

(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
05. Mai 2022 (05.05.2022)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2022/089912 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

B23K 26/24 (2014.01) B23K 26/244 (2014.01)
B23K 26/26 (2014.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2021/077776

(22) Internationales Anmeldedatum:
07. Oktober 2021 (07.10.2021)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2020 128 464.0
29. Oktober 2020 (29.10.2020) DE

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

(72) Erfinder: BOCKSROCKER, Oliver; Einsteinstrasse 6,
74343 Sachsenheim (DE). HESSE, Tim; Haldenstrasse 54,
71254 Ditzingen (DE).

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

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

(54) Title: METHOD FOR LASER WELDING TWO THIN WORKPIECES IN AN OVERLAP REGION

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUM LASERSCHWEISSEN ZWEIER DÜNNER WERKSTÜCKE IN EINEM
ÜBERLAPPUNGSBEREICH

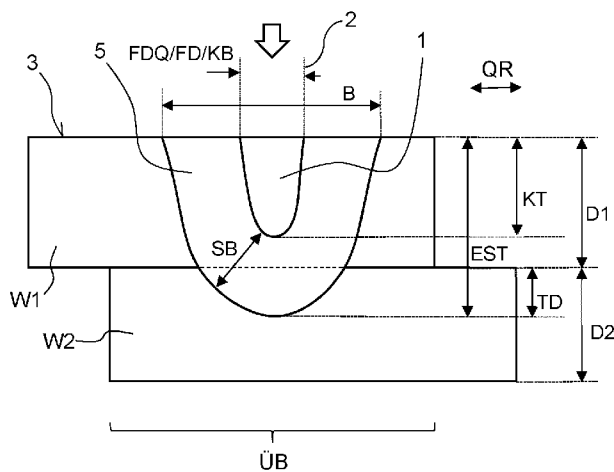


Fig. 1a

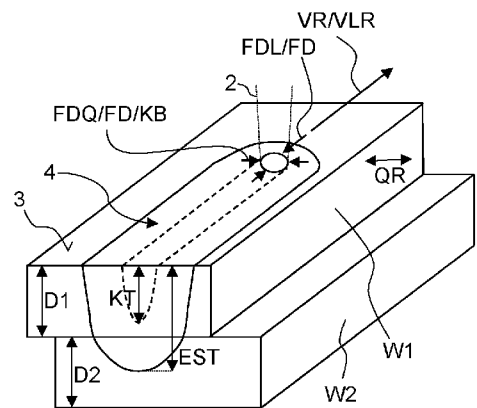


Fig. 1b

(57) **Abstract:** The invention relates to a method for laser welding two workpieces (W1, W2) along a weld seam (4), wherein: at least in an overlap region (ÜB), a first workpiece (W1) with a thickness D1 and a second workpiece (W2) with a thickness D2 are arranged so as to overlap; the thicknesses D1, D2 of the two workpieces (W1, W2) are each 400 µm or less; in the overlap region (ÜB) by means of a laser beam (2) guided along the weld seam (4) from the side of the first workpiece (W1), the material of the first workpiece (W1) is melted over its entire thickness D1 and the material of the second workpiece (W2) is melted only over a partial thickness TD of its entire thickness D2; and the laser welding is performed such that the laser beam (2) generates a vapour capillary (1) which extends into the first workpiece (W1) or into the first and second workpiece (W1, W2) down to a capillary depth KT, where $0.33 \cdot EST \leq KT \leq 0.67 \cdot EST$ and the welding-in depth $EST = D1 + TD$. The invention makes it possible to achieve a high seam quality at high feed speeds when welding thin workpieces.

(57) **Zusammenfassung:** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Laserschweißen zweier Werkstücke (W1, W2) entlang einer Schweißnaht (4), wobei zumindest in einem Überlappbereich (ÜB) ein erstes Werkstück (W1) mit einer Dicke D1 und ein zweites

MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI,
NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU,
RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM,
TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM,
ZW.

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

Werkstück (W2) mit einer Dicke D2 überlappend aufeinander angeordnet werden, wobei die Dicken D1, D2 der beiden Werkstücke (W1, W2) jeweils 400 µm oder weniger betragen, wobei im Überlappbereich (ÜB) mit einem entlang der Schweißnaht (4) geführten Laserstrahl (2) von der Seite des ersten Werkstücks (W1) das Material des ersten Werkstücks (W1) über seine gesamte Dicke D1 und das Material des zweiten Werkstücks (W2) über lediglich eine Teildicke TD seiner gesamten Dicke D2 aufgeschmolzen werden, und wobei das Laserschweißen so ausgeführt wird, dass der Laserstrahl (2) eine Dampfkapillare (1) erzeugt, die sich bis zu einer Kapillartiefe KT in das erste Werkstück (W1) oder in das erste und zweite Werkstück (W1, W2) hinein erstreckt, wobei gilt $0,33 \cdot EST \leq KT \leq 0,67 \cdot EST$, mit Einschweißtiefe $EST = D1 + TD$. Mit der Erfindung kann beim Verschweißen von dünnen Werkstücken eine hohe Nahtqualität bei hoher Vorschubgeschwindigkeit erreicht werden.

Verfahren zum Laserschweißen zweier dünner Werkstücke in einem Überlappungsbereich

5

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Laserschweißen zweier Werkstücke entlang einer Schweißnaht,

wobei zumindest in einem Überlappbereich ein erstes Werkstück mit einer Dicke D1 und ein zweites Werkstück mit einer Dicke D2 überlappend aufeinander an-

10 geordnet werden,

und wobei die Dicken D1, D2 der beiden Werkstücke jeweils 400 μm oder weniger betragen.

15

Laserschweißen (auch genannt Laserstrahlschweißen) wird dazu eingesetzt, aufschmelzbare, meist metallische Werkstücke dauerhaft miteinander zu verbinden. Das Laserschweißen kann dabei mit vergleichsweise großer Geschwindigkeit, hoher Präzision (insbesondere mit schmaler Schweißnaht) und geringem thermischen Verzug der Werkstücke erfolgen.

Je nach Strahlintensität des eingesetzten Laserstrahls kann das Laserschweißen als Wärmeleitungsschweißen oder als Tiefschweißen erfolgen.

Beim Tiefschweißen erzeugt der Laserstrahl im Werkstückmaterial eine ausgeprägte Dampfkapillare (keyhole), die sich entlang der Strahlrichtung in das Werkstückmaterial hinein erstreckt. Durch Mehrfachreflexionen des Laserstrahls an den Wandungen der Dampfkapillare wird die Absorption im Werkstückmaterial erhöht. Der Werkstoff kann auch in der Tiefe und in einem großen Volumen aufgeschmolzen werden. Das Tiefschweißen kann mit vergleichsweise hoher Vorschubgeschwindigkeit (Schweißgeschwindigkeit) erfolgen. Jedoch kommt es beim Tiefschweißen oft zu Spritzern und zu Porenbildung, und häufig wird auch eine unregelmäßige Einschweißtiefe entlang der Schweißnaht beobachtet (Spiking). Beim Verschweißen von dünnen Werkstücken kann es dann zu lokalen Anbin-

15 es wird eine gewünschte Gasdichtigkeit oder auch eine gewünschte Qualität einer elektrischen Kontaktierung nicht erreicht.

Beim Wärmeleitschweißen wird das Werkstückmaterial durch den Laserstrahl nahe der Oberfläche aufgeschmolzen, ohne dass eine merkliche Dampfkapillare entsteht. Die Einschweißtiefe wird wesentlich durch die Wärmeleitung des Werkstückmaterials bestimmt. Es treten kaum Unregelmäßigkeiten wie Spritzer oder Poren auf, und die Schweißnaht ist relativ glatt. Nachteilig ist jedoch eine vergleichsweise geringe Vorschubgeschwindigkeit und Einschweißtiefe; auch kann es zu vermehrtem thermischem Verzug kommen.

Aufgabe der Erfindung

Es ist Aufgabe der Erfindung, beim Verschweißen von dünnen Werkstücken eine hohe Nahtqualität bei hoher Vorschubgeschwindigkeit zu erreichen.

