



(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2016 122 060.4**
(22) Anmelddatum: **16.11.2016**
(43) Offenlegungstag: –
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **29.03.2018**

(51) Int Cl.: **B23K 26/21 (2014.01)**
B23B 51/00 (2006.01)
B23P 15/32 (2006.01)

Innerhalb von neun 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:

CSM Maschinen GmbH, 86899 Landsberg, DE;
Roschiwal + Partner Ingenieur GmbH Augsburg,
86179 Augsburg, DE

(74) Vertreter:

von Bülow & Tamada Patentanwaltsgesellschaft,
81547 München, DE

(72) Erfinder:

Schuster, Helmut, 86899 Landsberg, DE; Merk,
Robert, 86179 Augsburg, DE; Petzuch, Andreas,
86179 Augsburg, DE; Hörmann, Florian, Prof. Dr.,
86161 Augsburg, DE

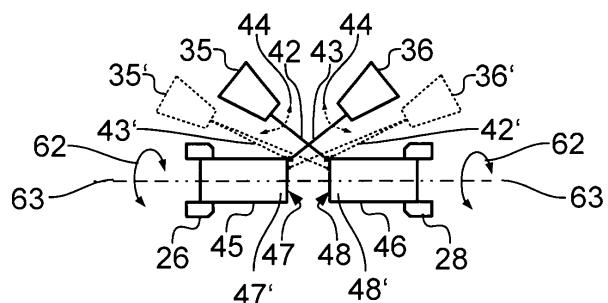
(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	10 2005 024 983	A1
DE	10 2008 014 934	A1
DE	10 2008 042 663	A1
DE	10 2011 004 104	A1

(54) Bezeichnung: **Laserpressschweißen**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Verbinden eines ersten metallischen Rohteils (45) mit einem eine erste Verbindungsfläche (47) aufweisenden ersten Verbindungsabschnitt (47') und eines zweiten metallischen Rohteils (46) mit einem eine zweite Verbindungsfläche (48) aufweisenden zweiten Verbindungsabschnitt (48'), umfassend:

- Erwärmen der ersten Verbindungsfläche (47) auf eine Temperatur zwischen der Rekristallisierungstemperatur und der Schmelztemperatur des ersten Rohteils (45) durch Laserbestrahlung des ersten Verbindungsabschnitts (47') des ersten Rohteils (45),
- Erwärmen der zweiten Verbindungsfläche (48) auf eine Temperatur zwischen der Rekristallisierungstemperatur und der Schmelztemperatur des zweiten Rohteils (46) durch Laserbestrahlung des zweiten Verbindungsabschnitts (48'), und
- Anpressen der ersten Verbindungsfläche (47) des ersten Rohteils (45) an die zweite Verbindungsfläche (48) des zweiten Rohteils (46), bis sich die Rohteile (45, 46) an den Verbindungsflächen (47, 48) auf eine Temperatur unterhalb der Rekristallisationstemperatur abgekühlt haben.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Verbinden eines ersten metallischen Rohteils mit einer ersten Verbindungsfläche und eines zweiten metallischen Rohteils mit einer zweiten Verbindungsfläche und ein mit dem Verfahren hergestelltes Werkstück.

[0002] Aus der DE 10 2008 014 934 A1 ist ein Verfahren zum Verbinden eines ersten metallischen Rohteils mit einer ersten Verbindungsfläche und eines zweiten metallischen Rohteils mit einer zweiten Verbindungsfläche bekannt, in dem die beiden Verbindungsflächen auf eine Temperatur zwischen der Rekristallisierungstemperatur und der Schmelztemperatur der beiden Rohteile mittels eines Magnetfeldes erwärmt und dann aneinander angedrückt werden, bis sich die Rohteile an den Verbindungsflächen auf eine Temperatur unterhalb der Rekristallisationstemperatur abgekühlt haben.

[0003] Die DE 10 2005 024 983 A1 und DE 10 2008 042 663 A1 offenbaren ein Verfahren zum Verbinden eines ersten Kunststoffteils mit einem eine erste Verbindungsfläche aufweisenden ersten Verbindungsabschnitt und eines zweiten Kunststoffteils mit einem eine zweite Verbindungsfläche aufweisenden zweiten Verbindungsabschnitt, bei dem die erste Verbindungsfläche auf eine Schmelztemperatur des ersten Kunststoffteils durch Laserbestrahlen des ersten Verbindungsabschnittes und die zweite Verbindungsfläche auf eine Schmelztemperatur des zweiten Verbindungsabschnitts erwärmt wird. Danach wird die erste Verbindungsfläche des ersten Kunststoffteils an die zweite Verbindungsfläche des zweiten Kunststoffteils angepresst, bis sich die Kunststoffteile auf eine Temperatur unterhalb der Schmelztemperatur abgekühlt haben.

[0004] Die DE 10 2011 004 104 A1 offenbart ein Verfahren zum Verbinden eines ersten metallischen Rohteils mit einem eine erste Verbindungsfläche aufweisenden ersten Verbindungsabschnitt und eines zweiten metallischen Rohteils mit einem eine zweite Verbindungsfläche aufweisenden zweiten Verbindungsabschnitt, wobei das erste Rohteil aus einem Material besteht, das gegenüber dem zweiten Rohteil einen niedrigeren Schmelzpunkt aufweist. Die erste Verbindungsfläche wird dann durch Bestrahlen mittels eines Laserstrahls auf eine Schmelztemperatur erwärmt. Danach werden die erste Verbindungsfläche des ersten Rohteils an die zweite Verbindungsfläche des zweiten Rohteils angepresst, bis das geschmolzene Material des ersten Rohteils erstarrt ist.

[0005] Es ist Aufgabe der Erfindung, das bekannte Verfahren zu verbessern.

[0006] Gemäß einem Aspekt der Erfindung umfasst ein Verfahren zum Verbinden eines ersten metallischen Rohteils mit einem eine erste Verbindungsfläche aufweisenden ersten Verbindungsabschnitt und eines zweiten metallischen Rohteils mit einem eine zweite Verbindungsfläche aufweisenden zweiten Verbindungsabschnitt, die Schritte:

- Erwärmen der ersten Verbindungsfläche auf eine Temperatur zwischen der Rekristallisierungs temperatur und der Schmelztemperatur des ersten Rohteils durch Laserbestrahlen des ersten Verbindungsabschnitts des ersten Rohteils,
- Erwärmen der zweiten Verbindungsfläche auf eine Temperatur zwischen der Rekristallisierungs temperatur und der Schmelztemperatur des zweiten Rohteils durch Laserbestrahlen des zweiten Verbindungsabschnitts, und
- Anpressen der ersten Verbindungsfläche des ersten Rohteils an die zweite Verbindungsfläche des zweiten Rohteils, bis sich die Rohteile an den Verbindungsflächen auf eine Temperatur unterhalb der Rekristallisations temperatur abgekühlt haben.

[0007] Dem angegebenen Verfahren liegt die Überlegung zugrunde, dass in dem eingangs genannten Verfahren das Material an den Verbindungsflächen beider Rohteile nicht beliebig unabhängig voneinander gewählt werden kann, weil sich die Magnetfelder bei der Erwärmung der beiden Rohteile an den Verbindungsflächen gegenseitig beeinflussen. Daher muss beim Pressschweißen mittels Magnetfelder ein Material für beide Rohteile gewählt werden, das im Wesentlichen die gleiche Rekristallisierungs und Schmelztemperatur hat. Die gleiche Problematik tritt in einem noch viel einschränkenderem Ausmaß beim Pressschweißen mittels Reibwärme auf, weil sich hier die beiden Rohteile an den Verbindungs flächen gegenseitig erhitzen, so dass die Temperatur an beiden Rohteilen nicht beliebig voneinander einstellbar ist. Ein weiterer Nachteil beider Verfahren ist, dass die Verbindungsflächen geometrisch eingeschränkt sind. Sie müssen zumindest beim Schweißen mittels Reibwärme in sich geschlossen und weitestgehend plan sein und dürfen vor allem nicht in einer Ausnehmung der Rohteile angeordnet werden, weil sonst die Erwärmung oder Erhitzung der Rohteile an den Verbindungsflächen gar nicht möglich ist.

[0008] Hier greift das angegebene Verfahren mit der Überlegung an, statt der herkömmlichen Methoden beim Pressschweißen zum Erhitzen einen Laser zu verwenden. Dieser kann die Rohteile an den Verbindungsflächen selbst dann zuverlässig erhitzen, wenn sie beliebige Konturen besitzen, weil der Laser nicht nur wie ein Stift auch zurückgesetzte Flächen und Teilflächen unterbrochener Konturen erreichen kann. Der Energieeintrag an den Verbindungsflächen der beiden Rohteile ist mit einem Laser auch völlig unabhängig voneinander einstellbar. So wären auf die-

se Weise auch metallische Rohteile mit völlig unterschiedlichen Rekristallisationstemperaturen, wie beispielsweise Aluminium mit einer Rekristallisationstemperatur von 150 °C und Nickel mit einer Rekristallisationstemperatur von 600 °C, miteinander verbindbar. Dies ist mit keinem herkömmlichen Pressschweißverfahren möglich.

