

Schweißsimulation des Rotations- und Orbitalreibschweißens von unlegierten Stählen

Frank Trommer¹, Tobias Loose², Irmhild Martinek³ und Harald Goldau⁴

¹ Daimler AG, Produktions- und Werkstofftechnik/Verfahrensentwicklung, Stuttgart

E-Mail: frank.trommer@daimler.com

² Ingenieurbüro Tobias Loose GBR, Karlsruhe

E-Mail: loose@tl-ing.de

³ Institut für Werkstoff- und Fügetechnik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

E-Mail: irmhild.martinek@ovgu.de

⁴ Ingenieurwissenschaften und Industriedesign, Hochschule Magdeburg-Stendal

E-Mail: harald.goldau@hs-magdeburg.de

ZUSAMMENFASSUNG

Die numerische Prozesssimulation hält zunehmend Einzug in viele ingenieurwissenschaftliche Tätigkeitsfelder mit dem Ziel, den experimentellen Versuchsaufwand und damit Kosten zu senken. Ferner sollen grundlegende Gesetzmäßigkeiten erkannt werden, um schon gewisse Prozessvoraussagen vor dem eigentlichen praktischen Experiment treffen zu können. In der vorliegenden Arbeit wird die Simulation des Rotations- und Orbitalreibschweißprozesses von unlegierten Baustählen mit dem Softwarepaket SYSWELD vorgestellt. Der Energieeintrag wird durch eine inverse Vorgehensweise über gemessene Temperaturkurven bestimmt. Das thermomechanische FE-Modell liefert unter anderem Aussagen zur Temperaturverteilung, plastischen Deformationen und den Gefügebestandteilen. Die simulierten Berechnungsergebnisse werden anschließend den experimentellen Versuchsergebnissen gegenübergestellt. Ein Vergleich der mittels Thermografie aufgenommenen Temperaturverläufe mit den Temperaturkurven aus der Simulation zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Die plastischen Verformungen und die Wulstausbildung stimmen ebenfalls gut überein.

1 Einführung in die Reibschweißtechnik

Das Reibschweißen (RS) gehört zur Gruppe der Pressschweißverfahren. Durch die Relativbewegung der Bauteile und durch Druck wird die für die Schweißung erforderliche Energie in Form von Wärme erzeugt. Diese Wärmeerzeugung führt im Vergleich zu den Schmelzschweißverfahren zu einer niederen Füge­temperatur, die unterhalb der Schmelztemperatur der zu verbindenden Werkstoffe liegt. Dadurch können unerwünschte Gefügephasen minimiert oder vermieden werden. Dies hat zur Folge, dass sich mit dem RS auch eine Vielzahl von Werkstoffen und Werkstoffkombinationen fügen lassen, die nicht schmelzschweißgeeignet sind oder nur unter hohem Aufwand miteinander schmelzgeschweißt werden können. Im Laufe der Jahre wurden zu diesem Thema vielfältige Untersuchungen durchgeführt, wie einige ausgesuchte Literaturquellen zeigen. Neben der Möglichkeit zum Fügen dieser Werkstoffvielfalt zeichnet sich das RS auch durch die sehr gute Schweißqualität aus. Das Gefüge in unmittelbarer Nähe zur Reibschweißebene ist in der Regel sehr feinkörnig und weist bei sachgemäßer Prozessausführung eine hohe Festigkeit auf, die unter Umständen über der des Grundwerkstoffes liegt. Bekannt als robuster Produktionsprozess lässt sich das RS sehr gut automatisieren und eignet sich besonders für die Serien- bzw. Großserienfertigung. Ferner ist das RS sehr energieeffizient, da die Wärmeerzeugung direkt an der Fügeebene stattfindet und ohne große Transportprozesse und

den damit verbundenen Verlusten auskommt. Außerdem sind keine Schweißzusatzstoffe erforderlich und Schutzgas wird nur bei Sonderanwendungen benötigt.