Beschreibung der Erfindung

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß gelöst durch ein Verfahren zum Laserschweißen zweier Werkstücke entlang einer Schweißnaht,

wobei zumindest in einem Überlappbereich ein erstes Werkstück mit einer Dicke D1 und ein zweites Werkstück mit einer Dicke D2 überlappend aufeinander angeordnet werden,

wobei die Dicken D1, D2 der beiden Werkstücke jeweils 400 µm oder weniger betragen,

wobei im Überlappbereich mit einem entlang der Schweißnaht geführten Laserstrahl von der Seite des ersten Werkstücks das Material des ersten Werkstücks über seine gesamte Dicke D1 und das Material des zweiten Werkstücks über lediglich eine Teildicke TD seiner gesamten Dicke D2 aufgeschmolzen werden,

und wobei das Laserschweißen so ausgeführt wird, dass der Laserstrahl eine Dampfkapillare erzeugt, die sich bis zu einer Kapillartiefe KT in das erste Werkstück oder in das erste und zweite Werkstück hinein erstreckt, wobei gilt $0,33 \cdot EST \leq KT \leq 0,67 \cdot EST$, mit Einschweißtiefe $EST = D1 + TD$.

Die vorliegende Erfindung schlägt vor, das Laserschweißen von zwei dünnen Werkstücken im Überlappstoß in einem Übergangsbereich zwischen Wärmeleitungsschweißen und Tiefschweißen zu führen („Transition mode welding“). Dadurch ist es möglich, die Vorteile beider Verfahren größtenteils zu nutzen, und die Nachteile beider Verfahren weitgehend zu vermeiden. Insbesondere kann eine ausreichende Einschweißtiefe mit großer Genauigkeit eingehalten werden, so dass insbesondere auch gasdichte und elektrisch gut leitfähige Verbindungen zuverlässig eingerichtet werden können. Gleichzeitig kann mit einer vergleichsweise hohen Vorschubgeschwindigkeit gefertigt werden.

Unter den erfindungsgemäßen Bedingungen für die Kapillartiefe KT (Erstreckung der Dampfkapillare ins Werkstückmaterial hinein) im Verhältnis zur Einschweißtiefe EST (Erstreckung des Schmelzbades ins Werkstückmaterial hinein) erfolgt das Verschweißen in dem gewünschten Übergangsbereich zwischen Wärmeleitungsschweißen und Tiefschweißen, und eine hohe Schweißnahtqualität ist mit relativ hoher Vorschubgeschwindigkeit erreichbar.

Im Rahmen des erfindungsgemäßen Verfahrens entsteht eine Dampfkapillare, diese ist jedoch im Vergleich zum herkömmlichen Tiefschweißen relativ kurz ausgebildet (in Richtung in das Werkstückmaterial hinein bzw. in Laserstrahlrichtung).

tung). Die Einschweißtiefe wird sowohl durch Wärmeleitung, als auch durch die Tiefe der Dampfkapillare wesentlich bestimmt, wobei die beiden Anteile näherungsweise gleich groß sind. Dadurch kann eine größere Einschweißtiefe als beim Wärmeleitungsschweißen erreicht werden, die insbesondere gut für das Verschweißen von dünnen Werkstücken wie Blechen geeignet ist. Gleichzeitig bleibt aber die Schmelzbaddynamik noch gering, insbesondere auch weil die Gesamtmenge des aufgeschmolzenen Materials relativ gering bleibt. Die Energieabsorption aus dem Laserstrahl in das Werkstückmaterial ist weniger stark als beim Tiefschweißen, weil die geringe Kapillartiefe nur wenige Reflexionen des Laserstrahls innerhalb der Dampfkapillare erlaubt. Zudem gleicht das im Wesentlichen mit der Vorschubgeschwindigkeit synchrone Aufschmelzen des Werkstückmaterials durch Wärmeleitung demgegenüber schnellere dynamische Bewegungen im Schmelzbad größtenteils aus.

Die Messung der Einschweißtiefe EST ist während des Schweißprozesses beispielsweise mittels Ultraschallwellen möglich, die an der Grenzfläche von flüssigem Werkstückmaterial und festem Werkstückmaterial reflektiert werden. Die Messung der Kapillartiefe KT der Dampfkapillare kann während des Schweißprozesses beispielsweise mittels der Reflektion eines Messlaserstrahls am Kapillarboden erfolgen. Andere Parameter sind meist vorbekannt (etwa Fokusbereich des Laserstrahls) oder mittels anderer Sensoren während des Schweißprozesses leicht ermittelt werden. Beispielsweise können einige Parameter während des Schweißprozesses optisch mit einer Kamera gemessen werden, insbesondere die Breite B der Schweißnaht/des aufgeschmolzenen Bereichs oder die Kapillarbweite KB an der Werkstückoberfläche quer zur Vorschubrichtung, die näherungsweise dem Fokusbereich FDQ quer zur Vorschubrichtung entspricht. Entsprechend kann die Einhaltung der erfindungsgemäßen Bedingungen, falls gewünscht, während des Schweißprozesses überprüft und ggf. nachgeregelt werden.

Um die Dampfkapillare herum entsteht näherungsweise gleichmäßig in alle Richtungen (in der Ebene quer zur Vorschubrichtung) ein aufgeschmolzener Bereich einer Schmelzbreite SB. Wenn man den Fokusbereich FDQ des Laserstrahls an der dem Laserstrahl zugewandten (vorderen) Oberfläche des ersten Werk-

stücks W1 quer zur Schweißrichtung kennt, der ungefähr der dortigen Breite der Dampfkapillare KB entspricht, kann über die Breite B der Schweißnaht an der vorderen Werkstückoberfläche die Schmelzbreite SB gut bestimmt werden zu $SB = (B - FDQ) / 2$. Aus der Differenz der Einschweißtiefe EST, die im Schliffbild (Querschliff) gut zu erkennen ist, und der so bestimmten Schmelzbreite SB kann dann auch die Kapillartiefe KT im Schliffbild näherungsweise bestimmt werden zu $KT = EST - SB$. Entsprechend kann auch die Einhaltung der erfindungsgemäßen Bedingungen leicht nachträglich am geschweißten Werkstück überprüft werden, und ggf. können Prozessparameter dann iteriert werden, um die erfindungsgemäßen Bedingungen bei zukünftigen Werkstücken einzuhalten.

Man beachte, dass die Schmelzbreite SB im Rahmen der Erfindung meist ungefähr der Kapillartiefe KT entspricht, bevorzugt mit $0,67 * SB \leq KT \leq 1,33 * SB$, besonders bevorzugt $0,80 * SB \leq KT \leq 1,20 * SB$.

Die Dicken und Tiefen werden jeweils senkrecht zur dem Laserstrahl zugewandten Oberfläche des ersten Werkstücks bestimmt (insbesondere KT, EST, D1, D2). Bevorzugt wird im Rahmen der Erfindung zum Laserschweißen ein ungestreckter Laserstrahl (mit einem Aspektverhältnis FDQ/FDL um die 1, meist mit $0,8 \leq FDQ/FDL \leq 1,2$, bevorzugt $0,9 \leq FDQ/FDL \leq 1,1$) eingesetzt. Der Fokus des Laserstrahls auf der Werkstückoberfläche ist typischerweise rund (isotroper Laserstrahl).

Bevorzugte Varianten der Erfindung

Bei einer bevorzugten Variante des erfindungsgemäßen Verfahrens gilt $0,40 * EST \leq KT \leq 0,60 * EST$, bevorzugt $0,45 * EST \leq KT \leq 0,55 * EST$. Dieser Parameterbereich hat sich in der Praxis besonders bewährt. Die Anteile von Wärmeleitung und Kapillartiefe an der Einschweißtiefe sind dann besonders gut ausgewogen.

Bevorzugt ist auch eine Variante, bei der gilt $0,25 * D2 \leq TD \leq 0,75 * D2$,

bevorzugt $0,33 \cdot D_2 \leq TD \leq 0,67 \cdot D_2$,

besonders bevorzugt $0,40 \cdot D_2 \leq TD \leq 0,60 \cdot D_2$. Dadurch kann eine besonders zuverlässige Verbindung des zweiten Werkstücks an das erste Werkstück erreicht werden. Es wird zum einen eine ausreichende Teildicke des zweiten Werkstücks aufgeschmolzen, um eine mechanische Mindestanbindung sicherzustellen.

Gleichzeitig wird auch nicht eine zu große Teildicke aufgeschmolzen, was die Gefahr eines Durchschweißens vermindert; eine Durchschweißung kann die Verbindung mechanisch aufgrund von Materialverlust schwächen. Zudem wird bei größeren Teildicken, insbesondere $TD > 0,5 \cdot D_2$, die mechanische Anbindung meist nicht mehr verbessert, es steigt aber der Energiebedarf des Schweißprozesses und gleichzeitig auch die Gefahr einer unerwünscht hohen Schmelzbaddynamik.

