derart gewählt wird, dass dieses mehr Laserleistung absorbiert als das Material des Düsenkörpers (12).
16. Laserbearbeitungsmaschine (1) mit:
  - einer Laserbearbeitungsdüse (11) an einem Laserbearbeitungskopf (4), durch deren Öffnung (14) ein gepulster, fokussierter Laserstrahl (3) hindurchtritt, wobei der Laserstrahl (3) und die Öffnung (14) relativ zueinander in zumindest einer ersten Raumrichtung (X, Y) rechtwinklig zur Laserstrahlachse (15) bewegbar sind, bis der Laserstrahl (3) eine Kante (20, 22) eines Körpers (12, 21) überstreicht, die bevorzugt an einer Öffnung (14, 23) des Körpers (12, 21) gebildet ist, mindestens einem akustischen Sensor (16, 16'), bevorzugt einem Mikrofon (16), zur Messung von bei der Bewegung des Laserstrahls (3) photoakustisch erzeugten akustischen Schwingungen, und
  - einer Auswerteeinrichtung (18), welche ausgelegt ist, einen Berührpunkt (B1, B2; B5, B6) des Laserstrahls (3) an der Kante (20, 22) durch Auswerten der gemessenen Schwingungen zu ermitteln.
17. Laserbearbeitungsmaschine nach Anspruch 16, weiter umfassend eine bevorzugt automatisierte Bewegungseinrichtung (B) zur Verkipfung und/oder Verschiebung einer im Strahlengang vor dem Düsenkörper (12) angeordneten Fokussieroptik