Der RS-Prozess ist sehr komplex und beinhaltet eine Reihe voneinander abhängiger Vorgänge: mechanischer Verschleiß der Fügeflächen, Wärmeerzeugung und -leitung, Kaltumformung, plastische Verformung und Rekristallisation des hoch erhitzten Werkstoffes, Diffusionsvorgänge, makroskopisches Eindringen von Werkstoffpartikeln, kontinuierliche Bildung von Schweißverbindungen und Zerstörung dieser.[Neumann und Schober, 1991] Den vereinfachten Prozessablauf beim Rotationsreibschweißen zeigt Abbildung 1.

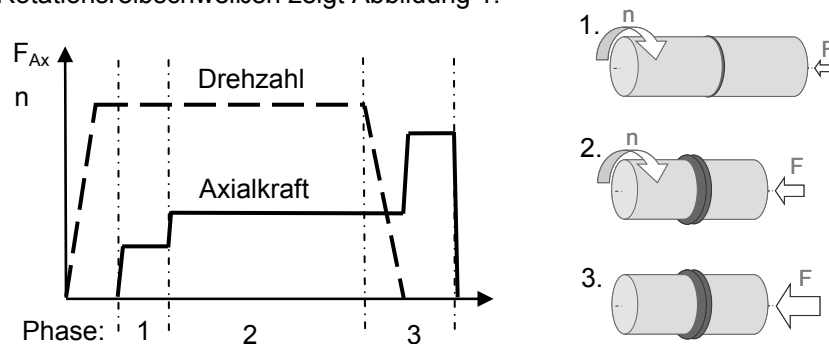


Abbildung 1: Prozess Rotationsreibschweißen (vereinfachtes Schema)

Phase 1: Anreiben

Beim Berühren der Fügeteile miteinander sorgen die Vorgänge Rauheitsabtrag und plastisches Verformen für eine Glättung der Oberflächen und eine Vergrößerung der tatsächlichen Kontaktfläche. Oxidschichten werden aufgebrochen und es kommt zu örtlichen Verschweißungen, die sofort wieder getrennt werden.

Phase 2: Reiben

In der Reibphase findet die Hauptwärmeentwicklung statt. Die Axialkraft wird gegenüber der Kraft beim Anreiben erhöht, der stetige Wärmeeintrag sorgt für einen Temperaturanstieg in der Fügeebene. Hochplastisches Material wird in Folge des Axialdrucks und der Relativbewegung radial nach außen verdrängt. Es kommt zur Ausbildung des so genannten Schweißwulstes.

Phase 3: Abbremsen und Stauchen

Diese Phase beginnt mit der Einleitung des Abbremsvorganges, bei dem die Spindeldrehzahl bis zum Stillstand vermindert wird. Die Axialkraft wird erneut erhöht und die eigentliche Werkstoffverbindung findet statt: die Schweißwärme und die intensive Verformung führen zu Platzwechselvorgängen (Diffusion) der Atome an den Fügeflächen. Mit der Abkühlung setzen statische Rekristallisation und Kristallerholung ein und bilden so ein feinkörniges Gefüge in der Schweißzone aus.

Nach [DIN EN ISO 15620] kann anhand der Relativbewegung in Rotations-, Linear- und Orbitalreibschweißen sowie RS mit Winkelschwingung unterschieden werden, wobei nur den ersten drei Verfahren industrielle Bedeutung zugemessen wird (Abbildung 2). Das Rotationsreibschweißen (RRS) nimmt die Stellung des „Standardverfahrens“ ein und kann in seiner Ausführung noch in einige weitere Verfahrensvarianten untergliedert werden.[Appel, 2002] Die Relativbewegung beim RRS wird derart realisiert, dass (in den meisten Fällen) ein Fügeteil in einer Spindel rotiert, während das andere Fügeteil drehfest eingespannt ist. Für den RS-Prozess müssen beide Teile dann unter Axialdruck zusammengebracht werden. Die Reibschweißtechnik hat in den letzten Jahren einen großen Entwicklungssprung gemacht. Modernste Steuerungs- und Regelungstechnik sorgen dafür, dass Prozesskräfte im Echtzeitbetrieb verarbeitet und angepasst werden und somit hoch präzise Längen- sowie auch Winkelpositionierungen der