Besonders bevorzugt ist eine Variante, bei der das Laserschweißen so geführt wird, dass für eine Breite KB der Dampfkapillare an einer dem Laserstrahl zugewandter Oberfläche des ersten Werkstücks, gemessen quer zu einer Verlaufsrichtung der Schweißnaht, gilt:

$0,50 \leq KT/KB \leq 2,00$,

bevorzugt $0,75 \leq KT/KB \leq 1,50$,

insbesondere wobei für einen Fokusbereich FDQ des Laserstrahls quer zu einer Vorschubrichtung des Laserstrahls und einen Fokusbereich FDL des Laserstrahls entlang der Vorschubrichtung, jeweils gemessen in der Ebene der dem Laserstrahl zugewandten Oberfläche des ersten Werkstücks, gilt:

$0,8 \leq FDQ/FDL \leq 1,2$,

bevorzugt $0,9 \leq FDQ/FDL \leq 1,1$. Bei den angegebenen Aspektverhältnissen für KT/KB werden das gewünschte Übergangsschweißen und die damit einhergehenden Vorteile, insbesondere eine gleichmäßige Einschweißtiefe EST und eine hohe mögliche Vorschubgeschwindigkeit, am besten erreicht. Diese Aspektverhältnisse für KT/KB passen insbesondere gut, wenn $FDL \geq FDQ$. Zudem hat sich die Verwendung eines Lasers mit ungestrecktem Fokusprofil, beispielsweise mit näherungsweise Punktfokus, mit einem Aspektverhältnis FDQ/FDL um die 1 bewährt, insbesondere um die Schmelzbaddynamik gering zu halten. Oft gilt auch $0,50 \leq EST/B \leq 1,50$, bevorzugt $0,75 \leq EST/B \leq 1,25$.

Bevorzugt ist weiterhin eine Variante, bei der der Laserstrahl eine mittlere Wellenlänge λ aufweist,

mit $\lambda \leq 1200 \text{ nm}$,

bevorzugt wobei

5 a) $900 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1100 \text{ nm}$, insbesondere $\lambda=1030 \text{ nm}$ oder 1064 nm oder 1070 nm , oder

b) $500 \text{ nm} \leq \lambda \leq 600 \text{ nm}$, insbesondere $\lambda=515 \text{ nm}$, oder

c) $400 \text{ nm} \leq \lambda \leq 500 \text{ nm}$, insbesondere $\lambda=450 \text{ nm}$. Diese mittleren Laserwellenlängen eignen sich gut für das Verschweißen von dünnen Werkstücken wie

10 Stahlblechen.

Vorteilhaft ist weiterhin eine Variante, bei der der Laserstrahl eine mittlere Laserleistung P aufweist, mit

$60 \text{ W} \leq P \leq 1200 \text{ W}$,

15 bevorzugt $100 \text{ W} \leq P \leq 500 \text{ W}$. Mit diesen Laserleistungen lässt sich in der Praxis bei vielen Werkstücktypen das erfindungsgemäße Laserschweißen im Übergangsbereich gut umsetzen.

Bevorzugt ist weiterhin eine Variante, bei der der Laserstrahl in der Ebene der dem Laserstrahl zugewandten Oberfläche des ersten Werkstücks einen Fokusbereich FD aufweist, mit

$10 \mu\text{m} \leq FD \leq 100 \mu\text{m}$,

bevorzugt $14 \mu\text{m} \leq FD \leq 60 \mu\text{m}$,

besonders bevorzugt $25 \mu\text{m} \leq FD \leq 39 \mu\text{m}$. Diese Durchmesser können in der

25 Praxis gut dafür eingesetzt werden, dünne Werkstücke im Rahmen der Erfindung im Übergangsbereich zu verschweißen. Der Fokusbereich FD wird hier als ein maximaler Fokusbereich angenommen, wobei in der Regel $0,8 \leq FDQ/FDL \leq 1,2$, bevorzugt $0,9 \leq FDQ/FDL \leq 1,1$ gilt.

30 Bevorzugt ist weiterhin eine Variante, bei der für eine Breite B des aufgeschmolzenen Materials des ersten Werkstücks an dessen dem Laserstrahl zugewandter Oberfläche, gemessen quer zu einer Verlaufsrichtung der Schweißnaht, gilt:

$60 \mu\text{m} \leq B \leq 600 \mu\text{m}$,

bevorzugt $80\text{ }\mu\text{m} \leq B \leq 400\text{ }\mu\text{m}$,
besonders bevorzugt $100\text{ }\mu\text{m} \leq B \leq 200\text{ }\mu\text{m}$. In diesem Bereich kann mit den
dünnen Werkstücken eine gute mechanische Anbindung erreicht werden.

5 Besonders bevorzugt ist eine Variante, bei der gilt:

$D1 \leq 250\text{ }\mu\text{m}$ und $D2 \leq 250\text{ }\mu\text{m}$,

bevorzugt wobei $50\text{ }\mu\text{m} \leq D1 \leq 200\text{ }\mu\text{m}$ und $50\text{ }\mu\text{m} \leq D2 \leq 200\text{ }\mu\text{m}$,

besonders bevorzugt $75\text{ }\mu\text{m} \leq D1 \leq 100\text{ }\mu\text{m}$ und $75\text{ }\mu\text{m} \leq D2 \leq 100\text{ }\mu\text{m}$. Bei die-
sen Werkstückdicken haben sich in der Praxis sehr gute Schweißnahtqualitäten

10 bei hoher Schweißgeschwindigkeit erreichen lassen. In vielen Anwendungsfällen
gilt $D1=D2$ oder auch $0,8 \cdot D1 \leq D2 \leq 1,2 \cdot D1$, zumindest im Bereich der
Schweißnaht.

Bevorzugt ist auch eine Variante, bei der gilt:

15 $50\text{ }\mu\text{m} \leq EST \leq 600\text{ }\mu\text{m}$,

bevorzugt $60\text{ }\mu\text{m} \leq EST \leq 400\text{ }\mu\text{m}$,

besonders bevorzugt $75\text{ }\mu\text{m} \leq EST \leq 225\text{ }\mu\text{m}$. Diese Einschweißtiefen sind im
Rahmen der Erfindung sehr gut realisierbar, insbesondere auch sehr konstant
über die Länge der Schweißnaht. Die Einschweißtiefe EST schwankt bei einer er-
findungsgemäßen Verschweißung in der Regel weniger als 20%, meist weniger

20 als 10%, und oft weniger als 5% um ihren Mittelwert.

Vorteilhaft ist eine Variante, bei der der Laserstrahl mit einer Vorschubgeschwin-
digkeit v relativ zu den Werkstücken bewegt wird, mit

25 $v \geq 5\text{ m/min}$,

bevorzugt $v \geq 10\text{ m/min}$,

insbesondere wobei der Laserstrahl mit einem Laserscanner abgelenkt wird. Die
angegebenen hohen Vorschubgeschwindigkeiten (Schweißgeschwindigkeiten)

30 können im Rahmen der Erfindung in der Regel problemlos bei guter Schweiß-
nahtqualität eingerichtet werden, und gestatten eine hohe Fertigungseffizienz.

Bevorzugt ist auch eine Variante, bei der die beiden Werkstücke als gekrümmte Bleche ausgebildet sind, die während des Laserschweißens mit konvex gekrümmten Außenseiten aufeinander gepresst werden, so dass die Bleche in einer Kontaktzone durch elastische Verformung näherungsweise planparallel ausgerichtet sind und aneinander anliegen, wobei der Laserstrahl die beiden Bleche im Bereich dieser Kontaktzone entlang der Schweißnaht verschweißt, insbesondere wobei die beiden gekrümmten Bleche aus Stahl gefertigt sind. Durch dieses Vorgehen wird eine besonders robuste Verbindung der Werkstücke ermöglicht. Die elastische Verformung vermeidet oder minimiert einen Spalt (Leerraum) zwischen den Werkstücken während des Schweißprozesses, und die Verschweißung wird, trotz der Krümmung der Werkstücke im entspannten Zustand, über die gleiche Breite wie bei ebenen Werkstücken erreicht.

