

(12)

## Patentschrift

(21) Anmeldenummer: A 50968/2021  
(22) Anmeldetag: 03.12.2021  
(45) Veröffentlicht am: 15.10.2024

(51) Int. Cl.: **B23K 20/12** (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:  
EP 1021270 A1  
EP 1738856 A1  
US 2006102699 A1  
WO 0128731 A1  
US 2012237788 A1

(73) Patentinhaber:  
Stirtec GmbH  
8141 Premstätten (AT)

(72) Erfinder:  
Figner Gunter Dipl.Ing.  
8043 Graz-Kroisbach (AT)  
Oppeneiger Lucas Dipl.Ing.  
8020 Graz (AT)  
Pfeiffer Christian Dipl.Ing.  
8010 Graz (AT)  
Caliskanoglu Ozan Dr.  
8010 Graz (AT)  
Weinberger Thomas Dipl.Ing. Dr.  
8047 Graz (AT)  
Rathner Roland Dr.  
8020 Graz (AT)

(74) Vertreter:  
WIRNSBERGER & LERCHBAUM  
Patentanwälte OG  
8700 Leoben (AT)

(54) **Verfahren zum Verbinden von Bauteilen durch Rührreibschweißen sowie Vorrichtung zur Durchführung eines solchen Verfahrens**

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Verbinden von Bauteilen (4) durch Rührreibschweißen, wobei ein Rührreibschweißwerkzeug (1) mit einem Pin und einer Schulter (3) um eine Rotationsachse (6) rotiert und entlang einer Vorschubrichtung (5) verfahren wird, um die Bauteile (4) zu verbinden, wobei ein Rührreibschweißwerkzeug (1) mit einer relativ zum Pin bewegbaren Schulter (3) eingesetzt wird und eine Rotationsgeschwindigkeit des Pins um die Rotationsachse (6) zumindest dem 1,15-fachen, vorzugsweise zumindest dem 1,5-fachen, insbesondere dem 2-fachen bis 12-fachen, der Rotationsgeschwindigkeit der Schulter (3) um die Rotationsachse (6) entspricht, wobei die Vorschubgeschwindigkeit zumindest 1,0 m/min, vorzugsweise 2,0 m/min bis 15 m/min, beträgt. Erfindungsgemäß ist vorgesehen, dass ein Verhältnis von Rotationsgeschwindigkeit des Pins (2),  $n_P$ , zur Rotationsgeschwindigkeit der Schulter (3),  $n_S$ , folgender Bedingung in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit,  $v$ , genügt:

$$A_1 \cdot v^2 + B_1 < \frac{n_P}{n_S} < A_2 \cdot v^2 + B_2$$

wobei die Konstanten  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $A_2$  und  $B_2$  folgende Werte aufweisen:

$$A_1 = 0,17 \text{ (min/m)}^2;$$

$$A_2 = 0,25 \text{ (min/m)}^2;$$

$$B_1 = 1;$$

$$B_2 = 1,8$$

Weiter betrifft die Erfindung eine Vorrichtung zur Durchführung eines solchen Verfahrens.

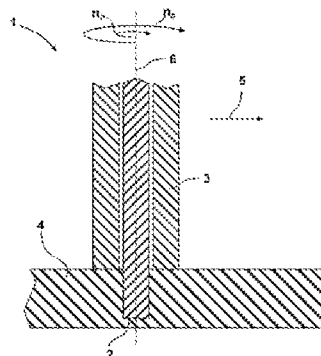


Fig. 1

## Beschreibung

### VERFAHREN ZUM VERBINDEN VON BAUTEILEN DURCH RÜHRREIBSCHWEIßEN SOWIE VORRICHTUNG ZUR DURCHFÜHRUNG EINES SOLCHEN VERFAHRENS

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Verbinden von Bauteilen durch Rührreibschweißen, wobei ein Rührreibschweißwerkzeug mit einem Pin und einer Schulter um eine Rotationsachse rotiert und entlang einer Vorschubrichtung verfahren wird, um die Bauteile zu verbinden.

**[0002]** Weiter betrifft die Erfindung eine Vorrichtung, welche zur Durchführung eines derartigen Verfahrens eingerichtet ist.

**[0003]** Verfahren und Vorrichtungen der eingangs genannten Art sind aus dem Stand der Technik wohlbekannt, sodass das Rührreibschweißen mittlerweile zu einem in der Industrie weit verbreiteten Schweißprozess zählt.

**[0004]** Die Dokumente EP 1 021 270 A1, EP 1 738 856 A1, US 2006/0102699 A1, WO 01/28731 A1 und US 2012/0237788 A1 offenbaren jeweils Verfahren sowie eine entsprechende Vorrichtung zum Rührreibschweißen.

**[0005]** Nachteilig bei gegenwärtig umgesetzten Rührreibschweißverfahren ist, dass nur vergleichsweise geringe Schweißgeschwindigkeiten erreicht werden. So hat sich gezeigt, dass ein Erhöhen einer Vorschubgeschwindigkeit ab etwa 1,0 m/min zu Schweißfehlern führt, weswegen eine industriell gewünschte Reduktion von Taktzeiten gegenwärtig prozessbedingt mit Rührreibschweißverfahren des Standes der Technik nicht möglich ist.

**[0006]** Hier setzt die Erfindung an. Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren der eingangs genannten Art anzugeben, mit welchem Bauteile durch Rührreibschweißen auch mit höheren Geschwindigkeiten auf qualitativ hochwertige Weise verbunden werden können.

**[0007]** Weiter soll eine Vorrichtung zur Durchführung eines entsprechenden Verfahrens angegeben werden.

**[0008]** Die erste Aufgabe wird erfindungsgemäß durch ein Verfahren der eingangs genannten Art gelöst, bei welchem ein Rührreibschweißwerkzeug mit einer relativ zum Pin bewegbaren Schulter eingesetzt wird und eine Rotationsgeschwindigkeit des Pins um die Rotationsachse zumindest dem 1,15-fachen, vorzugsweise zumindest dem 1,5-fachen, insbesondere dem 2-fachen bis 12-fachen, der Rotationsgeschwindigkeit der Schulter um die Rotationsachse entspricht, wobei die Vorschubgeschwindigkeit zumindest 1,0 m/min, vorzugsweise 2,0 m/min bis 15 m/min, beträgt, wobei ein Verhältnis von Rotationsgeschwindigkeit des Pins,  $n_P$ , zur Rotationsgeschwindigkeit der Schulter,  $n_S$ , folgender Bedingung in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit,  $v$ , genügt:

$$A_1 \cdot v^2 + B_1 < \frac{n_P}{n_S} < A_2 \cdot v^2 + B_2$$

wobei die Konstanten  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $A_2$  und  $B_2$  folgende Werte aufweisen:

$A_1 = 0,17 \text{ (min/m)}^2$ ;

$A_2 = 0,25 \text{ (min/m)}^2$ ;

$B_1 = 1$ ;

$B_2 = 1,8$ .

**[0009]** Im Rahmen der Erfindung wurde erkannt, dass Schweißfehler bei höheren Vorschubgeschwindigkeiten deshalb entstehen, weil zur Erreichung ähnlicher Prozesstemperaturen wie bei geringeren Vorschubgeschwindigkeiten mehr Wärme pro Zeiteinheit durch das Werkzeug erzeugt werden muss, jedoch ein Erhöhen der Drehzahl des Rührreibschweißwerkzeuges insbesondere im Bereich der Schulter zu Problemen führt, zumal dann im Schulterbereich ein Überhitzen erfolgt und zur Vermeidung eines unerwünschten Eintauchens des Werkzeuges in die zu verbindenden Bauteile ein Schmiededruck verringert werden müsste. Zur Erreichung einer erforderlichen Prozesstemperatur im Bereich des Pins wäre daher eine Drehzahl des Rührreib-

schweißwerkzeuges erforderlich, die zu unzulässig hohen Temperaturen im Bereich der Schulter und einem hohen Temperaturgradienten im Bereich einer Fügezone führen würde. Eine Asymmetrie einer Temperaturverteilung über eine Blechdicke der zu verschweißenden Bauteile, welche dazu führt, dass es im Bereich des Pins bzw. im Bereich einer Pinspitze tendenziell zu kalt und an einer Nahtoberseite tendenziell zu heiß ist, tritt auch bei niedrigen Vorschubgeschwindigkeiten auf, jedoch wird der Temperaturunterschied hier durch die Wärmeleitung in den zu verschweißenden Bauteilen bzw. in der Schweißnaht gut bis vollständig ausgeglichen.