[0009] Die Verbindungsabschnitte können neben den Verbindungsflächen weitere Flächen des Rohteils umfassen, an denen die Verbindungsabschnitte durch Bestrahlen mit dem Laser erhitzt werden können. Voraussetzung ist jedoch, dass die bestrahlten Flächen so nah an den Verbindungsflächen liegen, dass eine thermische Energieübertragung an die Verbindungsflächen sichergestellt ist. Damit können die Verbindungsflächen direkt durch Bestrahlung oder indirekt durch Bestrahlen einer benachbarten Fläche erhitzt werden.

[0010] Grundsätzlich könnten die Verbindungsabschnitte der beiden Rohteile mit dem gleichen Laser erhitzt werden. Um allerdings Energieverluste durch Abkühlung der beiden Rohteile an ihren Verbindungsflächen so gering wie möglich zu halten, sollte jeder Verbindungsabschnitt mit einem eigenen Laser bestrahlt werden. Zwar schlägt sich der zweite Laser zunächst in höheren Anschaffungskosten nieder, über die Zeit rechnet sich jedoch der Parallelbetrieb zweier Laser in den Energiekosten aufgrund der niedrigeren Energieverluste aufgrund von Abkühlung.

[0011] In einer vorteilhaften Weiterbildung des angegebenen Verfahrens sollten die erste Verbindungsfläche und die zweite Verbindungsfläche beim Bestrahlen entsprechend mit dem ersten Laser und dem zweiten Laser derart angeordnet sein, dass die Flächennormalen der Verbindungsflächen in entgegengesetzte Richtungen zeigen. Auf diese Weise brauchen die beiden Rohteile nach dem Erwärmen auf die Temperatur oberhalb der Rekristallisationstemperatur nicht erst drehend aufeinander ausgerichtet werden, was nicht nur entsprechende Bewegungsaktuatoren einspart auch die für diese Bewegung notwendige Abkühlzeit wird gering gehalten, wodurch die Energiekosten weiter gesenkt werden können.

[0012] In einer besonders vorteilhaften Weiterbildung des angegebenen Verfahrens sollten die Laser die entsprechenden Verbindungsflächen winklig zu deren Flächennormalen bestrahlen. Auf diese Weise können die beiden Verbindungsflächen beim Erwärmen oder Erhitzen auf einer gemeinsamen Achse ausgerichtet werden, so dass sie nach dem Erwärmen oder Erhitzen zum Zusammenpressen nur auf dieser Achse aufeinander zu bewegt werden müssen. Auf diese Weise ist der Bewegungsweg zum Verpressen der beiden Rohteile und damit der potentielle Energieverlust durch Abkühlung am geringsten.

[0013] In einer anderen Weiterbildung des angegebenen Verfahrens sollte der der Laser beim Erhitzen des Verbindungsabschnitts am ersten und/oder zweiten Rohteil eine Kurve über den entsprechenden Verbindungsabschnitt fahren, die die entsprechende Verbindungsflächen zu einem vorbestimmten Überdeckungsgrad ausfüllt. Auf diese Weise wird der entsprechende Verbindungsabschnitt wie mit einem Stift ausgemalt und damit vom Laser auf die zur Durchführung des Pressschweißens notwendigen Betriebstemperatur zuverlässig erhitzt.

[0014] Hierbei sollte der Laser die Kurve nicht nur einmal, sondern periodisch mit einer Überdeckungsfrequenz abfahren. Auf diese Weise wird vermieden, dass der Laser auf dem entsprechenden Verbindungsabschnitt lokal zu lange stehen bleibt und das entsprechende Rohteil an dieser Stelle auf eine Temperatur oberhalb der Schmelztemperatur zu hoch erhitzt, was das Rohteil beschädigen könnte.

[0015] Die zuvor genannte Überdeckungsfrequenz sollte derart gewählt sein, dass an jedem Punkt der Kurve auf dem entsprechenden Verbindungsabschnitt eine Energiezufuhr während einer Bestrahlung durch den Laser größer ist, als eine Energieabfuhr während einer Abkühlung bei der der Laser den Rest der Kurve abfährt. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass die Gesamtenergiezufuhr auch groß genug ist, der entsprechende Verbindungsabschnitt auch wirklich auf eine Temperatur oberhalb der Rekristallisationstemperatur zu erhitzen.

[0016] Die zuvor genannten Verfahrensmerkmale betrafen zwar nur einen Verbindungsabschnitt eines der beiden Rohteile, die Verfahrensmerkmale sind jedoch auf die Verbindungsabschnitte beider Rohteile gleichermaßen anwendbar, denn die zu den Verbindungsabschnitten zugehörigen Verbindungsflächen müssen gleichermaßen auf eine Temperatur oberhalb der Rekristallisationstemperatur erwärmt werden, um das Pressschweißen zu ermöglichen. Unterscheiden sich die Rohteile in ihrem Material, so kann es notwendig sein, die Parameter der Verfahrensschritte, wie die Überdeckungsfrequenz und/oder eine Intensität des entsprechenden Lasers und/oder andere Parameter entsprechend verschieden von einander zu wählen.

[0017] Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung umfasst ein Werkstück ein aus einem ersten Material gefertiges erstes Teilstück mit einer ersten Verbindungsfläche und ein aus einem vom ersten Material verschiedenen zweiten Material gefertiges zweites Teilstück mit einer zweiten Verbindungsfläche, wobei die erste Verbindungsfläche und die zweite Verbindungsfläche mit einem der zuvor genannten Verfahren miteinander verbunden sind.

[0018] Ein mögliches Werkstück wäre ein Bohrer, in dem das erste Teilstück ein Bohrerkopf und das zweite Teilstück ein Bohrer-Schneidgewinde sind. Das Schneidgewinde und der Bohrerkopf könnten nicht nur mit völlig unterschiedlichen Herstellungsverfahren in Massenproduktion gefertigt und abschließend miteinander verbunden werden, auch beider Materialwahl würden sich die beiden Teilstücke des Bohrers nicht gegenseitig beeinflussen. So kann für den Bohrerkopf beispielsweise ein sehr hartes Sintermaterial gewählt werden, während für das Schneidgewinde ein Material gewählt werden kann, dass sich in einfacher Weise spanabhebend fertigen lässt.

[0019] Die oben beschriebenen Eigenschaften, Merkmale und Vorteile dieser Erfindung sowie die Art und Weise wie diese erreicht werden, werden verständlicher im Zusammenhang mit der folgenden Beschreibung der Ausführungsbeispiele, die im Zusammenhang mit der Zeichnung näher erläutert werden. Es zeigen:

[0020] Fig. 1 eine schematische Ansicht einer Fertigungsstraße,

[0021] Fig. 2 eine perspektivische Ansicht einer als Laserpressschweißmaschine ausgeführten Werkzeugmaschine für die Fertigungsstraße der Fig. 1,

[0022] Fig. 3 einen vergrößerten Ausschnitt der Laserpressschweißmaschine der Fig. 2,

[0023] Fig. 4a einen schematischen Verfahrensablauf gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel für die Laserpressschweißmaschine der Fig. 2 und Fig. 3,

[0024] Fig. 4b eine schematische Zeichnung für einen Weg eines Lasers auf einem Rohteil in der Laserpressschweißmaschine der Fig. 2 und Fig. 3,

[0025] Fig. 4c ein Diagramm, zum Erläutern des Energieeintrages über die Zeit in dem Rohteil der Fig. 4b,

[0026] Fig. 5a einen schematischen Verfahrensablauf gemäß einem zweiten Ausführungsbeispiel für die Laserpressschweißmaschine der Fig. 2 und Fig. 3,

[0027] Fig. 5b einen schematischen Verfahrensablauf gemäß einem dritten Ausführungsbeispiel für die Laserpressschweißmaschine der Fig. 2 und Fig. 3,

[0028] Fig. 6a einen schematischen Verfahrensablauf gemäß einem vierten Ausführungsbeispiel für die Laserpressschweißmaschine der Fig. 2 und Fig. 3,

[0029] Fig. 6b einen schematischen Verfahrensablauf gemäß einem fünften Ausführungsbeispiel für die Laserpressschweißmaschine der Fig. 2 und Fig. 3,

[0030] Fig. 7a eine Stirnansicht eines ersten Rohteils für ein Werkstück,

[0031] Fig. 7b eine abgeschnittene Seitenansicht eines mit der Laserpressschweißmaschine der Fig. 2 und Fig. 3 herstellbaren Werkstücks mit dem ersten Rohteil der Fig. 7a,

[0032] Fig. 7c eine Stirnansicht eines zweiten Rohteils für das Werkstück der Fig. 7b, und

[0033] Fig. 8 ein alternatives mit der Laserpressschweißmaschine der Fig. 2 und Fig. 3 herstellbaren Werkstücks.

[0034] In den Figuren werden gleiche technische Elemente mit gleichen Bezugszeichen versehen und nur einmal beschrieben. Die Figuren sind rein schematisch und geben vor allem nicht die tatsächlichen geometrischen Verhältnisse wieder.

[0035] Es wird auf Fig. 1 Bezug genommen, die eine schematische Ansicht einer Fertigungsstraße 1 zeigen. In der Fertigungsstraße 1 soll aus Rohten mit Werkzeugen nicht weiter spezifizierte Fertigprodukte hergestellt werden.