Vorteilhaft sich auch eine Variante, bei der die beiden Werkstücke als flexible Metallfolien ausgebildet sind. Beim Verschweißen der flexiblen Metallfolien kann mit der Erfindung eine sehr zuverlässige, robuste mechanische Verbindung erzeugt werden. Typischerweise werden die Folien während des Schweißens mit einem Stempel aufeinander gedrückt.

In den Rahmen der vorliegenden Erfindung fällt auch die Verwendung eines Verfahrens nach einem der vorhergehenden Ansprüche zum Verschweißen von durch die beiden Werkstücke ausgebildeten elektrischen Leitern und/oder Gasabdichtungen. Die Erfindung ermöglicht eine sehr zuverlässige Schweißverbindung der beiden Werkstücke, die hohen Anforderungen an Gasdichtigkeit (oder auch Flüssigkeitsdichtigkeit) gerecht wird, und niedrige elektrische (oder auch thermische) Übergangswiderstände zwischen den Werkstücken sicherstellen kann. Daher ist die Verwendung bei elektrischen Leitern und Gasabdichtungen besonders vorteilhaft. zi

Bei einer bevorzugten Variante der erfindungsgemäßen Verwendung sind die beiden Werkstücke Bipolarplatten einer Brennstoffzelle. Die Bipolarplatten einer Brennstoffzelle müssen in der Regel sowohl gasdicht verbunden sein (meist für

Sauerstoff) als eine gute elektrische Verbindung haben, um mit der Brennstoffzelle erzeugten Strom verlustarm weiterleiten zu können. Zudem weisen Bipolarplatten Dicken auf, die mit den erfindungsgemäßen Verfahren gut verbunden werden können.

5

Weitere Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der Beschreibung und der Zeichnung. Ebenso können die vorstehend genannten und die noch weiter ausgeführten Merkmale erfindungsgemäß jeweils einzeln für sich oder zu mehreren in beliebigen Kombinationen Verwendung finden. Die gezeigten und beschriebenen

10

Ausführungsformen sind nicht als abschließende Aufzählung zu verstehen, sondern haben vielmehr beispielhaften Charakter für die Schilderung der Erfindung.

Detaillierte Beschreibung der Erfindung und Zeichnung

- 5 Fig. 1a zeigt einen schematischen Querschnitt durch zwei Werkstücke, die mit dem erfindungsgemäßen Verfahren verschweißt werden, senkrecht zur Vorschubrichtung des Laserstrahls und auf Höhe der Dampfkapillare;
- 10 Fig. 1b zeigt eine schematische Schrägansicht auf die Werkstücke von Fig. 1a;
- 15 Fig. 2a zeigt einen schematischen Querschnitt durch zwei Werkstücke, die abweichend von der Erfindung mit Wärmeleitungsschweißen geschweißt werden;
- 20 Fig. 2b zeigt einen schematischen Querschnitt durch zwei Werkstücke, die gemäß der Erfindung im Übergangsbereich von Wärmeleitungsschweißen und Tiefschweißen geschweißt werden;
- 25 Fig. 2c zeigt einen schematischen Querschnitt durch zwei Werkstücke, die abweichend von der Erfindung mit Tiefschweißen geschweißt werden;
- 30 Fig. 3a zeigt einen schematischen Querschnitt durch zwei konvex gekrümmte Werkstücke, die gemäß der Erfindung verschweißt werden sollen;
- 30 Fig. 3b zeigt einen schematischen Querschnitt durch die Werkstücke von Fig. 3a, die im aufeinander gepressten, elastisch verformten Zustand gemäß der Erfindung verschweißt werden.

Die **Fig. 1a** in einem schematischen Querschnitt (senkrecht zu einer Vorschubrichtung VR und in der Mitte einer Dampfkapillare 1) und die **Fig. 1b** in einer schematischen Schrägansicht illustrieren eine beispielhafte Variante des erfin-

dungsgemäßen Verfahrens zum Laserschweißen zweier dünner Werkstücke W1, W2. Die Werkstücke W1, W2 sind zur Vereinfachung nur in einem Teilbereich dargestellt. Die Werkstücke W1, W2 können beispielsweise als flexible Folien ausgebildet sein.

5

Das erste Werkstück W1 und das zweite Werkstück W2 sind in einem Überlappungsbereich ÜB überlappend aufeinanderliegend angeordnet; hierfür können geeignete Haltewerkzeuge eingesetzt werden (z.B. Roboterarme oder Stempel, nicht näher dargestellt). Die Werkstücke W1, W2 besitzen im Überlappungsbe-

reich ÜB die Dicken D1 und D2, wobei hier die Dicken mit $D1=D2=100\text{ }\mu\text{m}$ gewählt sind. Die Werkstücke W1, W2 sind meist aus metallischem Material gefertigt. Die Dicken D1, D2 werden senkrecht zu einer Oberfläche 3 des ersten Werkstücks W1 gemessen.

10

15

Ein Laserstrahl 2 ist auf die Oberfläche 3 des ersten Werkstücks W1 gerichtet, um die Werkstücke W1, W2 im Überlappstoß miteinander zu verschweißen. Der Laserstrahl 2 wird dabei relativ zu den Werkstücken W1, W2 entlang der Vorschubrichtung VR bewegt, typischerweise mittels eines Laserscanners (nicht dargestellt), der beispielsweise mit einem mittels Piezoantrieb beweglichen Spiegel

ausgebildet ist. Der Laserstrahl 2 ist beispielsweise durch einen IR-Laser mit einer Wellenlänge von 1030 nm erzeugt. Der Laserstrahl 2 erzeugt dadurch eine Schweißnaht 4 mit einer Verlaufsrichtung VLR, die der Vorschubrichtung VR entspricht.

20

25

Der Laserstrahl 2 erzeugt hier im Material des ersten Werkstücks W1 die Dampfkapillare 1 (man beachte, dass die Dampfkapillare in anderen Varianten auch bis in das zweite Werkstück hinein reichen kann, wenn das zweite Werkstück deutlich dicker ist als das erste Werkstück, nicht dargestellt). Die Dampfkapillare 1 weist an der Oberfläche 3 des ersten Werkstücks W1 eine (maximale) Kapillarb-

breite KB auf, die recht genau dem in einer Querrichtung QR gemessenen (maximalen) Fokusbereich FDQ des Laserstrahls 2 entspricht. Die Querrichtung QR verläuft senkrecht zur Vorschubrichtung VR und in der Ebene der dem Laserstrahl 2 zugewandten Oberfläche 3 des ersten Werkstücks W1.

30

Der Laserstrahl 2 ist hier als ein kreisförmiger Punktfokus ausgebildet, so dass ein (maximaler) Fokusbereich FDL (auch genannt Fokusbereichsdurchmesser) entlang der Vorschubrichtung VR gleich dem Fokusbereichsdurchmesser FDQ (auch genannt Fokusbereichquerdurchmesser) in Querrichtung QR ist. Der Laserstrahl 2 weist hier einen richtungsunabhängigen, einheitlichen Fokusbereichsdurchmesser FD auf, was eine bevorzugte Variante darstellt.

Die Dampfkapillare 1 reicht bis zu einer Kapillartiefe KT hier in das Material des ersten Werkstücks W1 hinein. In der gezeigten Variante beträgt KT ungefähr 3/4 der Dicke D1, also ca. 75 µm.

Um die Dampfkapillare 1 herum wird das Material der Werkstücke W1, W2 aufgeschmolzen; es bildet sich also ein Schmelzbad 5 aus. Ausgehend von der Dampfkapillare 1 wird dabei das Material (in der in Fig. 1a gezeigten Querschnittsebene senkrecht zur Vorschubrichtung VR) in alle Richtungen gleichmäßig über eine näherungsweise einheitliche Schmelzbreite SB aufgeschmolzen. Die Schmelzbreite SB beträgt hier ca. 65 µm. Entsprechend wird das Material des zweiten Werkstücks W2 über eine Teildicke TD von hier ca. 40 µm aufgeschmolzen. Die Einschweißtiefe $EST = D1 + TD$, bis zu der ausgehend von der Oberfläche 3 das Material der Werkstücke W1, W2 insgesamt aufgeschmolzen wird, beträgt hier ca. 140 µm. Damit gilt hier ungefähr $KT = 0,54 * EST$.