Fügeteile ermöglicht werden. Die Verwendung entsprechender Systeme wird auch als Präzisionsreißschweißen bezeichnet.[Goldau und Behrend, 2006] Es findet da Anwendung, wo Bauteile höchster Form- und Maßhaltigkeit entsprechen müssen und das RS am Ende der Prozesskette vorgesehen ist. Trotz aller Vorteile ergeben sich auch Grenzen für das RRS. Eine große Einschränkung ist die Geometrieabhängigkeit der Fügeteile beim RRS. Dies bedeutet, dass mindestens das spindelseitig eingespannte Bauteil Rotationssymmetrie aufweisen muss. Dementsprechend eignen sich vor allem kreisrunde Voll- und Hohlprofile. Verfügt die Reibschweißmaschine über ein drehwinkelgenaues Bremssystem können unter Umständen auch Bauteile mit etwas von der Rotationssymmetrie abweichenden Querschnitten (Vielkantprofile) reibgeschweißt werden. Für die Erweiterung auf Bauteile mit nichtrotationssymmetrischem Querschnitt, sind Reibschweißverfahren mit veränderter Relativbewegung entwickelt worden.

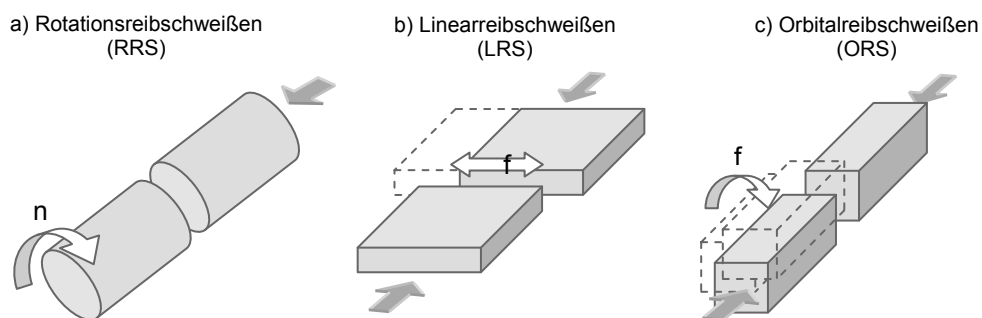


Abbildung 2: Reibschweißverfahren: Rotations-, Linear- und Orbitalreißschweißen

Beim Linearreißschweißen (LRS) erfolgt die Relativbewegung als geradlinige Schwingbewegung, welche über die Prozessparameter Schwingfrequenz und Schwingweite definiert wird. Die Relativgeschwindigkeit ist nach Betrag und Richtung auf der gesamten Fläche gleich, sie ist allerdings zeitlich veränderlich und lässt sich annähernd als Sinuskurve darstellen. Bei jedem Schwinghub findet zweimal eine Richtungsänderung um 180° statt. Dadurch geht in den Umkehrpunkten die Geschwindigkeit auf null zurück, während in der Mittellage die Maximalgeschwindigkeit erreicht wird.[Appel und Cramer, 2005] Aus diesem Grund ergeben sich im Gegensatz zum RRS veränderte Bedingungen für Reibungs- und Plastifizierungsvorgänge durch einen ständigen Wechsel von Haft- und Gleitreibung. Dadurch werden Linearreißschweißmaschinen auch anders belastet, so dass sich diese deutlich von Rotationsreißschweißmaschinen unterscheiden. Die Schwingungsaufbringung erfolgt durch hydraulische, mechanische bzw. elektromagnetische Antriebe mit Frequenzen bis etwa 250 Hz und Schwingweiten von bis zu 6mm.[Nentwig, A.W.E. und Appel, L., 1996] Das LRS wurde zuerst auf Kunststoffe angewendet und ist dort unter dem Namen Vibrationsschweißen bekannt.[Ehrenstein, G.W., 2004] Erste Untersuchungen zum Linearreißschweißen von Metallen wurden schon in den frühen 80iger Jahren in England durchgeführt, jedoch hat das LRS von Metallen nicht den wirtschaftlichen Stellenwert wie das RRS erreicht. Ein Einsatzgebiet ist die Fertigung und Reparatur von Schaufelrädern, den so genannten Blinks.[Freeman, 2003]