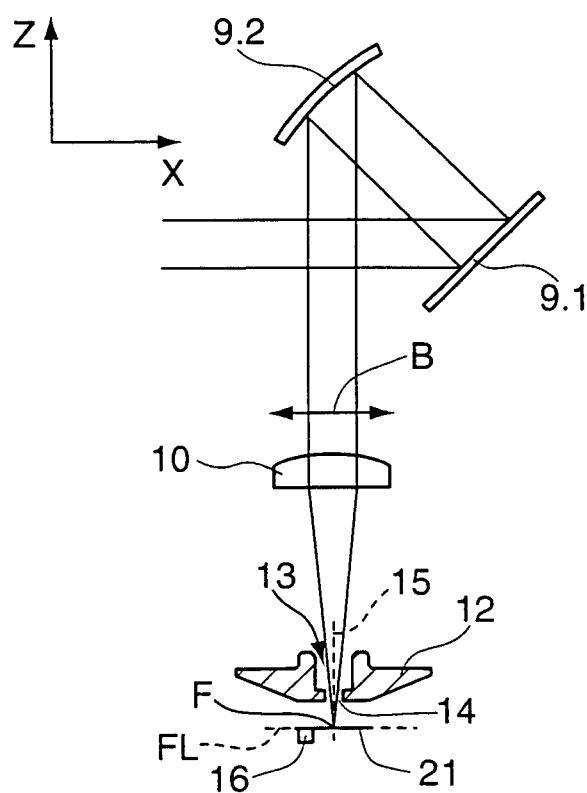
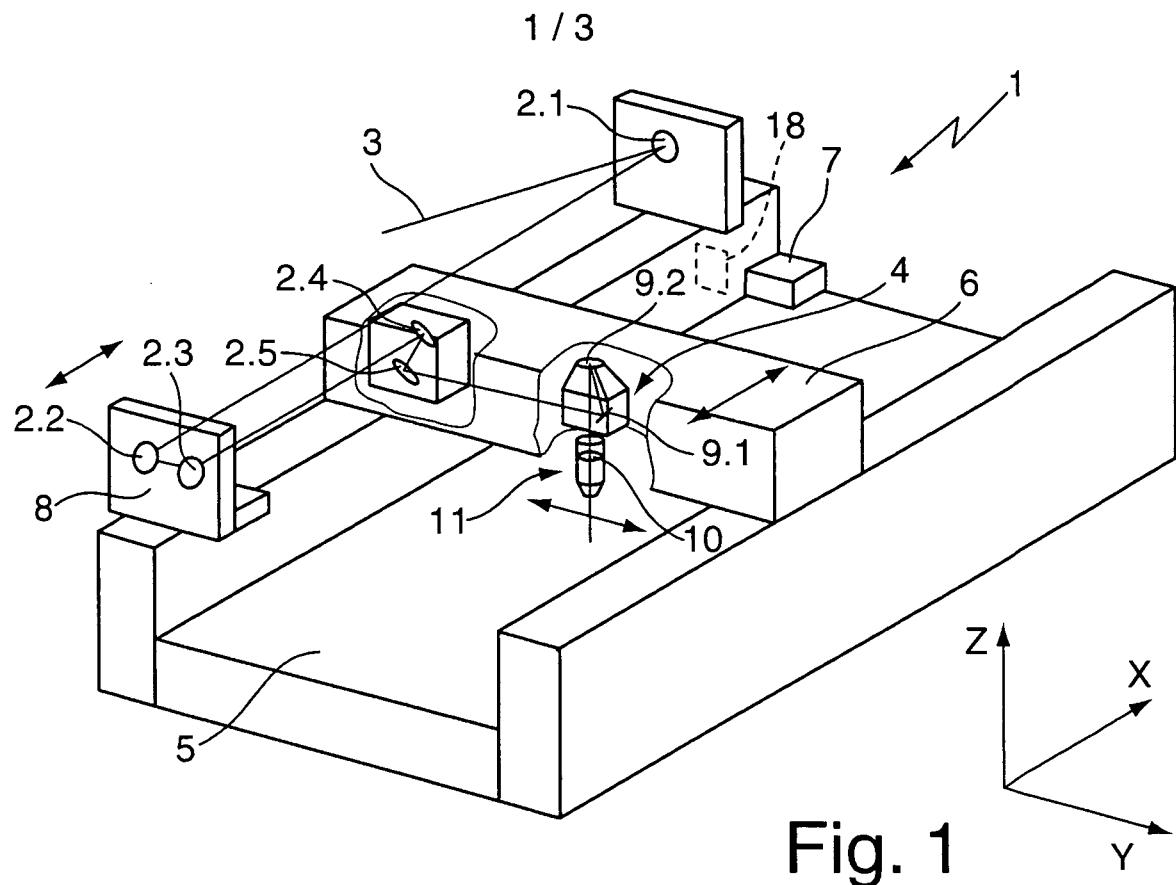
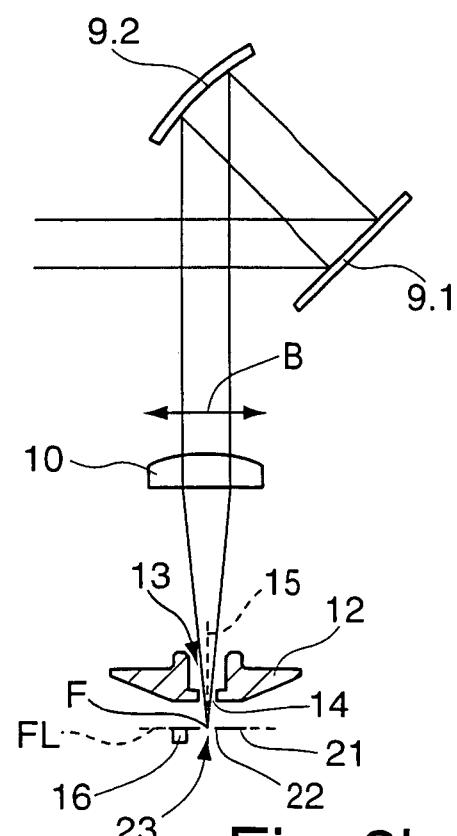
(10) quer zum Laserstrahl (3).

18. Laserbearbeitungsmaschine nach Anspruch 17, bei der die Bewegungseinrichtung (B) in einem Laserbearbeitungskopf (4) oder an einer Justagestation (7) der Laserbearbeitungsmaschine (1) angebracht ist, in die der Laserbearbeitungskopf (4) zur Bestimmung einer Ist- oder Sollposition (S1 bis S3) des Laserstrahls (3) in der Öffnung (14, 23) und/oder einer Soll-Fokusposition (FL) und zur Bewegung des Laserstrahls (3) an die Sollposition (S1 bis S3) und/oder die Soll-Fokusposition (FL) verbracht werden kann.