In der gezeigten Variante hat außerdem die Dampfkapillare KB eine Kapillarbweite KB von ungefähr 50 µm, die in Querrichtung QR in der Ebene der Werkstückoberfläche 3 gemessen wird. Man beachte, dass die Kapillarbweite KB recht genau dem Fokusbereichsdurchmesser FDQ in Querrichtung QR entspricht. Entsprechend ist die Kapillartiefe KT ungefähr 1,5 mal so groß wie die Kapillarbweite KB, also ca. $KB/KT = 1,50$. Die Schweißnaht 4 besitzt eine Breite B (gemessen in Querrichtung QR) von hier ca. 180 µm, entsprechend der Summe $KB + 2 * SB$. Die Teildicke TD, über die in das zweite Werkstück W2 eingeschweißt wird, beträgt hier ungefähr 40% der gesamten Dicke D2, also $TD = 0,40 * D2$.

Insbesondere die Laserleistung des Laserstrahls 2, der Fokusbereichsdurchmesser FD des Laserstrahls 2 an der Werkstückoberfläche 3 und eine Vorschubgeschwindigkeit

(Schweißgeschwindigkeit) des Laserschweißens wurden so gewählt, dass sich die hier gezeigten Verhältnisse von Dampfkapillare 1, Schmelzbad 5 und Werkstückgeometrie einstellt, um das Laserschweißen im Übergangsregime zwischen Wärmeleitungsschweißen und Tiefschweißen auszuführen.

5

Die Figuren 2a, 2b und 2c geben einen Überblick über die Verhältnisse von Kapillartiefen KT und Einschweißtiefen EST sowie von Kapillarbreiten KB und Kapillartiefen KT beim Laserschweißen in unterschiedlichen Schweißregimen in Querschnitten senkrecht zur Vorschubrichtung (ähnlich Fig. 1a); im gezeigten Beispiel wird dabei von einer ungestreckten Fokusgeometrie des Laserstrahl 2 ausgegangen (mit $FDQ=FDL$, etwa mit einem kreisrunden Punktfokus/isotroper Laserstrahl). Die Fig. 2a illustriert ein typisches Wärmeleitungsschweißen (heat conduction welding), die Fig. 2b ein typisches erfindungsgemäßes Laserschweißen im Übergangsbereich (transition mode welding) und Fig. 2c ein typisches Laserschweißen im Tiefschweißbereich (deep penetration welding).

Beim Wärmeleitungsschweißen, wie in **Fig. 2a** dargestellt, erzeugt der Laserstrahl 2 eine nur sehr kleine, flache Dampfkapillare 1 mit einer geringen Kapillartiefe KT (oder sogar überhaupt keine merkliche Dampfkapillare, letzteres nicht dargestellt). Die erzeugte Einschweißtiefe EST beruht im Wesentlichen auf der Breite des Schmelzbades 5 bzw. der Schmelzbreite SB, wobei $EST=KT+SB$, also ist KT deutlich kleiner als SB. Man beachte, dass die Schmelzbreite SB^* am untersten Punkt der Dampfkapillare 1 in der Praxis mit der Schmelzbreite SB^{**} in der Werkstückoberfläche 3 sehr genau übereinstimmt, so dass im Folgenden die Schmelzbreite einheitlich mit SB bezeichnet wird. Im gezeigten Beispiel beträgt ca. $KT=0,23*EST$. Im Rahmen der Erfindung wird dem nicht gewünschten Wärmeleitregime der Bereich $KT<0,33*EST$ zugeordnet. Die Einschweißtiefe EST reicht nur minimal in das zweite Werkstück W2 hinein, hier mit ca. $TD=0,08*D2$.

Zudem ist im Wärmeleitregime (beim verwendeten isotropen Laserstrahl 2) zudem auch die Kapillartiefe KT deutlich kleiner als die Kapillarbreite KB. In Fig. 2a gilt ca. $KT/KB=0,30$. Im Rahmen der Erfindung wird dem nicht erwünschten Wärmeleitregime der Bereich $KT/KB<0,50$ zugeordnet.

30

Die **Fig. 2b** illustriert das erfindungsgemäße Laserschweißen im Übergangsbe-
reich. Der Laserstrahl 2 erzeugt eine mittelgroße Dampfkapillare 1. Die Ein-
schweißtiefe EST beruht zu ungefähr gleichen Teilen auf der Kapillartiefe KT der
Dampfkapillare 1 und der Schmelzbreite SB des Schmelzbades 5. Im gezeigten
5 Beispiel beträgt ca. $KT=0,5*EST$. Im Rahmen der Erfindung wird dem gewünsch-
ten Übergangsregime der Bereich $0,33 \leq KT/EST \leq 0,67$ zugeordnet. Die Ein-
schweißtiefe EST reicht deutlich in das zweite Werkstück W2 hinein, hier mit ca.
 $TD=0,6*D2$.

10 Im Übergangsregime ist zudem auch die Kapillartiefe KT ähnlich groß oder nur
wenig größer als die Kapillarbreite KB. In Fig. 2b gilt ca. $KT/KB=1,0$. Im Rahmen
der Erfindung (beim verwendeten isotropen Laserstrahl 2, oder zumindest wenn
 $FDQ \leq FDL$) wird dem gewünschten Laserschweißen im Übergangsregime der Be-
reich $0,50 \leq KT/KB \leq 2,00$ zugeordnet.

15 Die **Fig. 2c** illustriert schließlich das Laserschweißen im Tiefschweißregime. Der
Laserstrahl 2 erzeugt eine sehr große, tiefe Dampfkapillare 1. Die Einschweißtiefe
EST beruht im Wesentlichen auf der Kapillartiefe KT der Dampfkapillare 1. Im
gezeigten Beispiel beträgt ca. $KT=0,88*EST$. Im Rahmen der Erfindung wird dem
20 nicht gewünschten Tiefschweißregime der Bereich $KT > 0,67*EST$ zugeordnet. Die
Einschweißtiefe EST reicht hier durch fast das gesamte, zweite Werkstück W2
hindurch, hier mit ca. $TD=0,96*D2$ (in vielen Fällen kommt es im Tiefschweißre-
gime sogar zur Durchschweißung, also $TD=D2$, letzteres nicht dargestellt).

25 Im Tiefschweißregime (mit dem verwendeten isotropen Laserstrahls 2) ist zudem
auch die Kapillartiefe KT deutlich größer als die Kapillarbreite KB. In Fig. 2c gilt
ca. $KT/KB=2,1$. Im Rahmen der Erfindung wird dem nicht gewünschten Laser-
schweißen im Tiefschweißregime der Bereich $KT/KB > 2,0$ zugeordnet.

30 Die Kapillartiefe KT kann bei bekanntem Fokusdurchmesser FDQ in Querrichtung
QR (oder bekannter Kapillarbreite KB) leicht aus der Breite B der Schweißnaht
und der Einschweißtiefe EST ermittelt werden. B und EST sind im Schliffbild
(Querschliff wie in Fig. 2a-2c) einfach zu erkennen oder können auch in situ mit
Kamera und Ultraschall gut beobachtet werden. Aus B und FDQ (letzteres ent-

spricht KB) kann SB bestimmt werden mit $SB=(B-FDQ)/2$, und weiterhin $KT=EST-SB$.

Im Beispiel von Fig. 2a-2c ist D2 etwas größer als D1, oft gilt jedoch $D1=D2$.

5

Die **Fig. 3a** zeigt schematisch zwei Werkstücke W1, W2, die als gekrümmte Bleche, insbesondere Stahlbleche, ausgebildet sind, in einem schematischen Querschnitt senkrecht zur gewünschten Schweißnaht. Die beiden Werkstücke W1, W2 sind hier als Bipolarplatten für eine Brennstoffzelle ausgebildet. Man beachte, dass die Fig. 3a (ebenso wie die Fig. 3b) nur einen Teilbereich der Werkstücke W1, W2 zeigt, in welchem eine erfindungsgemäße Verschweißung erfolgen soll. Man beachte ebenfalls, dass die zwei Werkstücke W1, W2 gegebenenfalls auch mehrere Schweißnähte erhalten können (nicht dargestellt).

10

15

Die beiden Werkstücke W1, W2 besitzen einander zugewandte, konvex gekrümmte Außenseiten 31, 32. Legt man die beiden Werkstücke (Bleche) W1, W2 mit diesen gekrümmten Außenseiten aneinander, so kommt es lediglich zu einer Berührung entlang einer schmalen Kontaktlinie 30; im in Fig. 3a gezeigten Querschnitt senkrecht zu dieser Kontaktlinie 30 erscheint diese Kontaktlinie 30 als ein Punkt.