**[0010]** Bei höheren Vorschubgeschwindigkeiten erfolgt ein derartiger Ausgleich nicht mehr, sondern steigt mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit ein Temperaturunterschied, der allein durch ein Erhöhen der Drehzahl des Rührreißschweißwerkzeuges nicht ausgeglichen werden kann, ohne dass Fehler in der Schweißnaht auftreten, weswegen eine maximale Vorschubgeschwindigkeit gegenwärtig bei konventionellen Rührreißschweißverfahren begrenzt ist.

**[0011]** Bei Durchführung eines erfindungsgemäßen Verfahrens wird somit diese Asymmetrie im Bereich der Temperaturverteilung auf einfache Weise vermieden, indem der Pin mit einer höheren Geschwindigkeit als die Schulter rotiert. Eine geringere Wärmeerzeugung im Bereich des Pins aufgrund eines geringeren Umfangs des Pins und einer kleineren Stirnfläche im Vergleich zur Schulterfläche wird somit durch eine höhere Umfangsgeschwindigkeit des Pins kompensiert. Durch die geringere Umfangsgeschwindigkeit der Schulter wird eine Gefahr einer Überhitzung an der Nahtoberseite reduziert bzw. vermieden und kann durch die reduzierte Temperatur im Bereich der Schulter die Schmiedekraft erhöht werden, ohne dass das Werkzeug in das Werkstück bzw. die zu verbindenden Bauteile eintaucht.

**[0012]** Als Schmiedekraft wird üblicherweise jene Kraft verstanden, mit welcher das Rührreißschweißwerkzeug axial bzw. parallel zur Rotationsachse gegen die zu verschweißenden Bauteile gepresst wird. Eine derartige Schmiedekraft bzw. Axialkraft wird in der Regel während des gesamten Schweißverfahrens aufgebracht und aufrechterhalten.

**[0013]** Bevorzugt ist bei einem erfindungsgemäßen Verfahren vorgesehen, dass die Vorschubgeschwindigkeit 1,5 m/min bis 10 m/min beträgt. Dadurch können besonders niedrige Taktzeiten gleichermaßen wie eine hohe Qualität der Schweißnaht erreicht werden.

**[0014]** Weiter ist bevorzugt vorgesehen, dass die Rotationsgeschwindigkeit des Pins um die Rotationsachse dem 2-fachen bis 12-fachen, insbesondere dem 3-fachen bis 8-fachen, vorzugsweise etwa dem 4-fachen, der Rotationsgeschwindigkeit der Schulter um die Rotationsachse entspricht. Auf diese Weise können sowohl im Bereich des Pins bzw. einer Nahtunterseite als auch im Bereich der Schulter bzw. einer Nahtoberseite günstige Temperaturen auch bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten von beispielsweise 2 m/min bis 10 m/min erreicht werden, wodurch Schweißfehler vermieden werden können.

**[0015]** Im Rahmen der Erfindung wurde erkannt, dass ein Verhältnis von Rotationsgeschwindigkeit der Schulter zur Rotationsgeschwindigkeit des Pins bevorzugt abhängig von der Vorschubgeschwindigkeit gewählt wird. Diesbezüglich ist erfindungsgemäß vorgesehen, dass ein Verhältnis von Rotationsgeschwindigkeit des Pins (Formelzeichen:  $n_P$ ) zur Rotationsgeschwindigkeit der Schulter (Formelzeichen:  $n_S$ ) folgender Bedingungen in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit (Formelzeichen:  $v$ ) genügt:

$$A_1 \cdot v^2 + B_1 < \frac{n_P}{n_S} < A_2 \cdot v^2 + B_2$$

wobei die Konstanten  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $A_2$  und  $B_2$  folgende Werte aufweisen:

$A_1 = 0,17 \text{ (min/m)}^2$ ;

$A_2 = 0,25 \text{ (min/m)}^2$ ;

$B_1 = 1$ ;

$B_2 = 1,8$ .

**[0016]** Ein Bereich eines bevorzugten Verhältnisses von Rotationsgeschwindigkeit des Pins zur Rotationsgeschwindigkeit der Schulter steigt somit im Allgemeinen etwa quadratisch mit der Vorschubgeschwindigkeit.

**[0017]** Darüber hinaus hat sich überraschender Weise gezeigt, dass ein Verhältnis von Rotationsgeschwindigkeit des Pins ( $n_P$ ) zur Rotationsgeschwindigkeit der Schulter ( $n_S$ ) besonders bevorzugt in einem Bereich der Vorschubgeschwindigkeit ( $v$ ) von 4 m/min bis 10 m/min derart gewählt wird, dass sich ein mehr als quadratischer Zusammenhang zwischen der Vorschubgeschwindigkeit und dem Verhältnis von Geschwindigkeit des Pins zur Geschwindigkeit der Schulter ergibt. Diesbezüglich ist es besonders günstig, wenn ein Verhältnis von Rotationsgeschwindigkeit des Pins ( $n_P$ ) zu Rotationsgeschwindigkeit der Schulter ( $n_S$ ) für eine Vorschubgeschwindigkeit ( $v$ ) von 4 m/min bis 10 m/min folgender Bedingung in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit ( $v$ ) genügt:

$$C_1 \cdot (v - D)^{2,15} + E_1 < \frac{n_P}{n_S} < C_2 \cdot (v - D)^{2,15} + E_2$$

wobei die Konstanten  $C_1$ ,  $D$ ,  $E_1$ ,  $C_2$  und  $E_2$  folgende Werte aufweisen:

$C_1 = 0,6 \text{ (min/m)}^{2,15}$ ;

$C_2 = 0,6 \text{ (min/m)}^{2,15}$ ;

$D = 4 \text{ m/min}$ ;

$E_1 = 3 \text{ bis } 5$ , insbesondere 4;

$E_2 = 6 \text{ bis } 8$ , insbesondere 7.

**[0018]** Dieser überraschend gefundene Zusammenhang, in welchem die Vorschubgeschwindigkeit mehr als quadratisch eingeht, könnte physikalisch dadurch begründet sein, dass die Wärmeerzeugung quadratisch mit der Geschwindigkeit ansteigt und darüber hinaus auch eine Temperatur unmittelbar vor dem Rührreibschweißwerkzeug umso geringer ist, je höher die Vorschubgeschwindigkeit ist. Insbesondere für den Bereich der Vorschubgeschwindigkeit von 4 m/min bis 10 m/min kann somit bei entsprechender Wahl des Geschwindigkeitsverhältnisses eine besonders hohe Qualität bei gleichzeitig geringer Taktzeit erreicht werden.

**[0019]** Bevorzugt ist vorgesehen, dass zumindest eines der Bauteile vorzugsweise beide Bauteile, aus Aluminium oder einer Aluminium-Legierung, insbesondere aus einer Aluminium-Legierung mit einem Siliciumanteil von mehr als 2 %, bestehen.

**[0020]** Es hat sich als günstig erwiesen, wenn die Rotationsgeschwindigkeit des Pins 6.000 U/min bis 8.000 U/min beträgt. Dadurch ist es möglich, Bauteile durch Rührreibschweißen in qualitativ hochwertiger Weise zu verbinden, wobei Vorschubgeschwindigkeiten von beispielsweise 10 m/min möglich sind.

**[0021]** Weiter hat es sich bewährt, dass ein Rührreibschweißwerkzeug eingesetzt wird, welches einen Pin aufweist, der aus einem Material mit einer Härte von zumindest 70 HRC besteht. Dadurch kann insbesondere ein abrasiver Verschleiß am Pin erheblich reduziert werden. So hat sich insbesondere bei Aluminiumlegierungen mit einem Legierungsbestandteil von Silicium von mehr als 2 % gezeigt, dass ein hoher abrasiver Verschleiß auf den Pin wirkt, welcher durch Wahl eines Pins aus einem Material mit entsprechender Härte wesentlich reduziert werden kann.

**[0022]** Darüber hinaus ist es günstig, wenn ein Rührreibschweißwerkzeug eingesetzt wird, welches einen Pin aufweist, der aus einem Material mit einer Biegefestigkeit von zumindest 1.700 N/mm<sup>2</sup> besteht. So hat sich gezeigt, dass bei erhöhter Vorschubgeschwindigkeit auch eine Biegebeanspruchung auf den Pin höher ist und durch Wahl eines Materials mit entsprechender Biegefestigkeit ein Brechen des Pins vermieden werden kann.