Eine Erweiterung zum LRS stellt das zweidimensionale Orbitalreißschweißen (ORS) dar, das ohne eine Schweißvorzugsrichtung auskommt. Im Gegensatz zum LRS wird beim ORS eine elliptische oder kreisförmige Relativbewegung in der Ebene ausgeführt, ohne dass es zu einer Verdrehung der Bauteile um deren Längsachse kommt.[Trommer et al, 2008] Je nach Aufbau der Reibschweißmaschine wird nur ein Fügeteil beziehungsweise werden beide Fügeteile angetrieben. Bei Einkopfmaschinen beschreibt ein Werkstück eine Kreisbewegung mit dem Schwingkreisdurchmesser D_S und der Schwingfrequenz f , während das andere Werkstück stationär bleibt. Analog zu den anderen Reibschweißverfahren werden die Teile unter gleichzeitig wirkenden Axialdruck zusammengebracht. Durch diesen Verfahrensablauf ergeben sich die drei wesentlichen Vorteile des ORS. Der erste wesentliche Vorteil des ORS ist die Möglichkeit

Bauteile mit relativ beliebigem Fügequerschnitt reibzuschweißen. Zweitens: Der spezielle Bewegungsablauf führt dazu, dass jeder Punkt in der Reibebene zu jeder Zeit die gleiche Relativgeschwindigkeit besitzt. Es erfolgt ein nahezu gleichmäßiger Energieeintrag, dadurch sind auf der gesamten Fügeebene annähernd gleiche Phasenzustände zu finden. Diese Homogenisierung des Fügequerschnitts erfordert vergleichsweise geringe spezifische Reibkräfte.[DVS 5038, 2008] Der dritte Vorteil des ORS gegenüber dem RRS ist, dass gleichzeitig mehrere Bauteile oder verschiedene parallele Stellen an einem Bauteil reibgeschweißt werden können. Mit entsprechenden Mehrfachspannern beziehungsweise Palettenvorrichtungen sind sehr hohe Produktionsraten möglich, was zu erheblichen Kostenersparnissen führen kann. Die bisher gemachten Erfahrungen mit dem ORS kommen vor allem aus der Kunststoffindustrie [Branson, 2006], ein weiträumiger Einsatz für Metallverbindungen ist jedoch noch nicht zu finden. Ein Hauptgrund dafür ist die bisher eingeschränkte Maschinenteknik, die auf geringe Fügequerschnitte begrenzt ist und somit technisch relevante Aufgabenstellungen nur bedingt möglich sind. Die auftretenden Kräfte sind beim ORS von Metallen um ein Vielfaches größer als bei Kunststoffen, weshalb die Maschinen deutlich steifer ausfallen müssen. Metalle sind im Gegensatz zu den Kunststoffen gute Wärmeleiter. Um die hohe Wärmeableitung bei den metallischen Werkstoffen zu kompensieren und die notwendige Schweißenergie erzielen zu können, muss mehr Wärmeleistung aufgebracht werden. Der Schwingantrieb der ORS-Maschine erfordert deshalb eine Auslegung mit höherer Leistung. Neben diesen technischen Aspekten kommt hinzu, dass es für das ORS bisher nur wenige wissenschaftliche Untersuchungen gibt. Die zwei wesentlichen Forschungsprojekte wurden von [Maalekian, 2007] und [DVS 5038, 2008] durchgeführt. Des Weiteren ist der vorliegende Artikel aus Ergebnissen einer laufenden wissenschaftlichen Untersuchung entstanden.

2 Versuchsdurchführung Reibschweißen

Bei den hier dargestellten Versuchen handelt es sich um Grundsatzuntersuchungen. Die Probegeometrien sind einfach gehalten, um mit möglichst geringem technischen Aufwand einen großen Erkenntniswert zu erzielen. Des Weiteren konnte eine hohe Reproduzierbarkeit der Reibschweißparameter sichergestellt werden.