20

Eine Verschweißung der Werkstücke W1, W2 entlang dieser Kontaktlinie 30 wäre sehr schwierig, da der Bereich, der bei planparalleler Anlage normalerweise aufgeschmolzen würde, teilweise in einem oder mehreren V-förmigen Leerräumen 33 zwischen den Werkstückaußenseiten 31, 32 liegen würde; dadurch könnten leicht Lücken oder zumindest schwache Bereiche in der Schweißnaht entstehen.

25

Erfindungsgemäß werden die Werkstücke W1, W2 für das Verschweißen mit ihren konvexen Außenseiten 31, 32 aufeinander zu gedrückt (vgl. Pressrichtung 34), wodurch eine elastische Verformung der Außenseiten 31, 32 eintritt, vgl. **Fig. 3b**. Die konvexen Außenseiten 31, 32 werden dabei ein wenig flachgedrückt, und es bildet sich um die vormalige Kontaktlinie eine quer zur Pressrichtung ausge dehnte Kontaktzone 35 aus, in welcher die Werkstücke W1, W2 bzw. die Bleche

30

näherungsweise planparallel zueinander ausgerichtet sind und aneinander anliegen.

In diesem elastisch verformten Zustand der Werkstücke W1, W2 erfolgt das erfindungsgemäße Laserschweißen mit einem Laserstrahl 2, der auf die Werkstückoberfläche 3 des ersten Werkstücks W1 gerichtet ist. Die Vorschubrichtung des Laserstrahls 2 liegt hier senkrecht zur Zeichenebene der Fig. 3b. Der Laserstrahl 2 schmilzt das Material des ersten Werkstücks W1 über dessen volle Dicke D1 und das Material des zweiten Werkstücks W2 bis knapp zur Hälfte seiner Dicke D2 auf (vgl. z.B. Fig. 2b zu den Bedingungen des erfindungsgemäßen Übergangsregimes). Das Aufschmelzen des Werkstückmaterials findet innerhalb der Kontaktzone 35 statt, die gleichzeitig einen Überlappungsbereich ÜB der Werkstücke W1, W2 darstellt, in welchem die Werkstücke W1, W2 überlappend aufeinander liegen.

Man beachte, dass die elastische Verformung der Werkstücke W1, W2 bzw. die Kraft des Anpressens so stark gewählt ist, dass eine Kontaktbreite KOB der Kontaktzone 35 größer ist als die Breite B der Schweißnaht 4. Dadurch kann eine besonders hochwertige Schweißnaht 4 erhalten werden, vergleichbar der Qualität einer Verschweißung von zwei ebenen, aneinander liegenden Werkstücken (wie in Fig. 1a gezeigt). Die in Fig. 3b erhältliche Schweißnaht kann insbesondere gasdicht und mit einem niedrigen elektrischen Widerstand zwischen den Werkstücken W1, W2 gefertigt werden.

Nach dem Laserschweißen und ausreichender Abkühlung der Werkstücke W1, W2 wird die Presskraft wieder gelöst, und die Werkstücke W1, W2 federn näherungsweise in den in Fig. 3a gezeigten, elastisch entspannten Zustand zurück. Sie bleiben aber über die Breite B miteinander mit guter Nahtqualität verschweißt.

In einer bevorzugten Variante des erfindungsgemäßen Verfahrens kann eine Verschweißung insbesondere mit folgenden Parametern erfolgen:

- Werkstückdicken $D1=D2=75\mu\text{m}$;
- Einschweißtiefe $EST=112,5\mu\text{m}$;

- $FD=KB=31,5\text{ }\mu\text{m}$;
- $KT=47,5\text{ }\mu\text{m}$;
- $SB=65,25\text{ }\mu\text{m}$;
- $B=162\mu\text{m}$.

5 Somit gilt somit gilt hier $KT/KB=1,5$ und $KT=0,42*EST$ und $TD=0,5*D2$.

In einer anderen, bevorzugten Variante des erfindungsgemäßen Verfahrens kann eine Verschweißung insbesondere mit folgenden Parametern erfolgen:

- Werkstückdicken $D1=D2=75\mu\text{m}$;
- 10 - Einschweißtiefe $EST=112,5\text{ }\mu\text{m}$;
- $FD=KB=31,5\text{ }\mu\text{m}$;
- $KT=63\text{ }\mu\text{m}$;
- $SB=49,5\text{ }\mu\text{m}$;
- $B=130,5\text{ }\mu\text{m}$.

15 Somit gilt somit gilt hier $KT/KB=2,0$ und $KT=0,56*EST$ und $TD=0,5*D2$.

Bezugszeichenliste

	1	Dampfkapillare
	2	Laserstrahl
5	3	Werkstückoberfläche
	4	Schweißnaht
	5	Schmelzbad
	30	Kontaktlinie
	31	Außenseite (erstes Werkstück)
10	32	Außenseite (zweites Werkstück)
	33	Leerraum
	34	Pressrichtung
	35	Kontaktzone
	B	Breite der Schweißnaht
15	D1	Dicke erstes Werkstück
	D2	Dicke zweites Werkstück
	EST	Einschweißtiefe
	FD	(maximaler) Fokusdurchmesser
	FDL	(größter) Fokusdurchmesser in Vorschubrichtung
20	FDQ	(größter) Fokusdurchmesser in Querrichtung
	KB	Kapillarbreite
	KOB	Kontaktbreite
	KT	Kapillartiefe
	QR	Querrichtung
25	SB	Schmelzbreite
	SB*	Schmelzbreite (gemessen mittig unter der Dampfkapillare)
	SB**	Schmelzbreite (gemessen an der Werkstückoberfläche)
	TD	Teildicke
	ÜB	Überlappungsbereich
30	VLR	Verlaufsrichtung der Schweißnaht
	VR	Vorschubrichtung
	W1	erstes Werkstück
	W2	zweites Werkstück

Patentansprüche

1. Verfahren zum Laserschweißen zweier Werkstücke (W1, W2) entlang einer Schweißnaht (4),
5 wobei zumindest in einem Überlappbereich (ÜB) ein erstes Werkstück (W1) mit einer Dicke D1 und ein zweites Werkstück (W2) mit einer Dicke D2 überlappend aufeinander angeordnet werden,
wobei die Dicken D1, D2 der beiden Werkstücke (W1, W2) jeweils 400 µm oder weniger betragen,
10 wobei im Überlappbereich (ÜB) mit einem entlang der Schweißnaht (4) geführten Laserstrahl (2) von der Seite des ersten Werkstücks (W1) das Material des ersten Werkstücks (W1) über seine gesamte Dicke D1 und das Material des zweiten Werkstücks (W2) über lediglich eine Teildicke TD seiner gesamten Dicke D2 aufgeschmolzen werden,
15 und wobei das Laserschweißen so ausgeführt wird, dass der Laserstrahl (2) eine Dampfkapillare (1) erzeugt, die sich bis zu einer Kapillartiefe KT in das erste Werkstück (W1) oder in das erste und zweite Werkstück (W1, W2) hinein erstreckt, wobei gilt $0,33 \cdot EST \leq KT \leq 0,67 \cdot EST$, mit Einschweißtiefe $EST = D1 + TD$.
20
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass gilt $0,40 \cdot EST \leq KT \leq 0,60 \cdot EST$,
bevorzugt $0,45 \cdot EST \leq KT \leq 0,55 \cdot EST$.
- 25 3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass gilt $0,25 \cdot D2 \leq TD \leq 0,75 \cdot D2$,
bevorzugt $0,33 \cdot D2 \leq TD \leq 0,67 \cdot D2$,
besonders bevorzugt $0,40 \cdot D2 \leq TD \leq 0,60 \cdot D2$.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dass das Laserschweißen so geführt wird, dass für eine Breite KB der Dampfkapillare (1) an einer dem Laserstrahl (2) zugewandter Oberfläche (3) des ersten Werkstücks (W1), gemessen quer zu einer Verlaufsrichtung (VLR) der Schweißnaht (4), gilt:
- 5 $0,50 \leq KT/KB \leq 2,00$,
bevorzugt $0,75 \leq KT/KB \leq 1,50$,
insbesondere wobei für einen Fokusedurchmesser FDQ des Laserstrahls (2) quer zu einer Vorschubrichtung (VR) des Laserstrahls (2) und einen Fokusedurchmesser FDL des Laserstrahls (2) entlang der Vorschubrichtung (VR), jeweils gemessen in der Ebene der dem Laserstrahls (2) zugewandten Oberfläche (3) des ersten Werkstücks (W1), gilt:
- 10 $0,8 \leq FDQ/FDL \leq 1,2$,
bevorzugt $0,9 \leq FDQ/FDL \leq 1,1$.
- 15
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Laserstrahl (2) eine mittlere Wellenlänge λ aufweist, mit $\lambda \leq 1200$ nm,
bevorzugt wobei
- 20 a) $900 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1100 \text{ nm}$, insbesondere $\lambda=1030$ nm oder 1064 nm oder 1070 nm, oder
b) $500 \text{ nm} \leq \lambda \leq 600 \text{ nm}$, insbesondere $\lambda=515$ nm, oder
c) $400 \text{ nm} \leq \lambda \leq 500 \text{ nm}$, insbesondere $\lambda=450$ nm.
- 25
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Laserstrahl (2) eine mittlere Laserleistung P aufweist, mit
- $60 \text{ W} \leq P \leq 1200 \text{ W}$,
bevorzugt $100 \text{ W} \leq P \leq 500 \text{ W}$.
- 30
7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Laserstrahl (2) in der Ebene der dem Laserstrahl (2) zugewandten Oberfläche (3) des ersten Werkstücks (W1) einen Fokus-