[0036] Die Fertigungsstraße 1 umfasst ein Rohtellager 2, in dem die Rohteile gelagert sind, und ein Werkzeuglager 3, in dem die Werkzeuge gelagert sind. Je ein Greifroboter 4 im Rohtellager 2 und im Werkzeuglager 4 kann entsprechend ein Rohteil oder ein Werkzeug greifen und damit auf einem Rüstplatz 5 eine Platte 6 bestücken. Eine ausreichende Anzahl an Platten 6 ist in einem Plattenspeicher 7 vorgehalten.

[0037] Die mit dem Rohteilen oder den Werkzeugen bestückten Platten 6 können dann über ein Förderband 8 zu einer Reihe 9 mit Werkzeugmaschinen 10 gefahren werden. Die Werkzeugmaschinen 10 führen gemeinsam einen Fertigungsprozess aus, mit dem die zuvor erwähnte Aufgabe, aus den Rohten mit den Werkzeugen nicht weiter spezifizierte Werkstücke herzustellen, erfüllt wird.

[0038] Jede Werkzeugmaschine 10 in der Reihe 9 führt einen oder mehrere Zwischenschritte des Fertigungsprozesses aus. Greifroboter 4 greifen hierzu die Rohteile und/oder die Werkzeuge von den Platten 6 und bestücken damit die Werkzeugmaschine 10, die den entsprechenden Zwischenschritt ausführen soll. Nach Abschluss des Zwischenschrittes oder sobald ein Werkzeug nicht mehr gebraucht wird, legen die Greifroboter 4 entweder das Zwischen- oder Fertigprodukt oder das nicht mehr gebrauchte Werkzeug

zurück auf die entsprechende Platte **6**, die dann entweder zur nächsten Werkzeugmaschine **10** und damit zum nächsten Zwischenschritt oder zurück zu den Lagern **2, 3** fährt. Um nachstehend die Begriffe Rohteil und Werkstück sauber zu trennen, soll unter einem Rohteil das zu bearbeitende Material verstanden werden, das einer Werkzeugmaschine **10** zugeführt wird, unabhängig davon ob es sich um ein Rohteil aus dem Rohteillager **2** oder um ein Zwischenprodukt aus einem vorangegangen Zwischenschritt in einer anderen Werkzeugmaschine handelt. Unter einem Werkstück soll das von einer Werkzeugmaschine **10** bearbeitete Rohteil verstanden werden. Ein eine Werkzeugmaschine **10** verlassendes Werkstück kann daher das Rohteil für eine andere Werkzeugmaschine **10** sein.

[0039] Eine nicht weiter dargestellte Leitstelle kann den Materialfluss mittels den Greifrobotern **4** und den Platten **6** koordinieren.

[0040] Es wird auf **Fig. 2** und **Fig. 3** Bezug genommen, die perspektivische Ansichten einer als Laserpressschweißmaschine ausgeführten Werkzeugmaschine **10** für die Fertigungsstraße der **Fig. 1** zeigt.

[0041] Die Laserpressschweißmaschine **10** umfasst ein Maschinenbett **12**, das auf Füßen **13** getragen ist. Von den Füßen **13** sind in der Perspektive der **Fig. 2** nicht alle zu sehen. Auf dem Maschinenbett **12** sind ein motorisch betriebener Schraubstock **14** sowie ein erster Träger **15** und ein zweiter Träger **16** gehalten. Für die weiteren Erläuterungen soll definiert werden, dass sich die Laserpressschweißmaschine **10** in einem Raum mit einer x-Ausdehnung **16**, einer y-Ausdehnung **17** und einer z-Ausdehnung **18** befindet.

[0042] Der Schraubstock **14** umfasst ein erstes ortsfestes Ankerelement **19** und ein in x-Richtung **16** davon beabstandet angeordnetes zweites ortsfeste Ankerelement **20**. zwischen den beiden ortsfesten Ankerelementen **19, 20** sind vier Führungsstangen **21** gehalten, von denen in **Fig. 2** und **Fig. 3** der Übersichtlichkeit halber nicht alle mit einem eigenen Bezugszeichen versehen sind. Zwischen den beiden ortsfesten Ankerelementen **19, 20** ist gleitend auf den Führungsstangen ein Schlitten **22** gelagert, der angetrieben von einem Motor **23** über eine durch ein nicht zusehendes Innengewinde im zweiten ortsfesten Ankerelement **19, 20** geführte Spindelstange **24** zwischen den beiden ortsfesten Ankerelementen **19, 20** in der x-Richtung **15** hin- und herbewegt werden kann. Mit dem Spannstock **14** können die oben genannten Rohteile in der x-Richtung gegeneinander verpresst werden.

[0043] Hierzu ist am ersten Ankerelement **19** zum Schlitten **22** hin gerichtet eine erste Trageplatte **25** mit einem ersten Spannfutter **26** gehalten. In gleicher Weise ist am Schlitten **22** zum ersten Ankerelement

19 hin gerichtet eine zweite Trageplatte **27** mit einem zweiten Spannfutter **28** gehalten. In jedem der Spannfutter **26, 28** kann ein Rohteil in an sich bekannter Weise verspannt werden, um beide dann angetrieben durch den Motor **23** in x-Richtung **16** gegeneinander zu verspannen.

[0044] Die beiden Träger **15, 16** sind in x-Richtung **16** verfahrbar auf einer Führungsschiene **29** und einer zweiten Führungsschiene **30** gehalten, die in y-Richtung **17** gesehen hinter der ersten Führungsschiene **29** angeordnet ist. Jeder Träger **15, 16** ist über einen eigenen Antriebsmotor **31** und eine eigene Spindelstange **32** auf den Führungsschienen **29, 30** in der x-Richtung **16** hin- und herbewegbar.

[0045] Jeder Träger **15, 16** besitzt ein Schlittensystem **33**, an dem in z-Richtung **18** verfahrbar je ein Schwenkarm **34** gehalten ist. Jeder der Schwenkarme **34** wird über ein in den **Fig. 2** und **Fig. 3** nicht weiter zu sehendes Antriebssystem in der z-Richtung **18** bewegt. Auf die genaue Funktionsweise des Schlittensystems **33** kommt es zum Verständnis der weiteren Ausführungen nicht an, weshalb hierauf nicht näher eingegangen werden soll.

[0046] Am Schwenkarm **34** des ersten Trägers **15** ist eine erste Scanneroptik **35** einer ersten Laseranlage gehalten, die in den **Fig. 2** und **Fig. 3** nicht vollständig ausgeführt ist. Entsprechend ist am Schwenkarm **34** des zweiten Trägers **15** eine zweite Scanneroptik **36** einer zweiten Laseranlage gehalten, die ebenfalls in den **Fig. 2** und **Fig. 3** nicht vollständig ausgeführt ist. Die Schwenkarme **34** halten ihre jeweilige Scanneroptik **35, 36** schwenkbar um die y-Achse **17**. Zum Schwenken werden die Schwenkarme **34** je von einem in **Fig. 2** und **Fig. 3** nicht weiter zu sehenden Antriebssystem angetrieben.

[0047] Nachstehend werden Details der Scanneroptiken **35, 36** beschrieben. Aus Übersichtlichkeitsgründen sind hierbei nur die Scanneroptiken **35, 36** der **Fig. 3** mit Bezugszeichen versehen.

[0048] Jede Scanneroptik **35, 36** weist ein in den **Fig. 2** und **Fig. 3** abgeschnitten dargestelltes Laserlichtkabel **37** auf, über das die entsprechende Scanneroptik **35, 36** mit Laserlicht **38** versorgt wird. Das Laserlicht **38** wird in einem Kollimator **39** in an sich bekannter Weise parallelisiert und über einen Ablenkspiegel **40** in eine Strahlführungseinrichtung **41** geleitet. Die Strahlführungseinrichtung **41** der ersten Scanneroptik **35** gibt dann einen aus dem Laserlicht **38** erzeugten ersten Laser **42** aus, während die Strahlführungseinrichtung **41** der zweiten Scanneroptik **36** einen aus dem Laserlicht **38** erzeugten zweiten Laser **43** ausgibt. Über die Strahlführungseinrichtung **41** der jeweiligen Scanneroptik **35, 36** ist der entsprechende Laser **42, 43** mittels nicht weiter gezeigter einstellbarer Spiegel und Objektiven inner-

halb eines Arbeitsbereiches **44** an einen beliebigen Punkt fokusierbar. Die genaue Funktionsweise dieser Fokussierung ist an sich bekannt und braucht nicht weiter erläutert zu werden.