**[0023]** Um ein unerwünschtes Brechen des Pins besonders zuverlässig auch bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten zu vermeiden, ist es besonders günstig, wenn ein Rührreibschweißwerkzeug eingesetzt wird, welches einen Pin aufweist, der aus einem Material mit einer Bruchzähigkeit von zumindest 8,3 MNm<sup>-3/2</sup> besteht.

**[0024]** Entsprechende Kennwerte können mit unterschiedlichsten Materialien erreicht werden. Besonders günstig ist es, wenn ein Rührreibschweißwerkzeug eingesetzt wird, welches einen Pin aufweist, der aus einem Vollhartmetall, einer hochabrasiven Legierung und/oder einer Keramik, insbesondere kubischem Bornitrid oder polykristallinem kubischen Bornitrid, besteht.

**[0025]** Besonders günstig ist es, wenn der Pin in einem oberflächennahen Bereich mechanisch und chemisch günstige Eigenschaften aufweist. Es kann daher vorteilhaft sein, wenn ein Rührreibschweißwerkzeug eingesetzt wird, welches einen Pin aufweist, der eine Beschichtung, insbesondere eine CVD-Beschichtung und/oder eine PVD-Beschichtung, aufweist.

**[0026]** Es hat sich bewährt, dass ein Rührreibschweißwerkzeug eingesetzt wird, welches eine Schulter aufweist, die eine geringere Härte als der Pin des Rührreibschweißwerkzeuges aufweist. So tritt im Bereich der Schulter eine Kombination von abrasivem und adhäsivem Verschleiß auf, weswegen ein Werkstoff mit geringerer Härte im Bereich der Schulter ausreichend sein kann.

**[0027]** Günstig ist es, wenn ein Rührreibschweißwerkzeug eingesetzt wird, welches eine Schulter aufweist, die eine Härte von zumindest 50 HRC aufweist. Die Schulter kann beispielsweise durch ein Hartmetall, eine Keramik oder dergleichen gebildet sein.

**[0028]** Vorteilhaft ist es, wenn eine Drehzahl des Pins während des Verfahrens geändert wird, wobei jedoch ein Drehmoment, mit welchem der Pin angetrieben wird, und/oder ein Drehmoment, mit welchem die Schulter angetrieben wird, im Wesentlichen konstant bleiben. Beim herkömmlichen Rührreibschweißen muss bei zunehmender Vorschubgeschwindigkeit eine Drehzahl des Werkzeuges erhöht werden, um bei kürzerer Verweildauer an einem Punkt der Schweißnaht eine gleich große Energiemenge einbringen zu können. Dabei hat sich gezeigt, dass durch die höhere Rotationsgeschwindigkeit des Werkzeuges eine Fluidität des Materials in der Rührzone erhöht wird, sodass ein Reibwert reduziert wird bzw. das Werkzeug mehr „rutscht“. Entsprechend sinkt beim klassischen Rührreibschweißen bei zunehmender Rotationsgeschwindigkeit, gleichbleibender Vorschubgeschwindigkeit und gleichbleibendem Anpressdruck des Werkzeuges an die zu verschweißenden Bauteile ein Drehmoment aufgrund eines abnehmenden Reibwertes, wodurch eine weitere Erhöhung der Drehzahl erforderlich ist, um eine erforderliche Energiemenge einbringen zu können, zumal die eingebrachte Leistung durch ein Produkt aus Drehmoment und Drehzahl definiert ist. Dies erhöht wiederum die Fluidität in der Rührzone und reduziert den Reibwert weiter, weswegen beim klassischen Rührreibschweißen die Rotationsgeschwindigkeit und somit auch die Vorschubgeschwindigkeit nur in engen Grenzen erhöht werden kann.

**[0029]** Das erfindungsgemäße Verfahren kann aufgrund der relativ zur Drehzahl des Pins geringeren Drehzahl der Schulter dazu genutzt werden, eine unerwünschte Erhöhung der Fluidität des Materials in der Rührzone zu vermeiden, sodass eine ungünstige Reibwertreduktion vermieden werden kann. Dadurch ist es bei entsprechender Wahl von Rotationsgeschwindigkeit des Pins und Rotationsgeschwindigkeit der Schulter möglich, einen andernfalls nur bei geringen Rotationsgeschwindigkeiten erzielbaren hohen Reibwert auch bei höheren Rotationsgeschwindigkeiten des Pins aufrechtzuerhalten, wodurch auch bei entsprechend hoher Rotationsgeschwindigkeit des Pins ein hohes Drehmoment aufrechterhalten werden kann. Dadurch kann auch eine höhere Vorschubgeschwindigkeit umgesetzt werden, weswegen mit einem solchen Verfahren eine hohe Schweißgeschwindigkeit bei gleichbleibend hoher Qualität erreicht wird.

**[0030]** Entsprechend ist es vorteilhaft, wenn eine Drehzahl des Pins während des Verfahrens geändert wird, wobei jedoch ein Drehmoment, mit welchem der Pin angetrieben wird, und/oder ein Drehmoment, mit welchem die Schulter angetrieben wird, im Wesentlichen konstant bleiben.

**[0031]** Das Verfahren kann somit beispielsweise derart geregelt werden, dass bei gleichbleibender Anpresskraft, mit welcher das Rührreibschweißwerkzeug axial gegen die zu verbindenden Bauteile gepresst wird, und gleichbleibender Vorschubgeschwindigkeit Rotationsgeschwindigkeit von Pin und/oder Schulter erhöht werden, bis ein Abfall des Drehmomentes des Pins und/oder der Schulter erkannt wird, welcher auf ein Rutschen des Rührreibschweißwerkzeuges bzw. einen Abfall des Reibwertes hinweist, wonach insbesondere die Rotationsgeschwindigkeit der Schulter reduziert wird, bis das Drehmoment des Pins und/oder das Drehmoment der Schulter wieder ansteigt bzw. einen Sollwert erreicht.

**[0032]** Alternativ oder ergänzend kann auch die Vorschubgeschwindigkeit oder der Anpressdruck variiert werden, sodass diese Parameter insbesondere automatisiert durch eine Regelung geändert werden, in welcher Regelung gemessenes Drehmoment von Pin und/oder Schulter Regel-

größen sind, welche mit Sollwerten verglichen werden. Eine Abweichung der gemessenen Drehmomente von den jeweiligen Sollwerten bewirkt somit eine Änderung von einem oder mehreren dieser Parameter.

**[0033]** Basierend auf der Erkenntnis, dass durch eine gegenüber der Rotationsgeschwindigkeit des Pins reduzierte Rotationsgeschwindigkeit der Schulter eine Reibwertreduktion zwischen Rührreibschweißwerkzeug und den Bauteilen reduziert werden kann, kann das erfindungsgemäße Verfahren auch in der Weise geregelt werden, dass durch ein Anpassen der Rotationsgeschwindigkeit der Schulter und/oder des Pins ein Absinken des Reibwertes zuverlässig vermieden wird. Der Reibwert kann somit mittelbar über die Drehmomente erfasst werden. Es ist daher vorteilhaft, wenn ein Drehmoment, mit welchem die Schulter angetrieben wird, und ein Drehmoment, mit welchem der Pin angetrieben wird, erfasst werden, vorzugsweise kontinuierlich während des Verfahrens. Hierzu können Sensoren, insbesondere Dehnmessstreifen, Drehmomentaufnehmer oder dergleichen, vorgesehen sein. Grundsätzlich kann das Drehmoment auch über einen elektrischen Strom eines Motors bzw. einer Spindel, welche den Pin oder die Schulter antreibt, erfasst werden.