durchmesser FD aufweist, mit
 $10\ \mu\text{m} \leq \text{FD} \leq 100\ \mu\text{m}$,
bevorzugt $14\ \mu\text{m} \leq \text{FD} \leq 60\ \mu\text{m}$,
besonders bevorzugt $25\ \mu\text{m} \leq \text{FD} \leq 39\ \mu\text{m}$.

5

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dass für eine Breite B des aufgeschmolzenen Materials des ersten Werkstücks (W1) an dessen dem Laserstrahl (2) zugewandter Oberfläche (3), gemessen quer zu einer Verlaufsrichtung (VLR) der Schweißnaht (4), gilt:

10

$60\ \mu\text{m} \leq B \leq 600\ \mu\text{m}$,
bevorzugt $80\ \mu\text{m} \leq B \leq 400\ \mu\text{m}$,
besonders bevorzugt $100\ \mu\text{m} \leq B \leq 200\ \mu\text{m}$.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass gilt:

15

$D1 \leq 250\ \mu\text{m}$ und $D2 \leq 250\ \mu\text{m}$,
bevorzugt wobei $50\ \mu\text{m} \leq D1 \leq 200\ \mu\text{m}$ und $50\ \mu\text{m} \leq D2 \leq 200\ \mu\text{m}$,
besonders bevorzugt $75\ \mu\text{m} \leq D1 \leq 100\ \mu\text{m}$ und $75\ \mu\text{m} \leq D2 \leq 100\ \mu\text{m}$.

20

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass gilt:

$50\ \mu\text{m} \leq \text{EST} \leq 600\ \mu\text{m}$,
bevorzugt $60\ \mu\text{m} \leq \text{EST} \leq 400\ \mu\text{m}$,
besonders bevorzugt $75\ \mu\text{m} \leq \text{EST} \leq 225\ \mu\text{m}$.

25

11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Laserstrahl (2) mit einer Vorschubgeschwindigkeit v relativ zu den Werkstücken (W1, W2) bewegt wird, mit

$v \geq 5\ \text{m/min}$,

30

bevorzugt $v \geq 10\ \text{m/min}$,

insbesondere wobei der Laserstrahl (2) mit einem Laserscanner abgelenkt

wird.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet,
dass die beiden Werkstücke (W1, W2) als gekrümmte Bleche ausgebildet
5 sind, die während des Laserschweißens mit konvex gekrümmten Außensei-
ten (31, 32) aufeinander gepresst werden, so dass die Bleche in einer Kon-
taktzone (35) durch elastische Verformung näherungsweise planparallel
ausgerichtet sind und aneinander anliegen, wobei der Laserstrahl (2) die
beiden Bleche im Bereich dieser Kontaktzone (35) entlang der Schweiß-
10 naht (4) verschweißt,
insbesondere wobei die beiden gekrümmten Bleche aus Stahl gefertigt
sind.
13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet,
15 dass die beiden Werkstücke (W1, W2) als flexible Metallfolien ausgebildet
sind.
14. Verwendung eines Verfahrens nach einem der vorhergehenden Ansprüche
zum Verschweißen von durch die beiden Werkstücke (W1, W2) ausgebilde-
20 ten elektrischen Leitern und/oder Gasabdichtungen.
15. Verwendung nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass die beiden
Werkstücke (W1, W2) Bipolarplatten einer Brennstoffzelle sind.

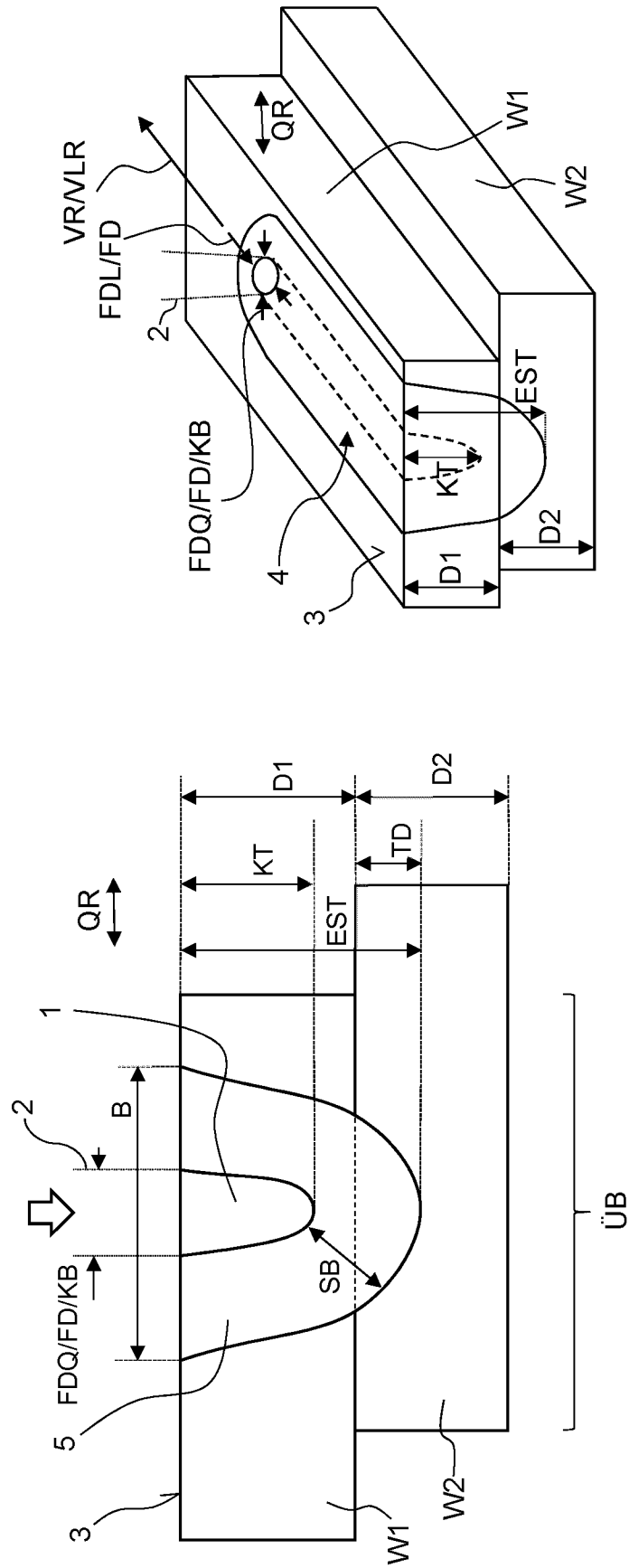
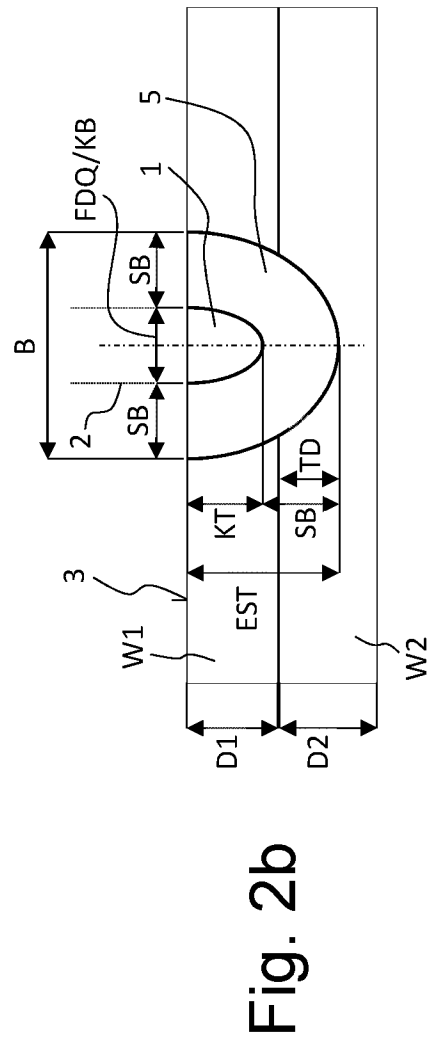
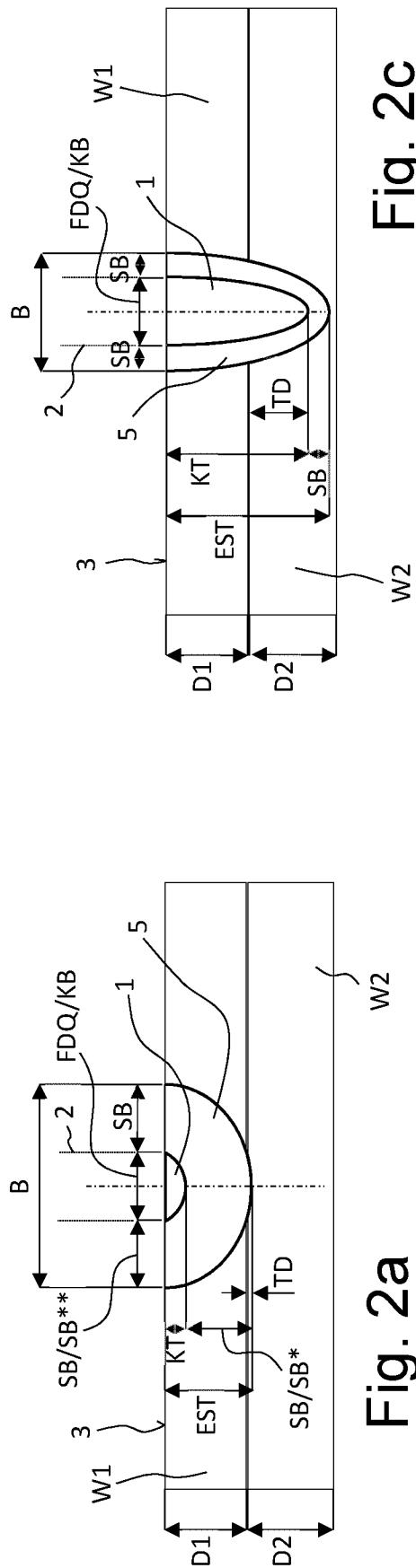