[0049] Somit kann die erste Scanneroptik **35** geführt über das Schlittensystem **33** und den Schwenkarm **34** des ersten Trägers **15** grob das zweite Spannfutter **28** ausgerichtet werden. Ein in dem zweiten Spannfutter **28** eingespanntes Rohteil kann dann an einer zum ersten Spannfutter **26** weisenden Stelle mittels des ersten Lasers **42** aus der ersten Scanneroptik **35** auf eine Temperatur oberhalb der Rekristallisierungstemperatur des Rohteils im zweiten Spannfutter **28** erhitzt werden. Entsprechend kann die zweite Scanneroptik **36** geführt über das Schlittensystem **33** und den Schwenkarm **34** des zweiten Trägers **16** grob auf das erste Spannfutter **26** ausgerichtet werden. Ein in dem ersten Spannfutter **26** eingespanntes Rohteil kann dann an einer zum zweiten Spannfutter **28** weisenden Stelle mittels des zweiten Lasers **43** aus der zweiten Scanneroptik **36** auf eine Temperatur oberhalb der Rekristallisierungstemperatur des Rohteils im ersten Spannfutter **26** erhitzt werden. Abschließend können die beiden Rohteile an der erhitzten Stelle über den Schraubstock **14** miteinander pressverschweißt werden. Die Verwendung von zwei Scanneroptiken **35, 36** ist in **Fig. 2** und **Fig. 3** eine technisch besonders günstige Ausführung. Aus Kostengründen wäre es jedoch grundsätzlich auch denkbar, einzig die erste Scanneroptik **35** einzig auf dem ersten Träger **15** getragen zu verwenden.

[0050] Auf den zuvor grundsätzlich erläuterten Betrieb der Laserpressschweißmaschine **10** soll nachstehend anhand der **Fig. 4a** näher eingegangen werden. In **Fig. 4a** ist ganz konkret ein erstes Rohteil **45** gezeigt, das in das erste Spannfutter **26** eingespannt ist, sowie ein zweites Rohteil **46**, das in das zweite Spannfutter **28** eingespannt ist. In dem in **Fig. 4a** gezeigten Verfahren zum Pressverschweißen der beiden Rohteile **45, 46** arbeiten die beiden Laser **42, 43** über Kreuz. Das heißt, dass der erste Laser **42** das zweite Rohteil **46** erhitzt und der zweite Laser **43** das erste Rohteil **45**. Hierfür weisen erste Rohteil **45** und das zweite Rohteil **46** entsprechend einen ersten Verbindungsabschnitt **47'** mit einer ersten Verbindungsfläche **47** beziehungsweise einen zweiten Verbindungsabschnitt **48'** mit einer zweiten Verbindungsfläche **48** auf. In **Fig. 4a** werden die beiden Rohteile **45, 46** unmittelbar an den Verbindungsflächen **47, 48** erhitzt und durch Verpressen zusammengeführt.

[0051] Zum Erhitzen der Verbindungsflächen **47, 48** werden zunächst die erste Scanneroptik **35** und die zweite Scanneroptik **36** entsprechend auf das zweite Rohteil **46** und das erste Rohteil **45** ausgerichtet. Ziel der Ausrichtung ist es, dass der Arbeitsbereich **44** jeder Scanneroptik **35, 36** überschneidungsfrei mit dem

jeweils anderen, nicht zu erhitzenden Rohteil **46, 45** platziert wird, so dass vermieden wird, dass sich die Rohteile **45, 46** gegenüber den Lasern **42, 43** gegenseitig abschatten. In **Fig. 4a** ist zur Verdeutlichung mit gestrichelten Linien und Apostrophen an den Bezugssymbolen eine Lage der Scanneroptiken **35, 36** angedeutet, in dem sich die Rohteile **45, 46** in einem Teilbereich des Arbeitsbereiches **44** der Scanneroptiken **35, 36** gegenseitig abschatten.

[0052] Nach der Positionierung der Scanneroptiken **35, 36** beginnt der Bestrahlungsvorgang. Hierbei bestrahlen die auf Rohteile **45, 46** ausgerichteten Scanneroptiken **35, 36** die deren Verbindungsflächen **47, 48** kreuzweise mit den entsprechenden Lasern **42, 43** und erhitzten so die Verbindungsfläche **47, 48** des jeweiligen Rohteils **45, 46** auf eine Temperatur oberhalb seiner Rekristallisierungstemperatur. Die Rekristallisierungstemperatur ist materialabhängig. Stahl weist beispielsweise eine Rekristallisierungstemperatur auf, die zirka 600°C bis 700°C abhängig von Legierungsbestandteilen und dem vorhandenen Gefüezustand beträgt. Die Erwärmung darf hierbei jedoch nicht über der Schmelztemperatur des jeweiligen Rohteils **45, 46** liegen, weil das Rohteil **45, 46** sonst lokal beschädigt und der Pressverschweißvorgang beeinträchtigt werden könnte.

[0053] Um die Rohteile **45, 46** an ihren Verbindungsflächen **47, 48** flächig zu erhitzten, fahren die Scanneroptiken **35, 36** mit den Lasern **42, 43** die Verbindungsflächen **47, 48** innerhalb des Arbeitsbereiches **44** in Kurven ab. Das heißt, die Laser **42, 43** werden relativ zu den jeweiligen Verbindungsflächen **47, 48** bewegt. Um diese relative Bewegung zu realisieren können alternativ oder zusätzlich auch die Rohteile **45, 46** bewegt werden, was in **Fig. 4a** durch eine Drehbewegung **62** um eine Rotationsachse **63** der Rohteile **45, 46** angedeutet ist. Zur Bewegung der Rohteile **45, 46** wäre der Schraubstock **14** der Laserpressschweißmaschine **10** der **Fig. 2** und **Fig. 3** jedoch entsprechend anzupassen, um diese Bewegung zu ermöglichen.

[0054] In **Fig. 4b** ist als Beispiel dieser Kurven eine Spiralkurve **49** gezeigt, die auf der Verbindungsfläche **47** des ersten Rohteils **45** vom zweiten Laser **43** abgefahren oder gezeichnet wird. Der auf die erste Verbindungsfläche **47** auftreffende zweite Laser **43** erhitzt die erste Verbindungsfläche **47** punktuell. Mit der Bewegung des zweiten Lasers **43** durch die zweite Scanneroptik **36** wandert diese punktuelle Erhitzung entlang der Spiralkurve **49**.

[0055] Nachstehend soll die Erhitzung an einem lokalen Punkt **50** auf der ersten Verbindungsfläche **47** betrachtet werden. Für diesen speziellen Punkt **50** kann die Erhitzung durch den zweiten Laser **43** in zwei Phasen unterteilt werden, die anhand von **Fig. 4c** näher erläutert werden sollen. In **Fig. 4c** ist

ein Diagramm gezeigt, in dem Wärmeenergie **51** am Punkt **50** über die Zeit **52** aufgetragen ist. Um den Zusammenhang mit dem Punkt **50** zu verdeutlichen, ist das Diagramm mit dem Bezugszeichen **50'** versehen.

[0056] Befindet sich der zweite Laser **43** auf der ersten Verbindungsfläche **47** am Erhitzungspunkt **50**, wird die erste Verbindungsfläche **47** in einer Erhitzungsphase **53** am Erhitzungspunkt **50** durch eine Zufuhr **54** von Wärmeenergie **51** aufgeheizt. In **Fig. 4c** sind drei Erhitzungsphasen **53** angedeutet. Das heißt, der zweite Laser **43** überstreift den Erhitzungspunkt **50** drei Mal und fährt die Spiralkurve **49** drei Mal ab. Die Zufuhr **54** von Wärmeenergie **51** ist in **Fig. 4c** nur in der ersten Erhitzungsphase **53** mit Bezugszeichen angedeutet. Befindet sich der zweite Laser **43** an anderen Punkten der Spiralkurve **49** außerhalb des Erhitzungspunktes **50** kühlst dieser während Abkühlungsphasen **55** wieder ab, was am Erhitzungspunkt **50** zu einem Verlust **56** an Wärmeenergie **51** führt. Damit sich der Erhitzungspunkt **50** effektiv aufheizt, wenn der zweite Laser **43** die Spiralkurve **49** einmal komplett abfährt, muss eine Energiedifferenz **57** zwischen der Zufuhr **54** an Wärmeenergie **51** und dem Verlust **56** an Wärmeenergie **51** positiv sein. Nur dann kann effektiv über die gesamte erste Verbindungsfläche **47** eine Erwärmung erreicht werden, die in **Fig. 4c** durch einen dick gestrichelten Pfeil mit dem Bezugszeichen **58** angedeutet ist.

[0057] Die Gesamtdauer einer Erhitzungsphase **53** zusammen mit einer Abkühlungsphase **55** wird nachstehend Überdeckungsdauer **59** genannt. Der Kehrwert der Überdeckungsdauer **59** wird Überdeckungsfrequenz genannt, die angibt, wie schnell sich der zweite Laser **43** entlang der Spiralkurve **49** bewegt. Die Gesamtdauer aller Erhitzungsphasen **53** zusammen mit allen Abkühlungsphasen **55** wird nachstehend Erhitzungsdauer **60** genannt.

[0058] Die Erhitzungsdauer **60** ist erreicht, wenn auf der ersten Verbindungsfläche **47** auf allen Punkten der Spiralkurve **49** eine Wärmeenergie **51** mit einer Temperatur erreicht ist, die oberhalb der Rekristallisierungstemperatur des ersten Rohteils **45** liegt. In gleicher Weise wie die Erwärmung oder Erhitzung der ersten Verbindungsfläche **47** erfolgt auch die Erwärmung oder Erhitzung der zweiten Verbindungsfläche **48**.