**[0034]** Basierend auf entsprechend gemessenen Drehmomenten ist weiter bevorzugt vorgesehen, dass das Drehmoment, mit welchem die Schulter angetrieben wird, und/oder das Drehmoment, mit welchem der Pin angetrieben wird, kontinuierlich erfasst sowie mit einem Sollwert verglichen wird und die Rotationsgeschwindigkeit der Schulter reduziert wird, wenn ein Betrag des Drehmomentes, mit welchem die Schulter angetrieben wird, und/oder ein Betrag des Drehmomentes, mit welchem der Pin angetrieben wird, weniger als 90 %, vorzugsweise weniger als 80 %, insbesondere weniger als 70 %, des Sollwertes beträgt. Auf diese Weise kann automatisiert auf einen Reibwertabfall in der Rührzone mit einer Reduktion der Drehzahl der Schulter reagiert werden, um ein unerwünschtes Rutschen des Rührreibschweißwerkzeuges in der Rührzone zu vermeiden. Das Verfahren gewährleistet somit abhängig von den lokalen Bedingungen in der Rührzone eine maximal mögliche Geschwindigkeit.

**[0035]** Es versteht sich, dass unterschiedliche Sollwerte für das Drehmoment, mit welchem der Pin angetrieben wird, und das Drehmoment, mit welchem die Schulter angetrieben wird, vorgesehen sein können.

**[0036]** Basierend auf einem oder mehreren Sollwerten für das Drehmoment des Pins und das Drehmoment der Schulter kann natürlich auch eine Rotationsgeschwindigkeit erhöht werden. In dem Zusammenhang ist bevorzugt vorgesehen, dass das Drehmoment, mit welchem die Schulter angetrieben wird, und/oder das Drehmoment, mit welchem der Pin angetrieben wird, kontinuierlich erfasst sowie mit einem Sollwert verglichen wird und die Rotationsgeschwindigkeit der Schulter erhöht wird, wenn ein Betrag des Drehmomentes, mit welchem die Schulter angetrieben wird, und/oder ein Betrag des Drehmomentes, mit welchem der Pin angetrieben wird, mehr als 110 %, vorzugsweise mehr als 120 %, insbesondere mehr als 130 %, des Sollwertes beträgt. Eine Erhöhung der Rotationsgeschwindigkeit der Schulter erhöht eine Fluidität in der Rührzone und führt somit zu einer Reduktion des Reibwertes, weswegen das Drehmoment bei steigender Drehzahl absinkt. Auch hier können natürlich unterschiedliche Sollwerte für das Drehmoment, mit welchem der Pin angetrieben wird, und das Drehmoment, mit welchem die Schulter angetrieben wird, vorgesehen sein.

**[0037]** Um ein über einen Abfall des Drehmomentes erfasstes Rutschen des Rührreibschweißwerkzeuges in der Rührzone zu reduzieren oder zu vermeiden, kann grundsätzlich sowohl die Rotationsgeschwindigkeit des Pins als auch die Rotationsgeschwindigkeit der Schulter reduziert werden. Um auch bei hoher Vorschubgeschwindigkeit eine gute Verrührung und damit eine hohe Schweißnahtqualität zu erreichen, ist bevorzugt vorgesehen, dass die Rotationsgeschwindigkeit des Pins nicht oder in einem geringeren Ausmaß als die Rotationsgeschwindigkeit der Schulter geändert wird. Anders ausgedrückt wird bevorzugt eine Reduktion des Reibwertes in der Rührzone durch eine Variation der Drehzahl der Schulter vermieden bzw. eine Temperatur in der Rührzone im Wesentlichen über die Drehzahl der Schulter eingestellt, sodass der Pin im Wesentlichen für das Verrühren der Bauteile in der Rührzone eingesetzt werden kann.

**[0038]** Die gemessenen Drehmomente können auch dazu genutzt werden, die Vorschubgeschwindigkeit zu regeln, wobei die Vorschubgeschwindigkeit als unabhängige Größe und das Drehmoment des Pins und/oder das Drehmoment der Schulter als abhängige Größen in die Regelung eingehen. Dabei kann vorgesehen sein, dass eine Vorschubgeschwindigkeit bei gleichbleibender Rotationsgeschwindigkeit von Pin und Schulter erhöht wird, solange ein Betrag des Drehmomentes, mit welchem die Schulter angetrieben wird, und/oder ein Betrag des Drehmomentes, mit welchem der Pin angetrieben wird, um weniger als 30 %, insbesondere weniger als 20 %, vorzugsweise weniger als 10 %, von einem Sollwert abweicht.

**[0039]** Der Sollwert entspricht üblicherweise einem Wert des Drehmomentes, bei welchem eine hohe Qualität der Schweißnaht erreicht werden kann und kann beispielsweise im Rahmen von Experimenten oder rechnerisch ermittelt werden.

**[0040]** Somit kann über die Änderung der Vorschubgeschwindigkeit zur Regelung der gemessenen Drehmomente auf einen oder mehrere definierte Sollwerte, welche somit üblicherweise als von der Vorschubgeschwindigkeit abhängige Regelgröße in die Regelung eingehen, sichergestellt werden, dass auch bei hoher Vorschubgeschwindigkeit günstige Bedingungen im Bereich der zu bildenden Schweißnaht bzw. in der Rührzone gewährleistet sind.

**[0041]** Das gemessene Drehmoment kann auch dazu genutzt werden, den Zustand des Rührreißschweißwerkzeuges zu bestimmen. Einerseits kann bei einem beschichteten Rührreißschweißwerkzeuges ein Verbrauch der Beschichtung durch eine Reibwertänderung eine Änderung des Drehmomentes bei sonst gleichen Umgebungsbedingungen bewirken.

**[0042]** Andererseits kann ein durch zunehmenden Verschleiß größerer Spalt zwischen Pin und Schulter ebenfalls ein höheres Drehmoment bewirken, wenn Pin und Schulter unterschiedliche Drehzahlen aufweisen, zumal sich bei einem größeren Spalt mehr Material, insbesondere Aluminium von zu verbindenden Bauteilen, im Spalt ansammeln kann, welches eine höhere Reibung zwischen Pin und Schulter verursacht. Es kann daher günstig sein, wenn anhand des gemessenen Drehmomentes und/oder anhand einer gemessenen Drehmomentänderung auf einen Werkzeugverschleiß geschlossen und das Rührreißschweißwerkzeug bei Überschreiten eines vordefinierten Verschleißes getauscht wird.

**[0043]** Die weitere Aufgabe wird erfindungsgemäß durch eine Vorrichtung der eingangs genannten Art gelöst, bei welcher der Pin des Rührreißschweißwerkzeuges relativ zur Schulter um eine Rotationsachse des Rührreißschweißwerkzeuges rotierbar ist, wobei das Rührreißschweißwerkzeug mit einer Vorschubgeschwindigkeit von zumindest 1,0 m/min, vorzugsweise 1,5 m/min bis 15 m/min, entlang einer Vorschubrichtung bewegbar und der Pin mit einer Rotationsgeschwindigkeit um die Rotationsachse antreibbar ist, welche zumindest dem 1,15-fachen, vorzugsweise zumindest dem 1,5-fachen, insbesondere dem 2-fachen bis 12-fachen, der Rotationsgeschwindigkeit der Schulter um die Rotationsachse entspricht.

**[0044]** Dies ermöglicht die Herstellung von Schweißnähten durch Rührreißschweißen mit hoher Geschwindigkeit und gleichzeitig hoher Qualität. Üblicherweise wird die Vorrichtung zur Durchführung eines erfindungsgemäßen Verfahrens eingesetzt. Pin und Schulter sind somit gesonderte Bauteile, die mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten um die Rotationsachse angetrieben werden können. In der Regel sind Pin und Schulter etwa zylindrisch ausgebildet und koaxial angeordnet und werden synchron entlang der Vorschubrichtung bewegt. Weiter werden Pin und Schulter üblicherweise mit etwa gleicher Kraft axial bzw. entlang der Rotationsachse auf die zu verbindenden Bauteile gepresst, wenngleich grundsätzlich auch vorgesehen sein kann, dass Pin und Schulter mit unterschiedlichen Kräften bzw. unterschiedlichen Drücken auf die zu verschweißen Bauteile gepresst werden.

**[0045]** Konstruktiv kann eine unterschiedliche Geschwindigkeit von Pin und Schulter auf unterschiedlichste Weisen erreicht werden. Bevorzugt ist vorgesehen, dass Pin und Schulter über ein Getriebe, insbesondere ein Planetengetriebe, verbunden sind. Das Planetengetriebe kann eine starre oder variable Übersetzung zwischen Pin und Schulter, welche mit unterschiedlichen Ausgängen des Planetengetriebes verbunden sein können, aufweisen, um ein Übersetzungsverhält-

nis an eine Vorschubgeschwindigkeit anpassen zu können.