Fig. 1b

Fig. 1a



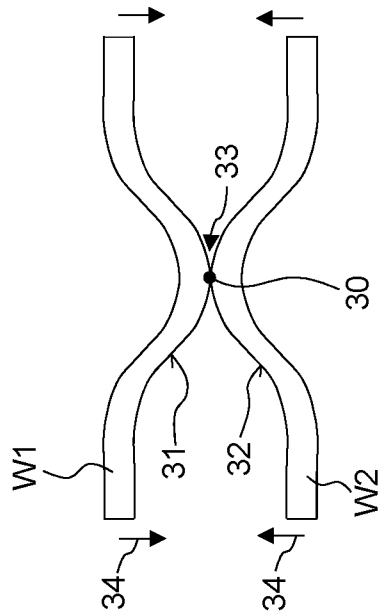


Fig. 3a

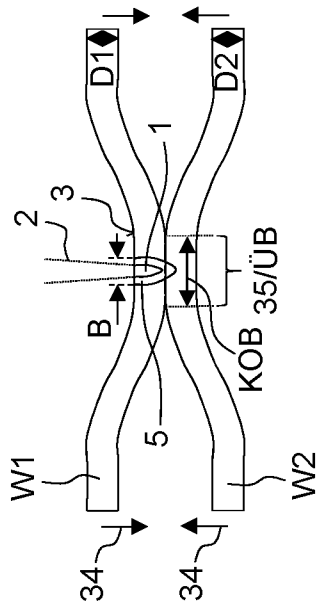


Fig. 3b

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2021/077776**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER****B23K 26/24**(2014.01)i; **B23K 26/26**(2014.01)i; **B23K 26/244**(2014.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

B23K

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 2018045232 A1 (CAPOSTAGNO DANIEL ANTHONY [US] ET AL) 15 February 2018 (2018-02-15) paragraph [0107] - paragraph [0110] paragraph [0148] - paragraph [0158] paragraph [0202]; figures 1-21	1-15
X	US 2019224781 A1 (YANG DAVID [CN] ET AL) 25 July 2019 (2019-07-25) paragraph [0040] - paragraph [0041] paragraph [0056] - paragraph [0057] figures 1-6	1-15



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

17 January 2022

Date of mailing of the international search report

25 January 2022

Name and mailing address of the ISA/EP

European Patent Office
p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk
Netherlands

Telephone No. (+31-70)340-2040

Facsimile No. (+31-70)340-3016

Authorized officer

Desvignes, Rémi

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/EP2021/077776

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
US	2018045232	A1	15 February 2018	CN	105855706	A	17 August 2016
				CN	107405725	A	28 November 2017
				CN	108406112	A	17 August 2018
				CN	112355473	A	12 February 2021
				CN	112355474	A	12 February 2021
				CN	205764438	U	07 December 2016
				EP	3256283	A2	20 December 2017
				JP	6822967	B2	27 January 2021
				JP	2018505058	A	22 February 2018
				JP	2020203315	A	24 December 2020
				KR	20170116123	A	18 October 2017
				US	2018045232	A1	15 February 2018
				WO	2016128704	A2	18 August 2016
US	2019224781	A1	25 July 2019	CN	110023026	A	16 July 2019
				DE	112016007229	T5	13 June 2019
				US	2019224781	A1	25 July 2019
				WO	2018072163	A1	26 April 2018

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES INV. B23K26/24 B23K26/26 B23K26/244 ADD.		
Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC		
B. RECHERCHIERTE GEBIETE Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole) B23K		
Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen		
Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe) EPO-Internal, WPI Data		
C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	US 2018/045232 A1 (CAPOSTAGNO DANIEL ANTHONY [US] ET AL) 15. Februar 2018 (2018-02-15) Absatz [0107] – Absatz [0110] Absatz [0148] – Absatz [0158] Absatz [0202]; Abbildungen 1-21 -----	1-15
X	US 2019/224781 A1 (YANG DAVID [CN] ET AL) 25. Juli 2019 (2019-07-25) Absatz [0040] – Absatz [0041] Absatz [0056] – Absatz [0057] Abbildungen 1-6 -----	1-15
☐ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen ☒ Siehe Anhang Patentfamilie		
* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen : "A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist "E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist "L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt) "O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht "P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist "T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist "X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden "Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist "&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist		
Datum des Abschlusses der internationalen Recherche		Absendedatum des internationalen Recherchenberichts
17. Januar 2022		25/01/2022
Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Bevollmächtigter Bediensteter Desvignes, Rémi

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2021/077776

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 2018045232 A1	15-02-2018	CN 105855706 A	17-08-2016
		CN 107405725 A	28-11-2017
		CN 108406112 A	17-08-2018
		CN 112355473 A	12-02-2021
		CN 112355474 A	12-02-2021
		CN 205764438 U	07-12-2016
		EP 3256283 A2	20-12-2017
		JP 6822967 B2	27-01-2021
		JP 2018505058 A	22-02-2018
		JP 2020203315 A	24-12-2020
		KR 20170116123 A	18-10-2017
		US 2018045232 A1	15-02-2018
		WO 2016128704 A2	18-08-2016

US 2019224781 A1	25-07-2019	CN 110023026 A	16-07-2019
		DE 112016007229 T5	13-06-2019
		US 2019224781 A1	25-07-2019
		WO 2018072163 A1	26-04-2018