[0059] Nachdem die Verbindungsflächen der Rohteile auf die Temperatur oberhalb der Rekristallisierungstemperatur erhitzt sind, werden die Rohteile dann über den Spannstock **14** gegeneinander solange verpresst, bis sich die Rohteile auf eine Temperatur unterhalb der Rekristallisierungstemperatur wieder abgekühlt haben. Hierbei können an der Verbindungsstelle der beiden Rohteile **45**, **46** Grate **61**

entstehen, die beispielsweise spanabhebend wieder entfernt werden können.

[0060] Nachdem die beiden Rohteile **45**, **46** miteinander mechanisch verbunden sind, können sie aus dem Spannstock **14** entfernt und beispielsweise in der Fertigungsstraße **1** weiter bearbeitet werden.

[0061] Es wird auf **Fig. 5a** Bezug genommen, die eine alternative Ausführung des Erhitzungsvorgangs der Verbindungsflächen **47**, **48** der Rohteile **45**, **46** zeigt. In **Fig. 5a** sind der Übersichtlichkeit halber nicht alle Elemente mit einem Bezugszeichen versehen. In der alternativen Ausführung der **Fig. 5a** lässt sich optional auf die Verwendung einer der beiden Scanneroptiken **35**, **36** verzichten, was durch eine Klammer **64** um die erste Scanneroptik **35** angedeutet ist. Zunächst soll jedoch der Fall betrachtet werden, dass die erste Scanneroptik **35** das erste Rohteil **45** erhitzt, während die zweite Scanneroptik **36** das zweite Rohteil **46** erhitzt.

[0062] In der Ausführung der **Fig. 5a** bestrahlen der erste Laser **42** und der zweite Laser **43** die Verbindungsflächen **47**, **48** nicht direkt sondern indirekt über die Mantelflächen der Rohteile im Bereich des ersten Verbindungsabschnitts **47'** beziehungsweise des zweiten Verbindungsabschnitts **48'**. Hierfür sind die beiden Laser **42**, **43** von der Rotationsachse **63** aus gesehen radial nach innen auf den entsprechenden Teil der Mantelfläche des ersten Rohteils **45** beziehungsweise des zweiten Rohteils **46** ausgerichtet. Anders als in **Fig. 5a** bestrahlen die Laser **42**, **43** die Rohteile **46**, **47** daher nicht über Kreuz.

[0063] In **Fig. 5a** werden die Verbindungsflächen **47**, **48** somit nicht direkt durch Bestrahlen mit den Lasern **42**, **43** erhitzt. Vielmehr wird am ersten Rohteil **45** durch Bestrahlen der Mantelfläche im ersten Verbindungsabschnitt **47'** mit dem ersten Laser **42** die erste Verbindungsfläche **47** indirekt auf die Temperatur oberhalb der Rekristallisationstemperatur erhitzt. In gleicher Weise wird indirekt die zweite Verbindungsfläche **48** mit dem zweiten Laser **43** auf die Temperatur oberhalb der Rekristallisationstemperatur erhitzt, und das Verfahren kann, wie in **Fig. 5a** angedeutet in der gleichen Weise beendet werden, wie in **Fig. 4a**.

[0064] Um wie bereits weiter oben und durch die Klammer **64** angedeutet, auf die erste Scanneroptik **35** verzichten zu können, kann die zweite Scanneroptik **36** eingerichtet sein, den zweiten Laser **43** zwischen dem ersten Verbindungsabschnitt **47'** und dem zweiten Verbindungsabschnitt **48'** hin- und herpendeln zu lassen. Die Idee des Pendelns ist in **Fig. 5a** durch eine gestrichelte Darstellung des zweiten Lasers **43** ausgerichtet auf den ersten Verbindungsabschnitt **47'** angedeutet.

[0065] In **Fig. 5b** ist angedeutet, dass die Verbindungsberiche **47'**, **48'** auch in einer Lage der beiden Rohteile **45**, **46** erhitzt werden könnten, in der die Rotationsachsen **63** der beiden Rohteile **45**, **46** nicht auf einer Linie liegen. Für den Verpressvorgang müssen die Rohteile **45**, **46** daher auf einer gemeinsamen Presslinie ausgerichtet werden, so dass für das Zusammenpressen der beiden Rohteile **45**, **46** nach dem Erhitzen kein einfacher Schraubstock **14** zum Einsatz kommen kann. Es muss vielmehr ein Aktor gewählt werden, der in der Lage ist, die beiden Rohteile **45**, **46** vor dem zusammenpressen axial aufeinander auszurichten. Der Aktor ist in **Fig. 5a** durch das Bezugszeichen **14'** angedeutet.

[0066] In den **Fig. 6a** und **Fig. 6b** sind weiter alternative Ausführungsformen für die Erhitzung der Verbindungsberiche **47'**, **48'** der Rohteile **45**, **46** gezeigt. Die Rohteile **45**, **46** sind hier mit ihren Rotationsachsen **63** winklig zueinander ausgerichtet. Auch in diesen Ausführungsformen müssen die Rohteile **45**, **46** für den Verpressvorgang zunächst auf eine gemeinsame Presslinie ausgerichtet werden. Zweckmäßigerweise sollte hierfür neben den bereits im Zusammenhang mit der **Fig. 5a** genannten Aktor **14'** zum Bewegen des zweiten Rohteils **46** noch ein weiterer Aktor **14''** zum Bewegen des ersten Rohteils **45** vorgesehen werden.

[0067] Der Vorteil der Laserpressschweißmaschine **10** soll nachstehend anhand der **Fig. 7A** bis **Fig. 7c** näher verdeutlicht werden. Dort sind zwei fiktive Rohteile **45**, **46** gezeigt, die mit einem der zuvor beschriebenen Pressschweißverfahren problemlos miteinander verbunden werden können. Eine Verbindung dieser beiden Rohteile **45**, **46** mit herkömmlichen Pressschweißverfahren ist nicht möglich.

[0068] Das erste Rohteil **45** besitzt stirnseitig eine Ausnehmung **65** auf dessen Bodenseite **66** vier Vorsprünge **67** angeordnet sind. Auf diesen vier Vorsprüngen **67** sind je eine erste Verbindungsfläche **47** des ersten Rohteils **45** angeordnet. An der radialen Außenseite des ersten Rohteils **45** sind die vier von einer umlaufenden Wand **68** umgeben.

[0069] Das zweite Rohteil **46** besitzt stirnseitig einen Vorsprung **69** auf dessen Spitzenseite **66** ebenfalls vier Vorsprünge **67** angeordnet sind. Auf diesen vier Vorsprüngen **67** sind je eine zweite Verbindungsfläche **48** des zweiten Rohteils **46** angeordnet. Die Vorsprünge **67** des ersten Rohteils **45** und des zweiten Rohteils **46** sind so angeordnet, dass sie beim axialen Einführen des Vorsprungs **69** in die Ausnehmung **65** übereinander legbar und somit aneinander anpressbar sind.

[0070] Mit einem Pressschweißverfahren, dass mittels elektromagnetischen Feldern wirkt, könnten die Verbindungsflächen **47** in der Ausnehmung **65** nicht

erhitzt werden, weil die Wand **68** die elektromagnetischen Felder abschirmt. Pressschweißverfahren, die mittels Reibwärme operieren können alle Verbindungsflächen **47**, **48** strukturbedingt nicht erhitzen.

[0071] Mit den Lasern **42**, **43** ist eine Erhitzung jedoch problemlos möglich, weil diese nicht nur in die Ausnehmung **65** eindringen können, sie können die einzelnen Verbindungsflächen dediziert erhitzen. Den zuvor beschriebenen Pressschweißverfahren, in denen die Verbindungsflächen **47**, **48** mittels Lasern erhitzt werden, sind keinerlei Einschränkungen hinsichtlich Struktur oder Material der Rohteile **45**, **46** gesetzt.

[0072] Ein Beispiel für das sich ergebende große Anwendungsgebiet der zuvor beschriebenen Pressschweißverfahren, in denen die Verbindungsflächen **47**, **48** mittels Laser **42**, **43** erhitzt werden, soll nachstehend anhand **Fig. 8** erläutert werden, die eine Prinzipdarstellung eines Bohrers **70** zeigt.

[0073] Der Bohrer **70** umfasst das erste Rohteil **45** in Form eines Bohrerkopfes und das zweite Rohteil **46** in Form eines Schneidgewindes. Bohrerkopf **45** und Schneidgewinde **46** haben grundsätzlich verschiedene Anforderungsprofile, weshalb es wünschenswert wäre, diese aus verschiedenen Materialien anzuferingen.