**[0046]** Darüber hinaus kann auch vorgesehen sein, dass die Vorrichtung dazu eingerichtet ist, Pin und Schulter des Rührreibschweißwerkzeuges unabhängig voneinander mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten anzutreiben. Dies kann beispielsweise mittels eines Getriebes als auch mit gesonderten Antrieben erfolgen. Besonders günstig ist es, wenn eine gesonderte Spindel für den Pin und eine gesonderte Spindel für die Schulter vorgesehen sind, um Pin und Schulter unabhängig voneinander anzutreiben. Die beiden Spindeln können dann durch unterschiedliche Motoren der Vorrichtung angetrieben sein, wobei üblicherweise eine Steuerungseinrichtung vorgesehen ist, um ein Übersetzungsverhältnis zwischen einer Rotationsgeschwindigkeit des Pins und einer Rotationsgeschwindigkeit der Schulter entsprechend definieren zu können, vorzugsweise abhängig von der Vorschubgeschwindigkeit gemäß den oben angegebenen mathematischen Bedingungen.

**[0047]** Wie ausgeführt kann es günstig sein, das Verfahren abhängig von Drehmomenten, mit welchen der Pin und/oder die Schulter angetrieben werden, zu regeln, wobei Drehzahl von Pin, Drehzahl der Schulter, Anpresskraft des Werkzeuges an die zu verschweißenden Bauteile und/oder eine Vorschubkraft geändert werden können, um Drehmomente innerhalb vordefinierter Grenzen um einen Sollwert zu erreichen. Es ist daher günstig, wenn Sensoren vorgesehen sind, mit welchen ein Drehmoment, mit welchem die Schulter angetrieben wird, und ein Drehmoment, mit welchem der Pin angetrieben wird, erfassbar sind.

**[0048]** Üblicherweise ist die Vorrichtung zur Regelung der Rotationsgeschwindigkeit der Schulter und/oder zur Regelung der Rotationsgeschwindigkeit des Pins in Abhängigkeit der gemessenen Drehmomente eingerichtet.

**[0049]** Weiter kann vorgesehen sein, dass die Vorrichtung zur Veränderung bzw. Regelung der Vorschubgeschwindigkeit und/oder der Anpresskraft, mit welcher das Rührreibschweißwerkzeug axial an die zu verschweißenden Bauteile gepresst wird, in Abhängigkeit der gemessenen Drehmomente eingerichtet ist.

**[0050]** Hierzu ist bevorzugt eine Datenverarbeitungseinrichtung vorgesehen, mit welcher eine Rotationsgeschwindigkeit des Pins, eine Rotationsgeschwindigkeit der Schulter, eine Vorschubgeschwindigkeit und/oder die Anpresskraft geändert werden können und welche mit den Sensoren, mit welchen die Drehmomente erfasst werden, verbunden ist.

**[0051]** Weitere Merkmale, Vorteile und Wirkungen der Erfindung ergeben sich anhand des nachfolgend dargestellten Ausführungsbeispiels. In der Zeichnung, auf welche dabei Bezug genommen wird, zeigt:

**[0052]** Fig. 1 eine Schnittdarstellung durch ein Rührreibschweißwerkzeug bei Durchführung eines erfindungsgemäßen Verfahrens;

**[0053]** Fig. 2 bis 4 Schliffbilder von Schnitten durch Schweißnähte.

**[0054]** Fig. 1 zeigt einen Schnitt durch ein Rührreibschweißwerkzeug 1 bei Durchführung eines erfindungsgemäßen Verfahrens. Wie ersichtlich weist das Rührreibschweißwerkzeug 1 eine Schulter 3 und einen die Schulter 3 axial überragenden Pin 2 auf, welche separate Bauteile 4 und somit relativ zueinander bewegbar sind. Die Schulter 3 wird dabei durch ein hohles Bauteil 4 gebildet, in welchem der Pin 2 coaxial zur Schulter 3 angeordnet ist.

**[0055]** Das Rührreibschweißwerkzeug 1 wird wie beim Rührreibschweißen üblich axial bzw. parallel zur Rotationsachse 6 nach unten auf die zu verschweißenden Bauteile 4 gepresst und entlang einer Vorschubrichtung 5 bewegt, wobei Pin 2 und Schulter 3 gleichzeitig um die Rotationsachse 6 rotieren, um die Bauteile 4 durch Rührreibschweißen zu verbinden.

**[0056]** Pin 2 und Schulter 3 sind relativ zueinander bewegbar und können somit mit unterschiedlichen Rotationsgeschwindigkeiten um die Rotationachse bewegt werden, sodass auch bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten eine hohe Wärmeeinbringung durch das Rührreibschweißwerkzeug 1 im Bereich des Pins 2 und gleichzeitig eine reduzierte Wärmeeinbringung im Bereich der Schulter 3 erreicht werden.



**[0057]** Mit einem erfindungsgemäßen Rührreißschweißwerkzeug 1 können Materialien unterschiedlichster Art verschweißt werden. Beispielsweise können Bauteile 4 aus einer Aluminiumlegierung mit einem Siliciumanteil von mehr als 2 % bei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten (Formelzeichen:  $v$ ) des Rührreißschweißwerkzeuges 1 entlang der Vorschubrichtung 5 und unterschiedlichen Verhältnissen von Rotationsgeschwindigkeit der Schulter 3 (Formelzeichen:  $n_S$ ) zu Rotationsgeschwindigkeit des Pins 2 (Formelzeichen:  $n_P$ ) gemäß folgender Tabelle umgesetzt werden:

Vorschubgeschwindigkeit $v$ [m/min]	Verhältnis der Drehzahlen Pin zu Schulter ( $n_P/n_S$ )
1,5	2
4	5
5	6
6	8
7	12

**[0058]** Wie sich aus der Tabelle ergibt, steigt das Verhältnis der Drehzahlen etwa quadratisch mit der Vorschubgeschwindigkeit bzw. in einem Bereich der Vorschubgeschwindigkeit zwischen 4 m/min und 7 m/min sogar stärker als quadratisch an.

**[0059]** Erfindungsgemäß hat sich somit ein von der Vorschubgeschwindigkeit abhängiges Verhältnis der Drehzahlen von Pin 2 zu Schulter 3 ( $n_P/n_S$ ) als vorteilhaft erwiesen, welches folgender Bedingung genügt:

$$A_1 \cdot v^2 + B_1 < \frac{n_P}{n_S} < A_2 \cdot v^2 + B_2$$

wobei die Konstanten  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $A_2$  und  $B_2$  folgende Werte aufweisen:

$$A_1 = 0,17 (\text{min/m})^2;$$

$$A_2 = 0,25 (\text{min/m})^2;$$

$$B_1 = 1;$$

$$B_2 = 1,8.$$

**[0060]** Im Bereich der Vorschubgeschwindigkeit von 4 m/min bis 10 m/min hat sich zur Erreichung qualitativ hochwertiger Schweißnähte bei gleichzeitig hoher Schweißgeschwindigkeit insbesondere ein von der Vorschubgeschwindigkeit abhängiges Verhältnis der Drehzahlen Pin 2 zu Schulter 3 ( $n_P/n_S$ ) als besonders vorteilhaft erwiesen, welches folgender Bedingung genügt:

$$C_1 \cdot (v - D)^{2,15} + E_1 < \frac{n_P}{n_S} < C_2 \cdot (v - D)^{2,15} + E_2$$

wobei die Konstanten  $C_1$ ,  $D$ ,  $E_1$ ,  $C_2$  und  $E_2$  folgende Werte aufweisen:

$$C_1 = 0,6 (\text{min/m})^2;$$

$$C_2 = 0,6 (\text{min/m})^2;$$

$$D = 4 \text{ m/min}$$

$$E_1 = 3 \text{ bis } 5, \text{ insbesondere } 4;$$

$$E_2 = 6 \text{ bis } 8, \text{ insbesondere } 7.$$

**[0061]** Der Pin 2 des Rührreißschweißwerkzeuges 1 kann beispielsweise aus einem Vollhartmetall, einer hochabrasiven Legierung und/oder einer Keramik, insbesondere kubischem Bornitrid oder polykristallinem kubischem Bornitrid bestehen und weist üblicherweise eine Biegefestigkeit von zumindest  $1.700 \text{ N/mm}^2$  und eine Bruchzähigkeit von zumindest  $8,3 \text{ MNm}^{-3/2}$  sowie eine Härte von zumindest 70 HRC auf.