2.1 Werkstoff

Für die RRS- und ORS-Versuche wurde jeweils ein unlegierter Baustahl (S355J2) eingesetzt. Die Reibschweißverbindung wurde artgleich mit identischen Probeteilen durchgeführt. Damit in der Reibschweißsimulation die Gefügeumwandlungen möglichst genau bestimmt werden können, müssen entsprechende Daten über die chemische Zusammensetzung des verwendeten Werkstoffes vorliegen. Ferner müssen auch entsprechende Festigkeitskennwerte für das mechanische FE-Modell zur Verfügung stehen. Aus diesem Grund sind Stichproben vom eingesetzten Versuchswerkstoff entnommen worden, die für eine Spektralanalyse und für Zugversuche verwendet wurden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3 dargestellt.

Ergebnisse der Spektralanalyse:

Element	C	Si	Mn	P	S	Al
Istwert [%]	0,074	0,190	0,438	0,0105	0,0034	0,0160
Element	Cu	Cr	Ni	Mo	V	Sn
Istwert [%]	0,315	0,111	0,184	0,057	<0,001	0,0153
Element	Ti	Nb	B	W	Co	As
Istwert [%]	<0,001	<0,002	0,0003	0,010	0,011	0,010

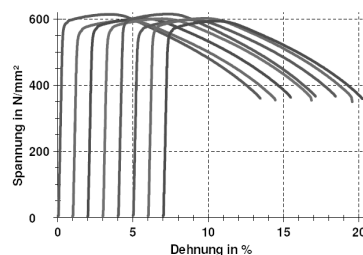


Abbildung 3: Werkstoffzusammensetzung und Festigkeitsanalyse

2.2 Rotationsreibschweißen

Die RRS-Versuche wurden auf einer RS-Maschine der Firma H&B OMEGA Europa GmbH realisiert. Diese Reibschweißmaschine verfügt über einen servo-elektrischen Vorschubantrieb, dadurch ist ein hochdynamisches und präzises Reibschweißen möglich. Bei einem Durchmesser von $d=12\text{mm}$ ergab sich ein Fügequerschnitt von etwa $A=113\text{mm}^2$, die Probenlänge betrug $l=60\text{mm}$. (Abbildung 4) Die Einspannung der bolzenförmigen Stahl-Proben erfolgte spindel- sowie auch schlittenseitig über ein Dreibackenfutter.

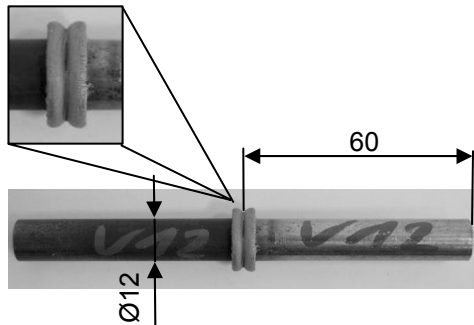


Abbildung 4: RRS-Probe

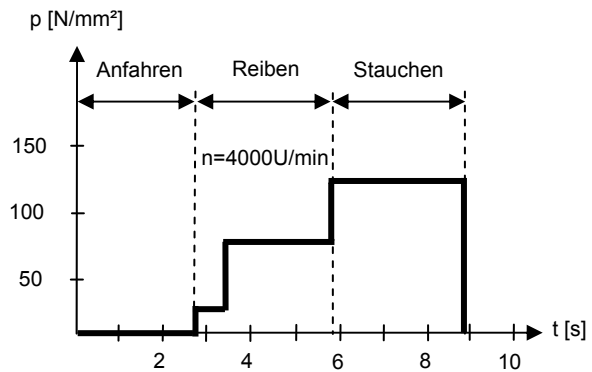


Abbildung 5: Prozessablauf RRS

Abbildung 5 zeigt den Axialdruck-Zeit-Verlauf der RRS-Versuche. Bei Prozessstart wurde der Vorschubschlitten mit dem einem Fügeteil in Bewegung gesetzt, und nach etwa drei Sekunden kam es zum Bauteilkontakt der beiden Proben. Damit das anfängliche Drehmoment nicht zu groß ausfiel, wurde eine kurze Anreibphase gefahren ($t=0,5\text{s}$). Danach fand die eigentliche Reibphase bei einem Druck von etwa $p=75\text{N/mm}^2$ und einer Dauer von $t=2,5\text{s}$ statt. Die abschließende Stauchphase dauerte $t=3\text{s}$.