[0074] Hier kann das zuvor vorgestellte Pressschweißverfahren helfen, in dem die Verbindungsflächen **47**, **48** mit Lasern **42**, **43** erhitzt werden. Da sich die Laser **42**, **43** weder gegenseitig beeinflussen noch die Erhitzung der beiden Verbindungsflächen **47**, **48** voneinander abhängig ist, können mit dem Pressschweißverfahren zwei Materialien miteinander verbunden werden, die grundsätzlich völlig verschiedene Rekristallisationstemperaturen aufweisen. Der Bohrerkopf **45** kann beispielsweise aus einem gesinterten Hartmaterial ausgeführt sein, während das Schneidgewinde **46** aus einem weichen Stahl ausgeführt werden kann. Dies ist ebenfalls mit herkömmlichen Pressschweißverfahren nicht realisierbar.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Verbinden eines ersten metallischen Rohteils (**45**) mit einem eine erste Verbindungsfläche (**47**) aufweisenden ersten Verbindungsabschnitt (**47'**) und eines zweiten metallischen Rohteils (**46**) mit einem eine zweite Verbindungsfläche (**48**) aufweisenden zweiten Verbindungsabschnitt (**48'**), umfassend:
– Erwärmen der ersten Verbindungsfläche (**47**) auf eine Temperatur zwischen der Rekristallisierungstemperatur und der Schmelztemperatur des ersten Rohteils (**45**) durch Laserbestrahlen des ersten Verbindungsabschnitts (**47'**) des ersten Rohteils (**45**),

- Erwärmen der zweiten Verbindungsfläche (48) auf eine Temperatur zwischen der Rekristallisierungs-temperatur und der Schmelztemperatur des zweiten Rohteils (46) durch Laserbestrahlen des zweiten Verbindungsabschnitts (48'), und
- Anpressen der ersten Verbindungsfläche (47) des ersten Rohteils (45) an die zweite Verbindungsfläche (48) des zweiten Rohteils (46), bis sich die Rohteile (45, 46) an den Verbindungsflächen (47, 48) auf eine Temperatur unterhalb der Rekristallisationstemperatur abgekühlt haben.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei der erste Verbindungsabschnitt (47') und der zweite Verbindungsabschnitt (48') gleichzeitig entsprechend mit einem ersten Laser (42) und einem zweiten Laser (43) bestrahlt werden.

3. Verfahren nach Anspruch 2, wobei der erste Verbindungsabschnitt (47') und der zweite Verbindungsabschnitt (48') beim Bestrahlen entsprechend mit dem ersten Laser (42) und dem zweiten Laser (43) derart angeordnet sind, dass die Flächennormalen der Verbindungsflächen (47, 48) in entgegengesetzte Richtungen zeigen.

4. Verfahren nach Anspruch 3, wobei die beiden aufeinander zu gerichteten Verbindungsflächen (47, 48) auf einer Achse (63) liegen, und die Laser (42, 43) die Verbindungsflächen (47, 48) winklig zu deren Flächennormalen bestrahlen.

5. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei der Laser (42) zum Erwärmen des ersten Verbindungsabschnitts (47') eine Kurve (49) über den ersten Verbindungsabschnitt (47') fährt, der den Verbindungsabschnitt (47') mit einem vorbestimmten Überdeckungsgrad ausfüllt.

6. Verfahren nach Anspruch 5, wobei der Laser (42) die Kurve (49) periodisch mit einer Überdeckungsfrequenz abfährt.

7. Verfahren nach Anspruch 6, wobei die Überdeckungsfrequenz derart gewählt ist, dass an jedem Punkt (50) der Kurve (49) auf des ersten Verbindungsabschnitts (47') eine Energiezufuhr (54) während einer Bestrahlung (53) durch den Laser (42) größer ist, als eine Energieabfuhr (56) während einer Abkühlung (55) bei der der Laser (42) den Rest der Kurve (49) abfährt.

8. Werkstück (70) umfassend:
- ein aus einem ersten Material gefertiges erstes Teilstück (45) mit einer ersten Verbindungsfläche (47), und
 - ein aus einem vom ersten Material verschiedenen zweiten Material gefertiges zweites Teilstück (46) mit einer zweiten Verbindungsfläche (48),

– wobei die beiden Teilstücke (45, 46) an den Verbindungsflächen (47, 48) mit einem Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7 miteinander verpresst sind.

9. Werkstück (70) nach Anspruch 8, wobei das erste Teilstück (45) ein Bohrerkopf und das zweite Teilstück (46) ein Bohrer-Schneidgewinde sind.