Die Schulter 3 kann beispielsweise aus einem Hartmetall oder dergleichen bestehen und weist üblicherweise eine geringere Härte als der Pin 2 auf.

**[0062]** Ergänzend kann vorgesehen sein, dass ein Drehmoment, mit welchem die Schulter 3 angetrieben wird, und/oder ein Drehmoment, mit welchem der Pin 2 angetrieben wird, kontinuierlich erfasst sowie mit einem Sollwert oder zwei gesonderten Sollwerten verglichen wird und die Rotationsgeschwindigkeit der Schulter 3 reduziert wird, wenn ein Betrag des Drehmomentes, mit welchem die Schulter 3 angetrieben wird, und/oder ein Betrag des Drehmomentes, mit welchem der Pin 2 angetrieben wird, weniger als 90 %, vorzugsweise weniger als 80 %, insbesondere weniger als 70 %, des jeweiligen Sollwertes beträgt. So kann aus einem Abfall des Drehmomentes bei sonst gleichbleibenden Parametern, insbesondere gleichbleibender Vorschubgeschwindigkeit, auf eine unerwünschte Reduktion des Reibwertes im Bereich der zu bildenden Schweißnaht bzw. in einer Rührzone geschlossen werden, welche durch eine zu hohe eingebrachte Energiemenge durch eine Rotation der Schulter 3 bedingt ist. Mit einer Reduktion der Rotationsgeschwindigkeit der Schulter 3 können somit wieder günstigere Bedingungen in der Rührzone und damit ein höherer Reibwert zwischen den zu verbindenden Bauteilen 4 und dem Rührreißschweißwerkzeug erreicht werden.

**[0063]** Alternativ oder ergänzend kann auch die Vorschubgeschwindigkeit variiert, insbesondere erhöht, werden und anhand einer Auswirkung auf das Drehmoment des Pins 2 und/oder auf das Drehmoment der Schulter 3 eine Regelung der Vorschubgeschwindigkeit erfolgen. So kann bei gleichbleibender Rotationsgeschwindigkeit ein Energieeintrag in einen Bereich der zu bildenden Schweißnaht bzw. in eine Rührzone durch eine Veränderung der Vorschubgeschwindigkeit variiert werden. Eine höhere Vorschubgeschwindigkeit kann dabei zu einer Reduktion des Energieeintrages führen, zumal eine Einwirkdauer des Rührreißschweißwerkzeug auf einen Punkt entlang der Schweißnaht reduziert wird. Umgekehrt kann eine geringere Vorschubgeschwindigkeit eine Erhöhung eines Energieeintrages bewirken, welcher zu einer stärkeren Fluidität im Bereich der Rührzone und damit zu einem reduzierten Reibwert führen kann.

**[0064]** Anders ausgedrückt kann über das Drehmoment auf den Reibwert und somit auf Bedingungen in der Rührzone geschlossen werden und können diese Bedingungen durch Änderung von Rotationsgeschwindigkeit des Pins 2, Rotationsgeschwindigkeit der Schulter 3, Vorschubgeschwindigkeit und Anpresskraft beeinflusst werden, weswegen durch Änderung eines oder mehrerer dieser Parameter Bedingungen in der Schweißnaht geändert werden können, um eine Schweißnaht mit hoher Qualität bei gleichzeitig hoher Schweißgeschwindigkeit zu erreichen.

**[0065]** Fig. 2 bis 4 zeigen Schliffbilder von Schweißnähten an Bauteilen 4 aus einer Aluminiumlegierung mit mehr als 2 % Siliciumanteil, die durch Rührreißschweißverfahren gebildet wurden. Dabei zeigen die Fig. 2 und 3 Querschliffe von Nähten, die mit konventionellen Verfahren erstellt wurden. Die in Fig. 2 dargestellte Schweißnaht wurde beispielsweise mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 2,5 m/min und einer Rotationsgeschwindigkeit von Pin 2 und Schulter 3 von 3.000 U/min erstellt. Wie ersichtlich weist die Schweißnaht in einem Bereich einer Nahtunterseite Fehler 7 bzw. Anbindungsfehler auf, die auf eine zu geringe Temperatur im Bereich des Pins 2 zurückgehen.

**[0066]** Die in Fig. 3 dargestellte Schweißnaht wurde mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 3 m/min und einer Rotationsgeschwindigkeit von Pin 2 und Schulter 3 von 5.300 U/min erstellt. Hier war zwar die Temperatur im Bereich des Pins 2 bzw. der Nahtunterseite ausreichend, jedoch die Temperatur im Bereich der Schulter 3, also einer Nahtoberseite, zu hoch, weswegen hier Fehler 7 an der Nahtoberseite auftraten.

**[0067]** Fig. 4 zeigt einen Querschliff einer mit einem erfindungsgemäßen Verfahren hergestellten Schweißnaht. Diese Schweißnaht wurde mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 3 m/min, einer Rotationsgeschwindigkeit des Pins 2 von 7.000 U/min und einer Rotationsgeschwindigkeit der Schulter 3 von etwa 2.000 U/min erstellt. Entsprechend konnten sowohl im Bereich des Pins 2 als auch im Bereich der Schulter 3 angemessene Temperaturen erreicht werden, weswegen die Schweißnaht ohne Schweißfehler ausgebildet ist.

**[0068]** Mit einem erfindungsgemäßen Verfahren und einer entsprechenden Vorrichtung ist die Herstellung von Schweißnähten durch Rührreißschweißen insbesondere bei Aluminiumbauteilen sowohl mit hoher Geschwindigkeit als auch mit einer hohen Qualität möglich.

## Patentansprüche

- Verfahren zum Verbinden von Bauteilen (4) durch Rührreibschweißen, wobei ein Rührreibschweißwerkzeug (1) mit einem Pin (2) und einer Schulter (3) um eine Rotationsachse (6) rotiert und entlang einer Vorschubrichtung (5) verfahren wird, um die Bauteile (4) zu verbinden, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Rührreibschweißwerkzeug (1) mit einer relativ zum Pin (2) bewegbaren Schulter (3) eingesetzt wird und eine Rotationsgeschwindigkeit des Pins (2) um die Rotationsachse (6) zumindest dem 1,15-fachen, vorzugsweise zumindest dem 1,5-fachen, insbesondere dem 2-fachen bis 12-fachen, der Rotationsgeschwindigkeit der Schulter (3) um die Rotationsachse (6) entspricht, wobei die Vorschubgeschwindigkeit zumindest 1,0 m/min, vorzugsweise 2,0 m/min bis 15 m/min, beträgt, wobei ein Verhältnis von Rotationsgeschwindigkeit des Pins (2),  $n_P$ , zu Rotationsgeschwindigkeit der Schulter (3),  $n_S$ , folgender Bedingung in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit,  $v$ , genügt:

$$A_1 \cdot v^2 + B_1 < \frac{n_P}{n_S} < A_2 \cdot v^2 + B_2$$

wobei die Konstanten  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $A_2$  und  $B_2$  folgende Werte aufweisen:

$$A_1 = 0,17 \text{ (min/m)}^2;$$

$$A_2 = 0,25 \text{ (min/m)}^2;$$

$$B_1 = 1;$$

$$B_2 = 1,8.$$

- Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Vorschubgeschwindigkeit 1,5 m/min bis 10 m/min beträgt.
- Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Rotationsgeschwindigkeit des Pins (2) um die Rotationsachse (6) dem 3-fachen bis 8-fachen der Rotationsgeschwindigkeit der Schulter (3) um die Rotationsachse (6) entspricht.
- Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Verhältnis von Rotationsgeschwindigkeit des Pins (2),  $n_P$ , zu Rotationsgeschwindigkeit der Schulter (3),  $n_S$ , für eine Vorschubgeschwindigkeit von 4 m/min bis 10 m/min folgender Bedingung in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit,  $v$ , genügt:

$$C_1 \cdot (v - D)^{2,15} + E_1 < \frac{n_P}{n_S} < C_2 \cdot (v - D)^{2,15} + E_2$$

wobei die Konstanten  $C_1$ ,  $D$ ,  $E_1$ ,  $C_2$  und  $E_2$  folgende Werte aufweisen:

$$C_1 = 0,6 \text{ (min/m)}^{2,15};$$

$$C_2 = 0,6 \text{ (min/m)}^{2,15};$$

$$D = 4 \text{ m/min}$$

$$E_1 = 3 \text{ bis } 5, \text{ insbesondere } 4;$$

$$E_2 = 6 \text{ bis } 8, \text{ insbesondere } 7.$$

- Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass zumindest eines der Bauteile (4), vorzugsweise beide Bauteile (4), aus Aluminium oder eine Aluminium-Legierung, insbesondere aus einer Aluminium-Legierung mit einem Siliciumanteil von mehr als 2 %, bestehen.
- Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Rotationsgeschwindigkeit des Pins (2) 6.000 U/min bis 8.000 U/min beträgt.
- Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Rührreibschweißwerkzeug (1) eingesetzt wird, welches einen Pin (2) aufweist, der aus einem Material mit einer Härte von zumindest 70 HRC besteht.
- Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Rührreibschweißwerkzeug (1) eingesetzt wird, welches einen Pin (2) aufweist, der aus einem Material mit einer Biegefestigkeit von zumindest 1.700 N/mm<sup>2</sup> besteht.
- Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Rührreibschweißwerkzeug (1) eingesetzt wird, welches einen Pin (2) aufweist, der aus einem Material mit einer Bruchzähigkeit von zumindest 8,3 MNm<sup>-3/2</sup> besteht.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Rührreißschweißwerkzeug (1) eingesetzt wird, welches einen Pin (2) aufweist, der aus einem Vollhartmetall, einer hochabrasiven Legierung und/oder einer Keramik, insbesondere kubischem Bornitrid oder polykristallinem kubischen Bornitrid, besteht.
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Rührreißschweißwerkzeug (1) eingesetzt wird, welches einen Pin (2) aufweist, der eine Beschichtung, insbesondere eine CVD-Beschichtung und/oder eine PVD-Beschichtung, aufweist.
12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Rührreißschweißwerkzeug (1) eingesetzt wird, welches eine Schulter (3) aufweist, die eine geringere Härte als der Pin (2) des Rührreißschweißwerkzeuges (1) aufweist.
13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Rührreißschweißwerkzeug (1) eingesetzt wird, welches eine Schulter (3) aufweist, die eine Härte von zumindest 50 HRC aufweist.
14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Drehzahl des Pins (2) während des Verfahrens geändert wird, wobei jedoch ein Drehmoment, mit welchem der Pin (2) angetrieben wird, und/oder ein Drehmoment, mit welchem die Schulter (3) angetrieben wird, im Wesentlichen konstant bleiben.
15. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Drehmoment, mit welchem die Schulter (3) angetrieben wird, und/oder ein Drehmoment, mit welchem der Pin (2) angetrieben wird, erfasst werden, vorzugsweise kontinuierlich während des Verfahrens.
16. Verfahren nach Anspruch 15, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Drehmoment, mit welchem die Schulter (3) angetrieben wird, und/oder das Drehmoment, mit welchem der Pin (2) angetrieben wird, kontinuierlich erfasst sowie mit einem Sollwert verglichen wird und die Rotationsgeschwindigkeit der Schulter (3) reduziert wird, wenn ein Betrag des Drehmomentes, mit welchem die Schulter (3) angetrieben wird, und/oder ein Betrag des Drehmomentes, mit welchem der Pin (2) angetrieben wird, weniger als 90 %, vorzugsweise weniger als 80 %, insbesondere weniger als 70 %, des Sollwertes beträgt.
17. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 16, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Drehmoment, mit welchem die Schulter (3) angetrieben wird, und/oder das Drehmoment, mit welchem der Pin (2) angetrieben wird, kontinuierlich erfasst sowie mit einem Sollwert verglichen wird und die Rotationsgeschwindigkeit der Schulter (3) erhöht wird, wenn ein Betrag des Drehmomentes, mit welchem die Schulter (3) angetrieben wird, und/oder ein Betrag des Drehmomentes, mit welchem der Pin (2) angetrieben wird, mehr als 110 %, vorzugsweise mehr als 120 %, insbesondere mehr als 130 %, des Sollwertes beträgt.
18. Verfahren nach Anspruch 16 oder 17, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Rotationsgeschwindigkeit des Pins (2) in einem geringeren Ausmaß als die Rotationsgeschwindigkeit der Schulter (3) geändert wird, insbesondere gar nicht.
19. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 18, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Vorschubgeschwindigkeit bei gleichbleibender Rotationsgeschwindigkeit von Pin (2) und Schulter (3) erhöht wird, solange ein Betrag des Drehmomentes, mit welchem die Schulter (3) angetrieben wird, und/oder ein Betrag des Drehmomentes, mit welchem der Pin (2) angetrieben wird, um weniger als 30 %, insbesondere weniger als 20 %, vorzugsweise weniger als 10 %, von einem Sollwert abweicht.
20. Verfahren nach einem der Ansprüche 15 bis 19, **dadurch gekennzeichnet**, dass anhand des gemessenen Drehmomentes und/oder anhand einer gemessenen Drehmomentänderung auf einen Werkzeugverschleiß geschlossen und das Rührreißschweißwerkzeug (1) bei Überschreiten eines vordefinierten derart ermittelten Verschleißes getauscht wird.
21. Vorrichtung, welche zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 20 eingerichtet ist, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Pin (2) des Rührreißschweißwerkzeug-

ges (1) relativ zur Schulter (3) um eine Rotationsachse (6) des Rührreibschweißwerkzeuges (1) rotierbar ist, wobei das Rührreibschweißwerkzeug (1) mit einer Vorschubgeschwindigkeit von zumindest 1,0 m/min, vorzugsweise 1,5 m/min bis 15 m/min, entlang einer Vorschubrichtung (5) bewegbar und der Pin (2) mit einer Rotationsgeschwindigkeit um die Rotationsachse (6) antreibbar ist, welche zumindest dem 1,15-fachen, vorzugsweise zumindest dem 1,5-fachen, insbesondere dem 2-fachen bis 12-fachen, der Rotationsgeschwindigkeit der Schulter (3) um die Rotationsachse (6) entspricht.

22. Vorrichtung nach Anspruch 21, **dadurch gekennzeichnet**, dass Pin (2) und Schulter (3) über ein Getriebe, insbesondere ein Planetengetriebe, verbunden sind.
23. Vorrichtung nach Anspruch 21 oder 22, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine gesonderte Spindel für den Pin (2) und eine gesonderte Spindel für die Schulter (3) vorgesehen sind, um Pin (2) und Schulter (3) unabhängig voneinander anzutreiben.
24. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 21 bis 23, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein oder mehrere Sensoren vorgesehen sind, mit welchen ein Drehmoment, mit welchem die Schulter (3) angetrieben wird, und/oder ein Drehmoment, mit welchem der Pin (2) angetrieben wird, erfassbar sind.