19. Laserbearbeitungsmaschine nach einem der Ansprüche 16 bis 18, weiter umfassend einen bevorzugt plattenförmigen Körper (21), der im Strahlengang nach dem Düsenkörper (12) angeordnet ist und der bevorzugt eine insbesondere an einer Öffnung (23) des plattenförmigen Körpers (21) gebildete Kante (22) aufweist.

20. Laserbearbeitungsmaschine nach einem der Ansprüche 16 bis 19, weiter umfassend eine Strahlfalle (17) zum Schutz des akustischen Sensors (16) vor Streulicht.

21. Laserbearbeitungsmaschine nach einem der Ansprüche 16 bis 20, bei welcher der akustische Sensor (16) am Düsenkörper (12) angebracht oder in einer Raumrichtung (X) zur Laserstrahlachse (15) versetzt außerhalb des Strahlengangs positioniert und unter einem Winkel ( $\alpha$ ) zur Laserstrahlachse (15) ausgerichtet ist.

**Fig. 2a****Fig. 2b**

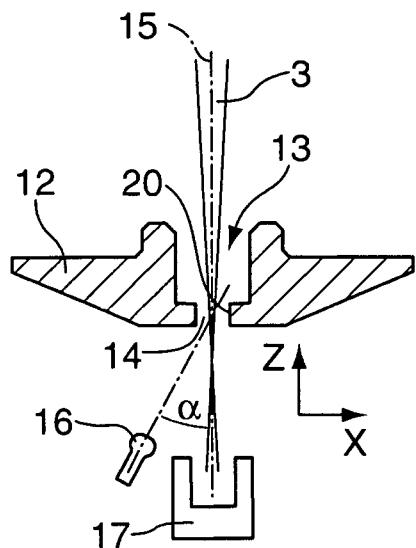


Fig. 3a

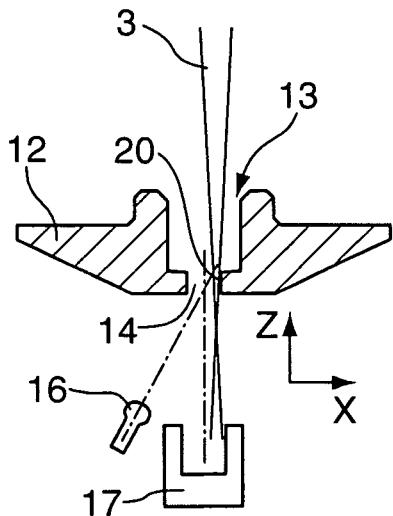


Fig. 3b

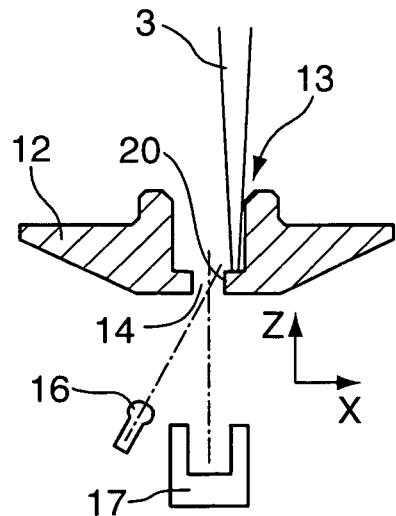


Fig. 3c

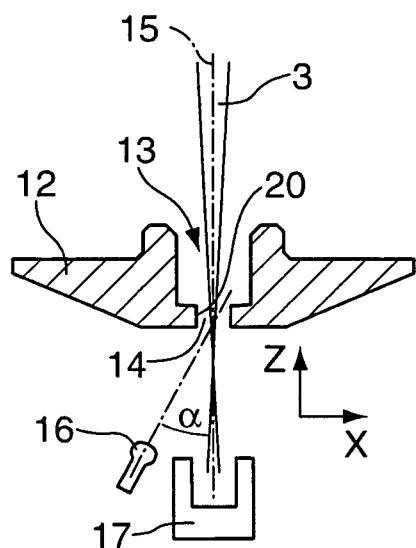


Fig. 4a

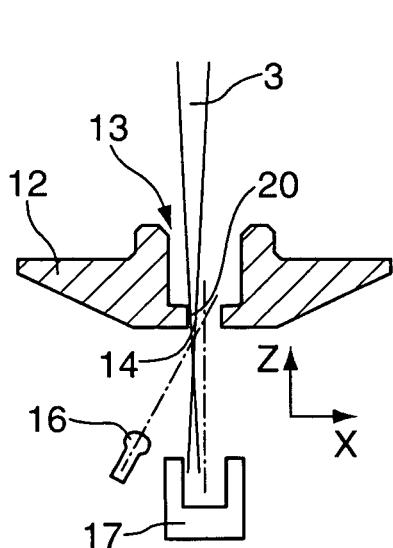


Fig. 4b

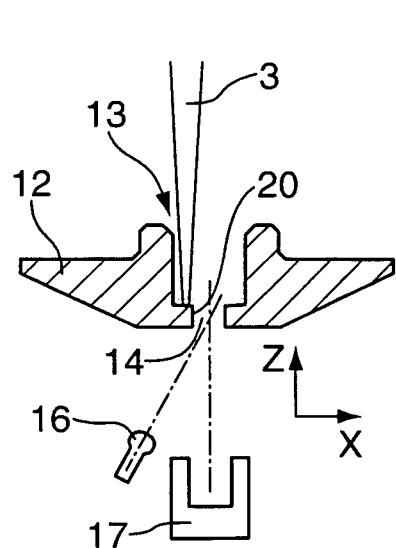


Fig. 4c

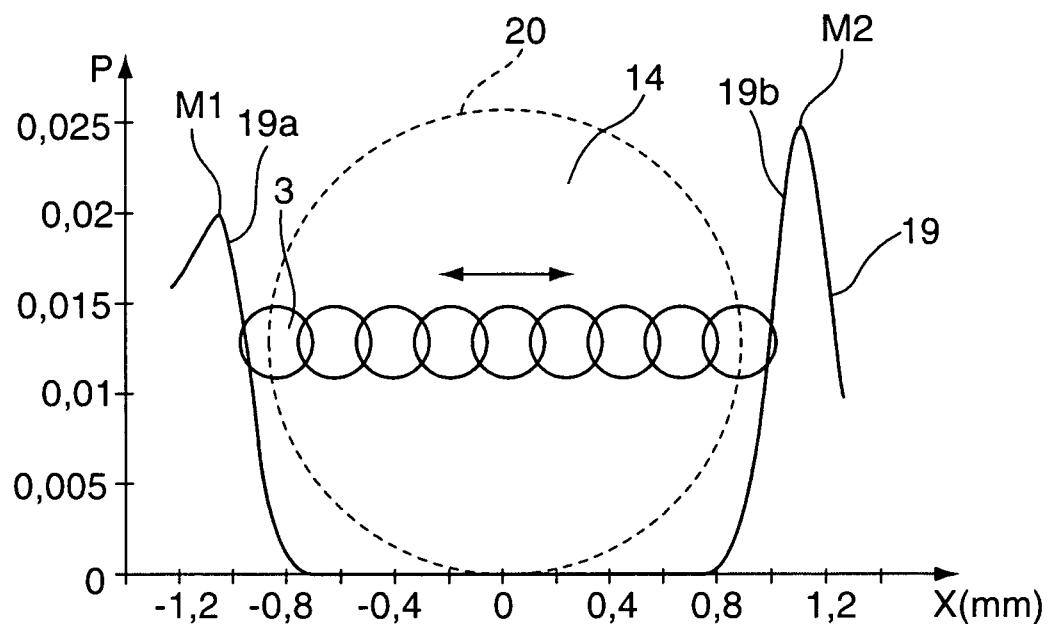


Fig. 5

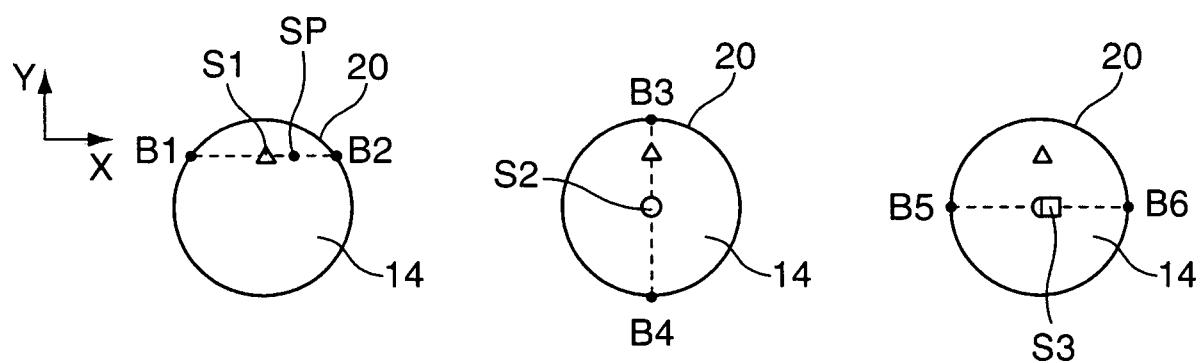


Fig. 6a

Fig. 6b

Fig. 6c

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No  
PCT/EP2008/003297

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER  
INV. B23K26/04

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 G01B

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 practical, search terms used)

EPO-Internal

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages   | Relevant to claim No: |
|-----------|--|-----------------------|
| A         | JP 63 108985 A (MITSUBISHI ELECTRIC CORP)<br>13 May 1988 (1988-05-13)<br>cited in the application<br>abstract; figures 1,2<br>-----    | 1-21                  |