Es folgen 8 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

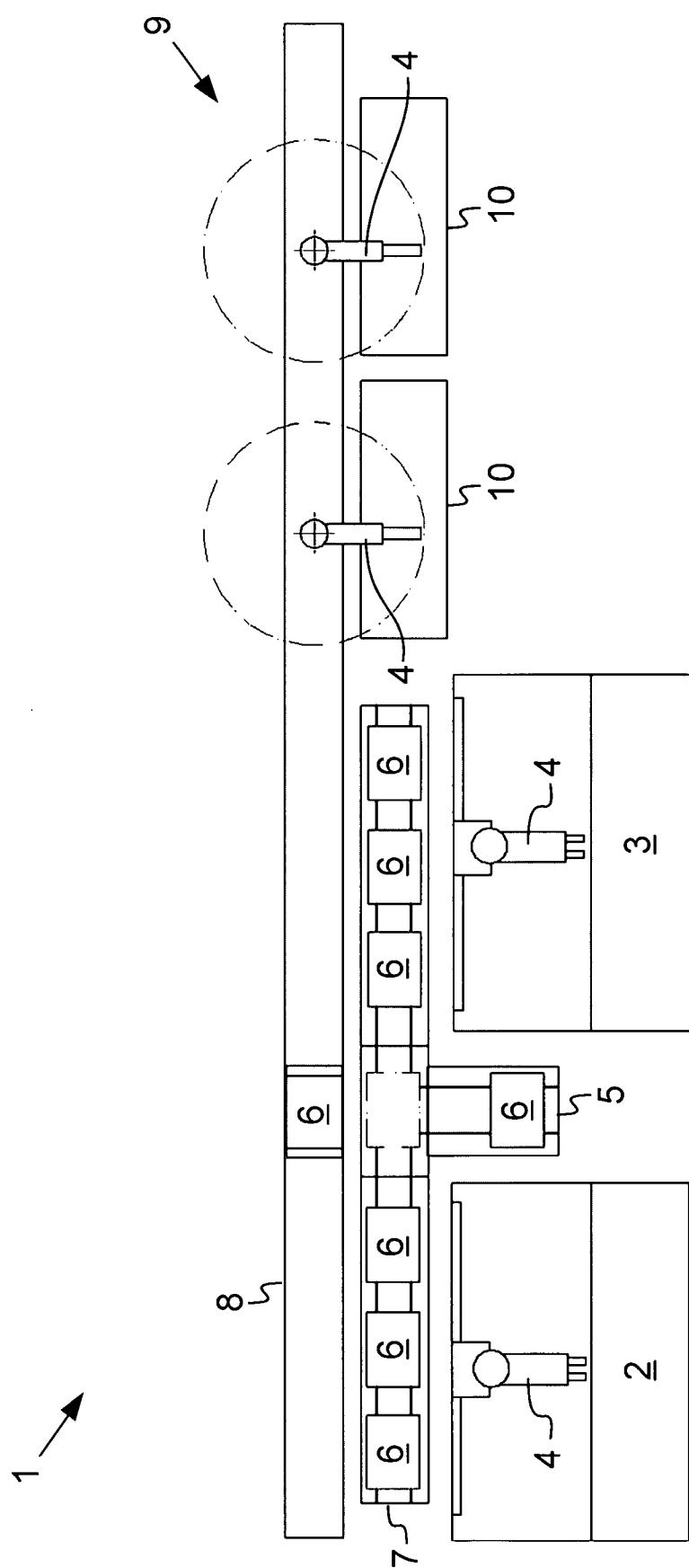


Fig. 1

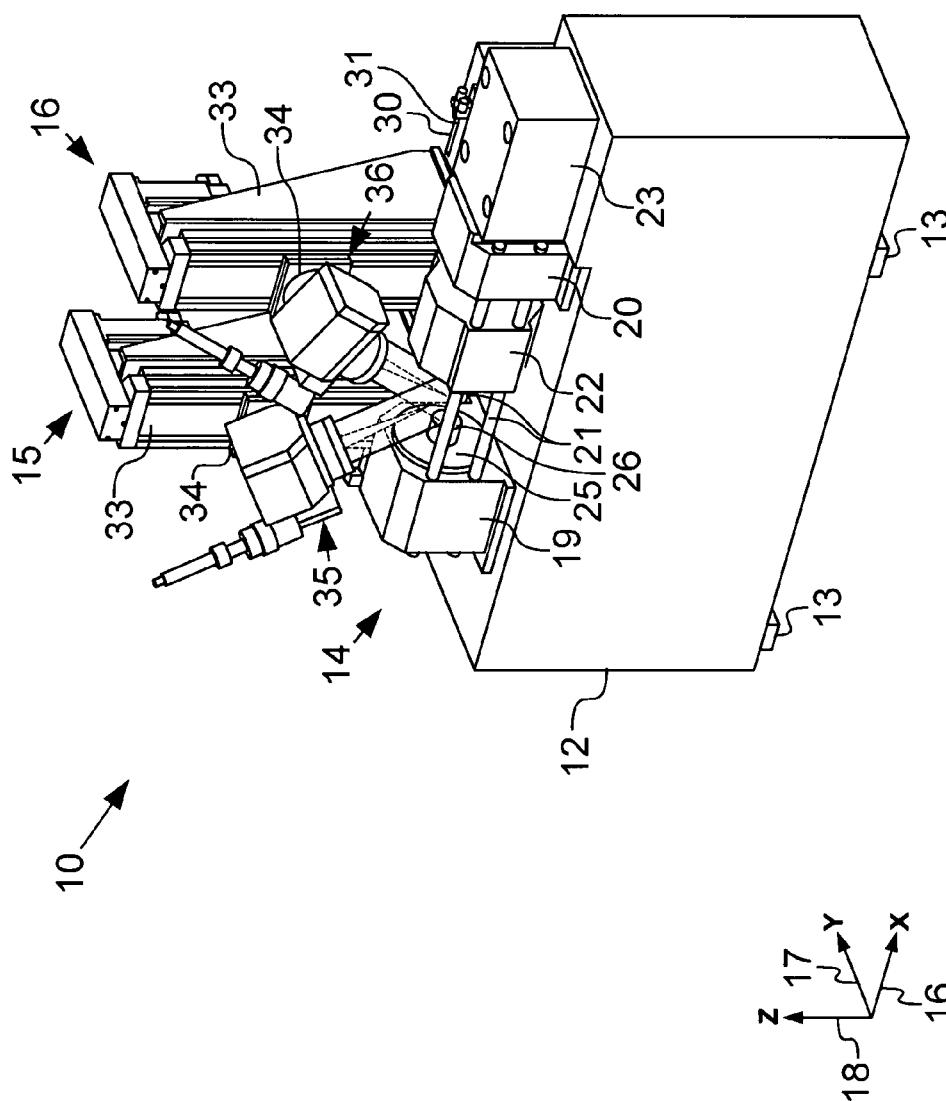


Fig. 2

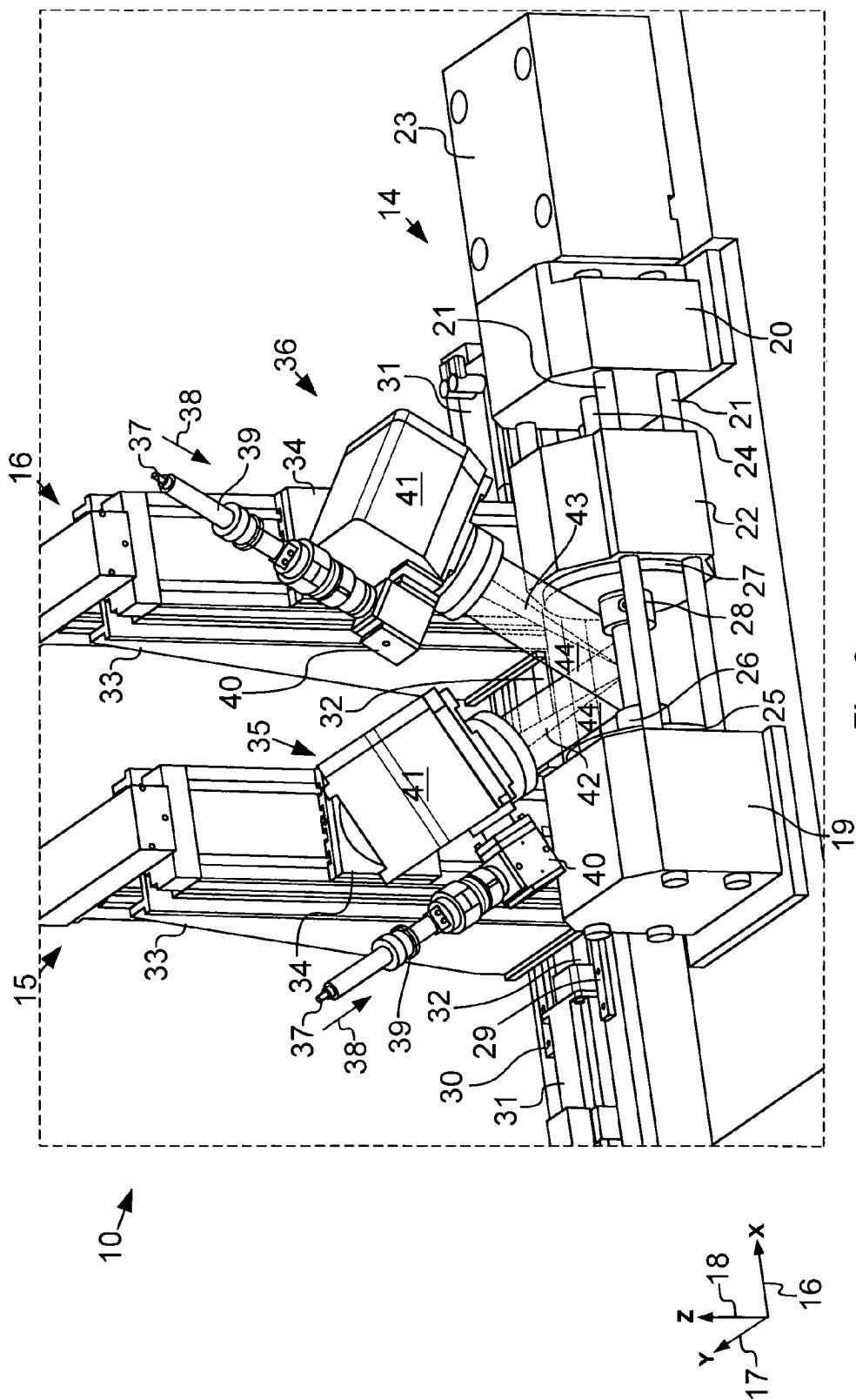


Fig. 3

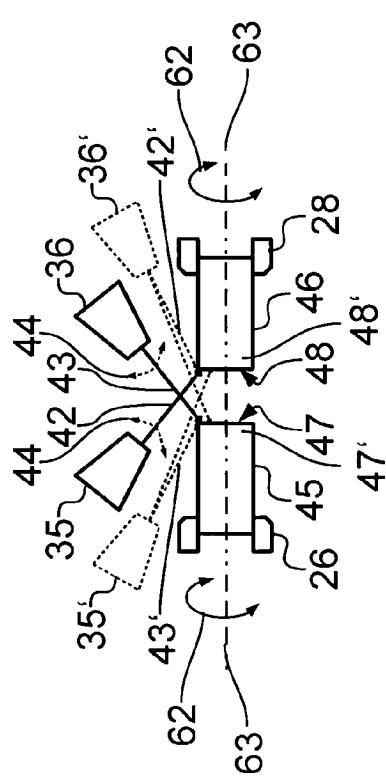


Fig. 4a

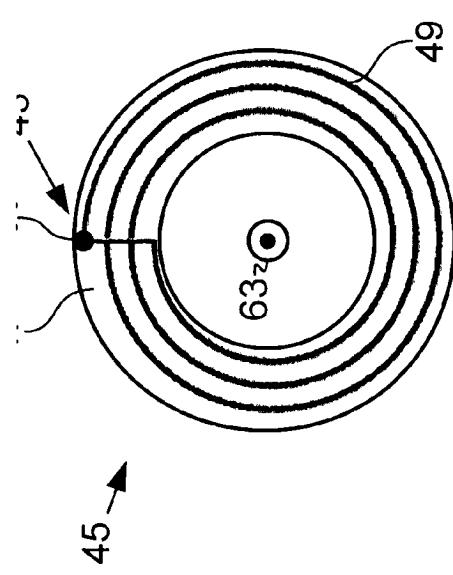


Fig. 4b

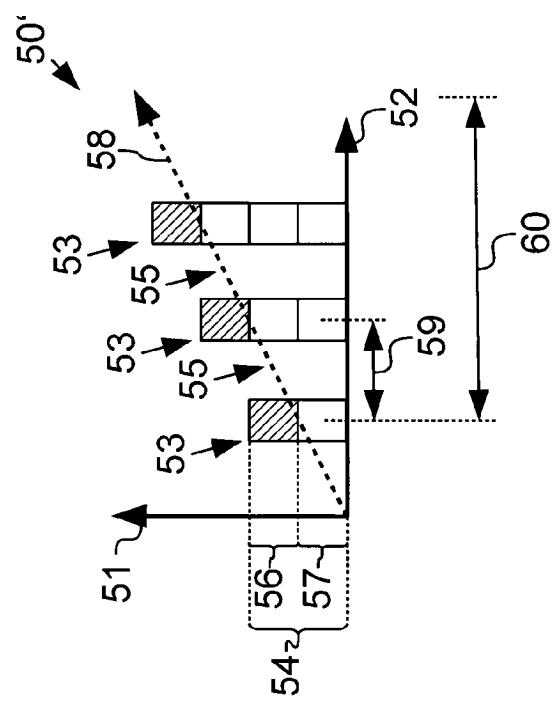


Fig. 4c