2.3 Orbitalreibschweißen

Wie bereits erwähnt, bezieht sich der industrielle Einsatz für das ORS bisher nur auf den Kunststoffbereich, geeignete ORS-Maschinen zum Schweißen von metallischen Werkstoffen sind derzeit noch nicht verfügbar. Aufgrund dessen wurden die praktischen ORS-Versuche auch auf einer modifizierten Kunststoffmaschine durchgeführt. Die Maschine kann Axialkräfte von maximal $F=15\text{kN}$ aufbringen, und der Schwingantrieb lässt sich mit Frequenzen bis zu $f=300\text{Hz}$ betreiben. In Vorversuchen wurde gezeigt, dass Proben aus unlegiertem Baustahl (S355J2) und einer Fügefläche von $A=100\text{mm}^2$ noch im Leistungs- und Steifigkeitsspektrum dieser Maschine liegen. Um die Verfahrensabgrenzung zum Rotationsreibschweißen aufzuzeigen, wurden Vierkantproben mit einer jeweiligen Kantenlänge von $l=10\text{mm}$ verwendet. (siehe Abbildung 6) Die Auskraglänge je Bauteil betrug $l=15\text{mm}$, um genügend Platz für Thermografieuntersuchungen zu haben. Für diese Auskrägung wurden keine Nachteile bezüglich Steifigkeit oder unerwünschter Schwingungen beobachtet. Der Spannungsquerschnitt wurde aufgrund vorhandener Spanntechnik mit $20\text{mm} \times 20\text{mm}$ gewählt. In Abbildung 7 ist der schematische Ablauf einer Orbitalreibschweißung dargestellt. Je nachdem wie groß der Abstand der beiden Bauteilflächen zueinander ist, muss auch hier wieder ein Anfahrweg zurückgelegt werden. Nach dem Bauteilkontakt wurde der ORS-Prozess gestartet. Die Schwingfrequenz und der Schwingkreisdurchmesser des Antriebskopfes wurden so gewählt, dass sich eine Relativgeschwindigkeit von $v_{\text{Rel}}=1,2\text{m/s}$ ergab. Der Reibdruck betrug etwa $p=10\text{N/mm}^2$ und wurde für eine Schweißzeit von $t=2,5\text{s}$ auf die Bauteile ausgeübt. In der anschließenden Stauchphase wurde der Druck auf den doppelten Wert erhöht. Die Stauchphase dauerte etwa $t=5\text{s}$ an, danach wurden die Bauteile abgespannt.

Durch diesen Versuchsablauf - vor allem bedingt durch die hohe Relativgeschwindigkeit - konnten erstmals Proben aus S355J2 mit einer sehr guten Schweißqualität im Bereich der Grundwerkstofffestigkeit bei gleichmäßiger Wulstausbildung orbitalreibgeschweißt werden!