**Hierzu 3 Blatt Zeichnungen**

1/3

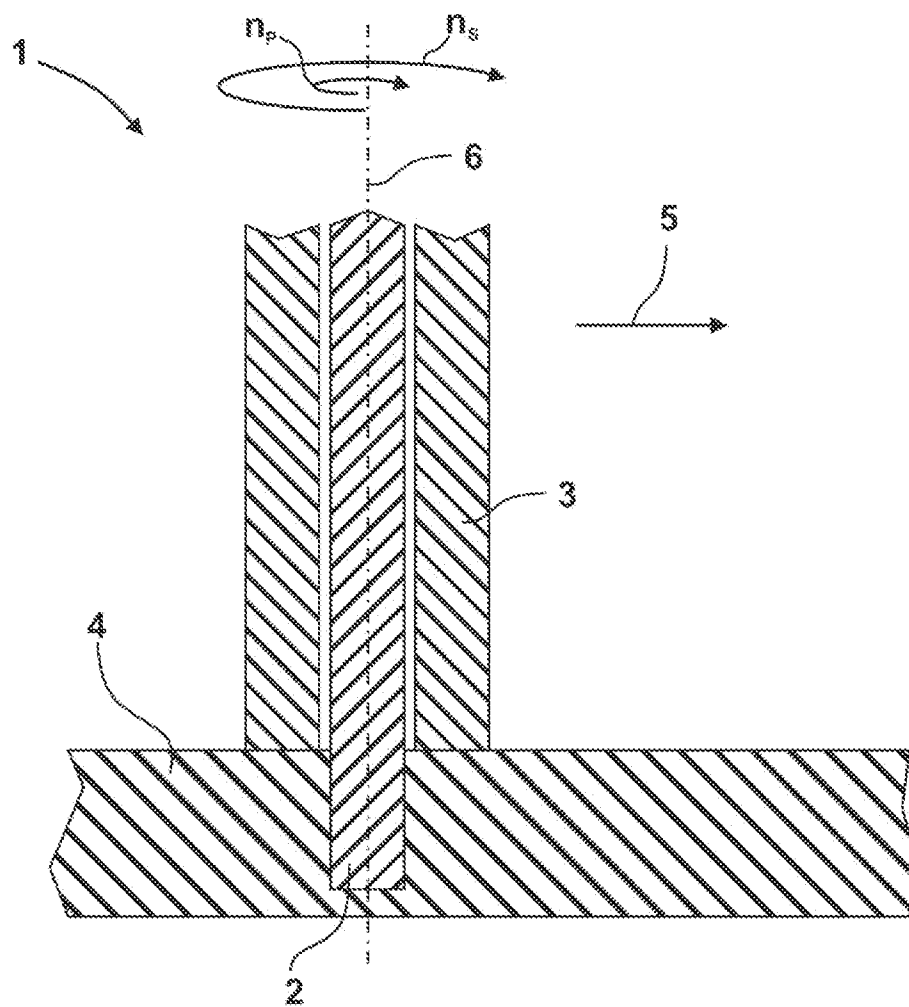


Fig. 1

2/3

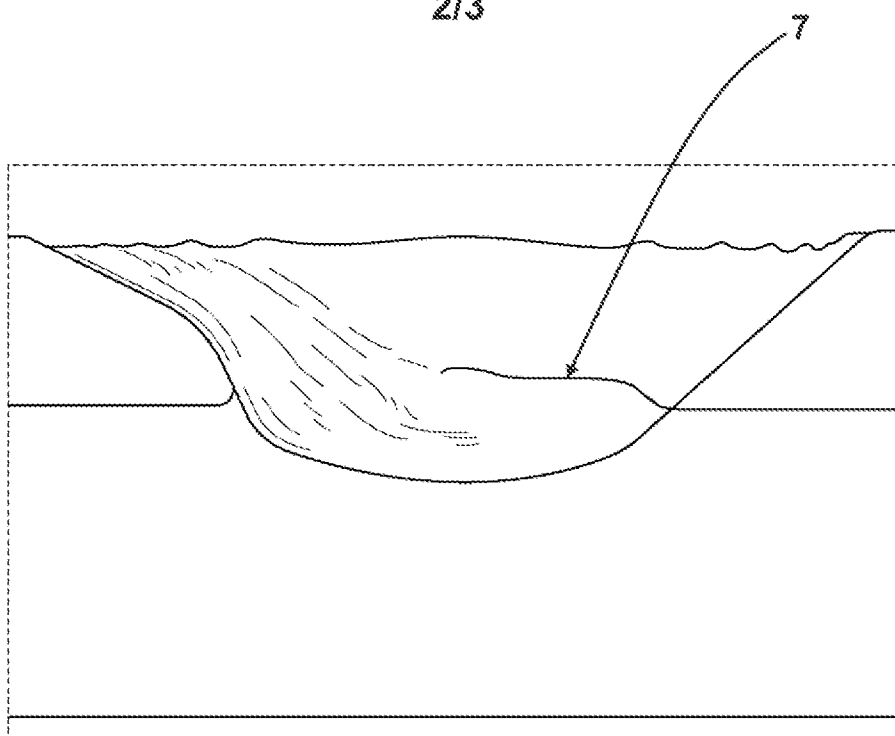


Fig. 2

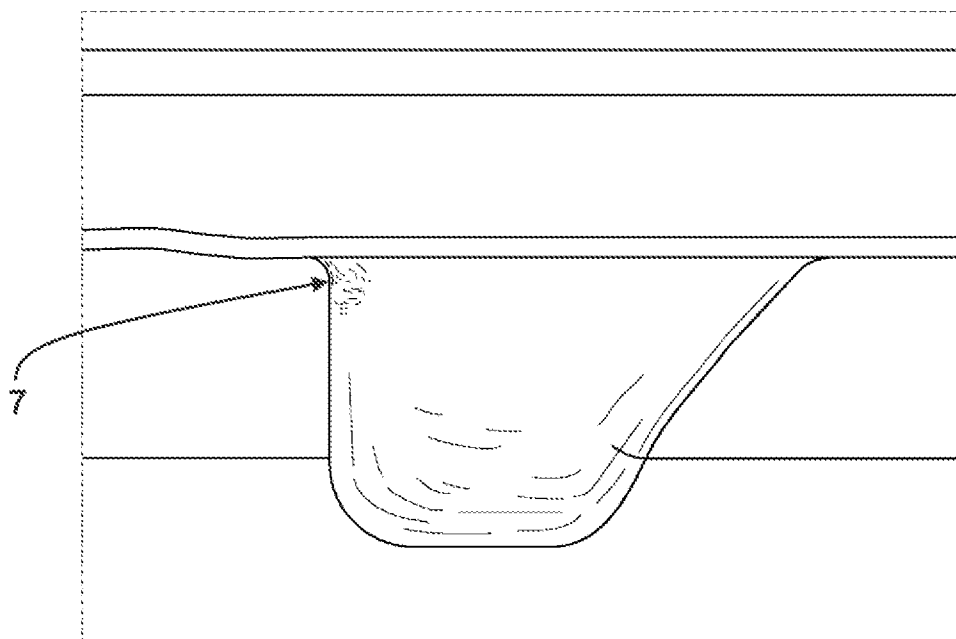


Fig. 3

3/3

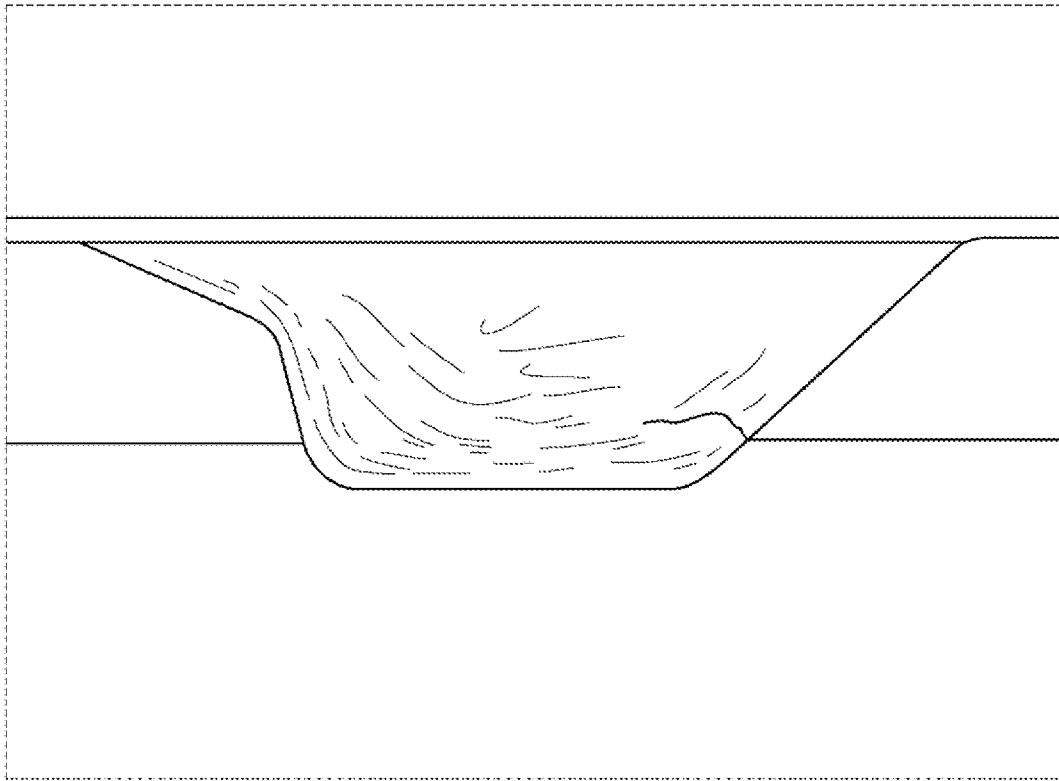


Fig. 4