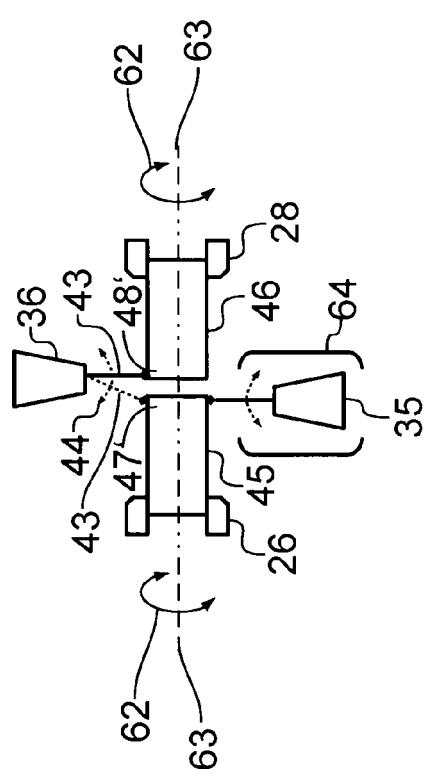


Fig. 5a

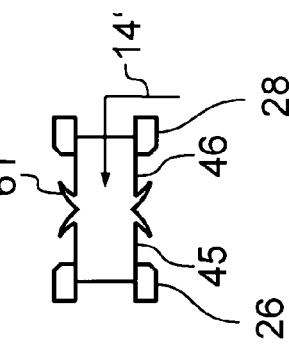
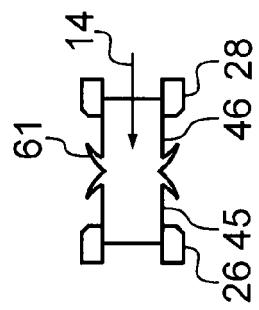


Fig. 5b

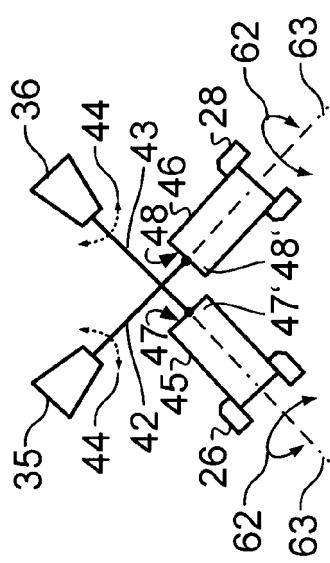


Fig. 6a

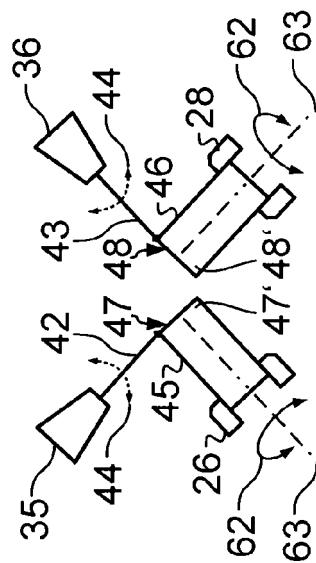
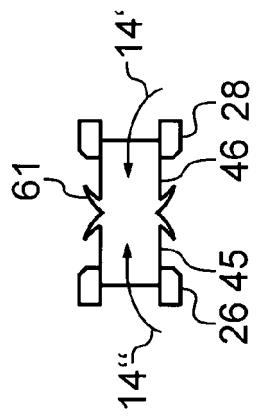


Fig. 6b

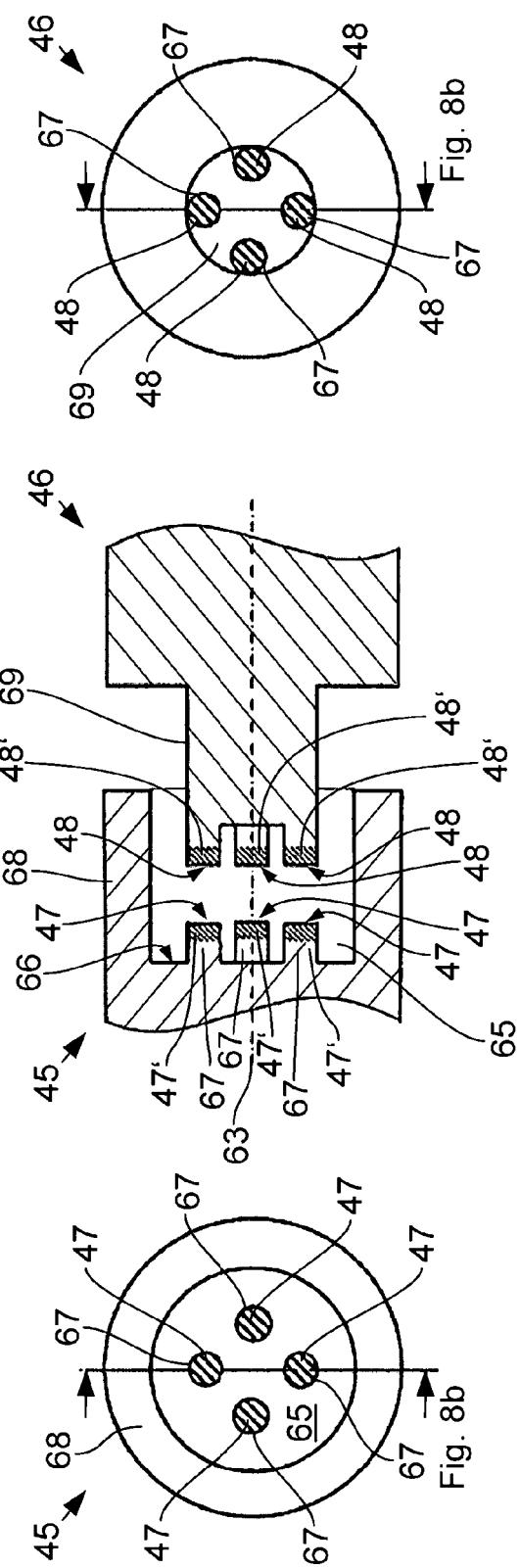


Fig. 7a

Fig. 7b

Fig. 7c

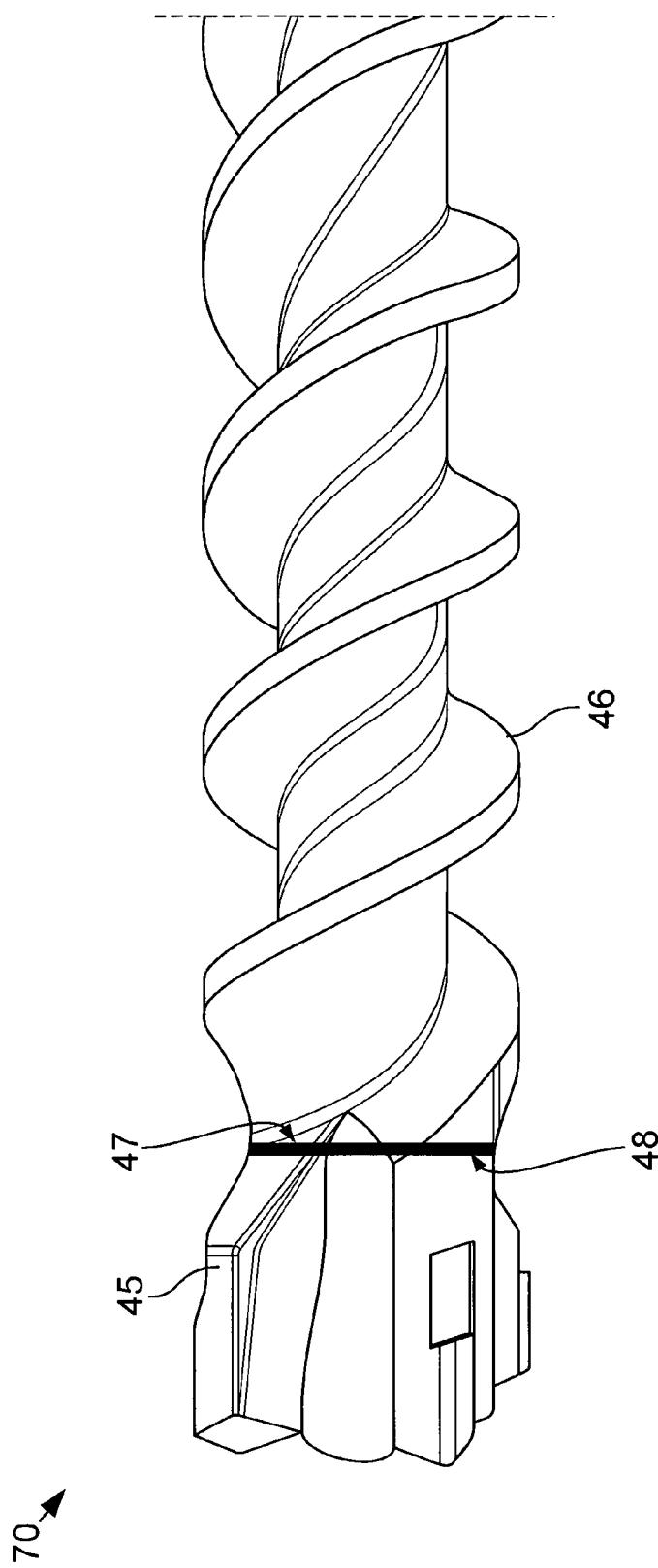


Fig. 8