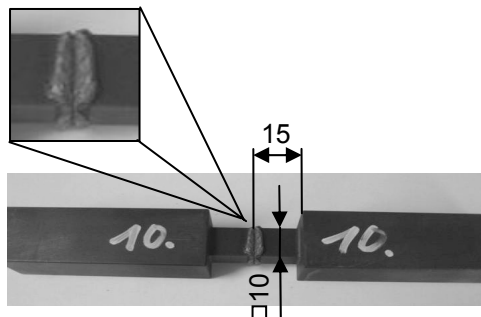


Abbildung 6: ORS-Probe

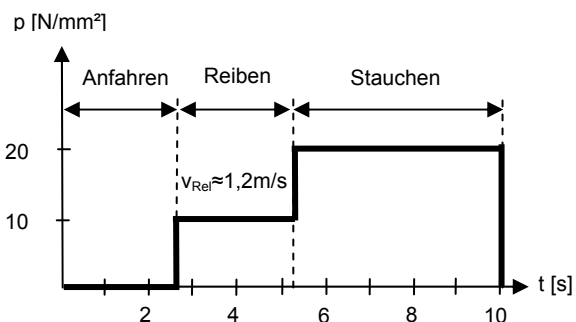


Abbildung 7: Prozessablauf ORS

3 Numerische Schweißsimulation mit SYSWELD

Die numerische Schweißsimulation spielt eine immer stärker werdende Rolle in Forschung und Entwicklung sowie auch in Fertigung und Produktion. Sie verfolgt vor allem das Ziel, schon Ergebnisprognosen zu liefern, bevor die eigentlichen Schweißversuche durchgeführt werden. Dies soll helfen, den praktischen Versuchsaufwand einzuschränken, um dadurch Zeit und Kosten zu sparen. Für die Parameterfindung bzw. -optimierung beim Reibschweißen sind oft viele Versuchsschweißungen notwendig, so dass für die Simulationstechnik ein großes Anwenderinteresse besteht. Der Name Reibschweißen zeigt deutlich, dass dieser Prozess auf Reibungsmechanismen basiert. Trotz vieler Forschungsarbeiten sind die theoretischen Erkenntnisse zur Reibung aufgrund ihrer Komplexität nicht vollständig erfasst und nicht allgemeingültig anwendbar. Infolgedessen sind auch die Modelle beim Reibschweißen meist nur bei Einhaltung bestimmter Randbedingungen brauchbar und müssen vor ihrer Nutzung kritisch geprüft werden. Einen umfangreichen und chronologisch dargestellten Überblick zu aufgestellten Reibungstheorien und Prozessmodellen gibt [Maalekian, 2007] in seiner kritischen Analyse zur Reibschweißliteratur. Eines dieser Modelle beschreibt die ORS-Simulation von Rechteckprofilen aus eutektoidem Stahl. Ein gekoppeltes thermo-mechanisches FE-Modell wird zur Bestimmung des Temperaturverlaufes, der Wulstausbildung und der Schweißverkürzung genutzt. In einem zweiten FE-Modell werden die Umwandlungen der Gefügephasen während des ORS-Prozesses berechnet, sowie die endgültigen Strukturanteile und die Größe der Wärmeeinflusszone angegeben. Beide Modelle basieren auf einem inversen Wärmeleitungsmodell, das zur Bestimmung des Energieeintrags in der Fügeebene dient. [Maalekian et al, 2007]

3.1 Temperaturfeldsimulation und inverse Bestimmung des Wärmeeintrags

In der vorliegenden Arbeit wird die durch Reibung erzeugte Wärmeenergie ebenfalls mit einem inversen Ansatz bestimmt. Hierbei meint invers eine auf vorhandenen Messdaten basierende Vorgehensweise, bei der im Gegensatz zur allgemein üblichen direkten Simulation die exakte Kenntnis über komplexe physikalische, mechanische usw. Vorgänge während des Prozesses nicht nötig ist.

Für die Simulation des RS-Prozesses ist die Kenntnis der Temperaturprofile in den Fügeteilen während des Schweißens unerlässlich. Zur Bestimmung dieser muss die allgemeine Temperaturfeldgleichung gelöst werden, die gegeben ist durch:

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_{Umg}^* + w_{Vol}^* \quad (1)$$

mit

$$-\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = q(t) \quad (2)$$

Darin bedeuten:

- ρ Materialdichte
- c_p spezifische Wärmekapazität
- T Temperatur
- t Zeit
- λ Wärmeleitfähigkeit
- q_{Umg}^* an die Umgebung abgegebene Wärme mittels Konvektion und Strahlung
- w_{Vol}^* erzeugte Wärme durch Volumenarbeit
- $q(t)$ in der Fügeebene erzeugte Reibungswärme
- x, y, z Ortskoordinaten