| A         | US 5 574 225 A (MODERN PETER J [GB] ET AL)<br>12 November 1996 (1996-11-12)<br>cited in the application<br>the whole document<br>----- | 1-21                  |
| A         | JP 04 295711 A (RIKAGAKU KENKYUSHO)<br>20 October 1992 (1992-10-20)<br>cited in the application<br>abstract; figures 1,2<br>-----      | 1-21                  |

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 document 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

20 August 2008

Date of mailing of the international search report

01/09/2008

Name and mailing address of the ISA/  
European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Piekarski, Adam

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2008/003297

| Patent document cited in search report | Publication date | Patent family member(s) |  | Publication date |
|--|------------------|-------------------------|--|------------------|
| JP 63108985                            | A 13-05-1988     | NONE                    |  |                  |
| US 5574225                             | A 12-11-1996     | NONE                    |  |                  |
| JP 4295711                             | A 20-10-1992     | JP 2587732 B2           |  | 05-03-1997       |

# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen  
PCT/EP2008/003297

**A. KLASIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES**  
INV. B23K26/04

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

**B. RECHERCHIERTE GEBIETE**

Recherchierte Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)  
**B23K G01B**

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**

**C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN**

| Kategorie* | Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile                                     | Betr. Anspruch Nr. |
|------------|--|--------------------|
| A          | JP 63 108985 A (MITSUBISHI ELECTRIC CORP)<br>13. Mai 1988 (1988-05-13)<br>in der Anmeldung erwähnt<br>Zusammenfassung; Abbildungen 1,2 | 1-21               |
| A          | US 5 574 225 A (MODERN PETER J [GB] ET AL)<br>12. November 1996 (1996-11-12)<br>in der Anmeldung erwähnt<br>das ganze Dokument         | 1-21               |
| A          | JP 04 295711 A (RIKAGAKU KENKYUSHO)<br>20. Oktober 1992 (1992-10-20)<br>in der Anmeldung erwähnt<br>Zusammenfassung; Abbildungen 1,2   | 1-21               |

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" älteres Dokument, 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 erforderlicher Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erforderlicher Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

20. August 2008

01/09/2008

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde  
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Piekarski, Adam

**INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT**

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2008/003297

| Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument | Datum der Veröffentlichung | Mitglied(er) der Patentfamilie | Datum der Veröffentlichung |
|---|----------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| JP 63108985                                     | A 13-05-1988               | KEINE                          |                            |
| US 5574225                                      | A 12-11-1996               | KEINE                          |                            |
| JP 4295711                                      | A 20-10-1992               | JP 2587732 B2                  | 05-03-1997                 |