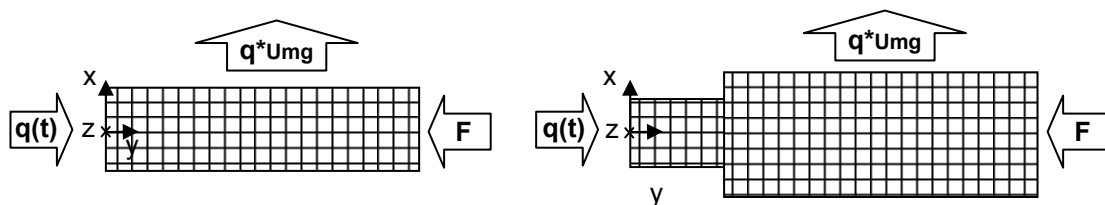


Abbildung 8: 2D-Schema: RRS-Probe (links) und ORS-Probe (rechts)

Alle werkstoffspezifischen Stoffwerte wie Dichte, Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit sind als temperaturabhängige Größen in einer Materialdatenbank innerhalb von SYSWELD hinterlegt und können dementsprechend für die Simulation genutzt werden. Die für den Schweißprozess notwendige Reibwärme $q(t)$ wird in der Fügeebene erzeugt (siehe Abbildung 8) und stellt somit die Hauptgrenzbedingung von Gleichung (1) dar. Die große Schwierigkeit liegt aber gerade in der Bestimmung von $q(t)$. In vielen früheren Modellansätzen zum Reibschweißen wurde versucht, die Reibungswärme mit Hilfe des Reibungskoeffizienten μ_{Reib} auf analytischem Weg zu bestimmen. Da der Reibungskoeffizient aber von einer Vielzahl von Faktoren (Temperatur, Werkstoff, Gleitgeschwindigkeit, Oberfläche, usw.) abhängt und weder über die Zeit noch über den Querschnitt konstant ist, gestaltet sich eine genaue Bestimmung überaus schwierig. Dieser direkte Modellansatz kann mit Hilfe des angesprochenen inversen Prozessansatzes umgangen werden. Die erzeugte Reibungswärme $q(t)$ wurde im vorliegenden Fall über Temperaturmessungen angenähert. Während des RS-Prozesses wurde mittels Thermografie die Oberflächentemperatur der Fügeteile gemessen. Anschließend sind von festgelegten Punkten die Temperatur-Zeit-Kurven ermittelt worden, die für den Vergleich mit den berechneten Werten herangezogen wurden. In Abbildung 9 und 10 sind die Temperaturkurven einiger ausgewählter Punkte der RRS- und ORS-Proben und ein Ausschnitt der dazugehörigen Thermografieaufnahmen

dargestellt. Die Proben wurden vor dem Reibschweißen geschwärzt, um eine Oberfläche mit bekanntem Emissionsgrad zu erhalten. Bedingt durch den Prozessablauf kommt es zu einer Verkürzung der Probeteile und zu der Ausbildung des Reibwulstes. Dementsprechend muss ein Probeteil kontinuierlich nachgeführt werden (Vorschub), um den RS-Prozess aufrecht zu erhalten. Eine Thermografieauswertung von bewegten Bauteilen ist allerdings sehr schwierig, so dass nur am ortsfesten Probeteil Punkte betrachtet wurden. Dieselbe Schwierigkeit ergibt sich auch bei der Bestimmung der Maximaltemperatur in der Fügeebene, welche ebenfalls axial wandert. Hinzu kommt, dass der eingesetzte Lack zum Schwärzen den hohen Temperaturen an der Fügeebene nicht stand hält und verbrennt. Ferner verdeckt die Reibwulst die umliegenden Bereiche um die Fügeebene und verhindert somit einen direkten Blick auf die Oberfläche der Schweißprobe. Über eine spezielle Auswertung der Maximaltemperaturen in diesem Bereich konnte dennoch eine Abschätzung der Fügeebenen-temperatur erfolgen.

Die von der Axialkraft verrichtete Volumenarbeit entspricht nach [Schäfer, 1971] weniger als 1% der Reibarbeit, weshalb der Term w_{Vol}^* vernachlässigbar ist. Allerdings geht bei der inversen Vorgehensweise die gesamte erzeugte Wärmeenergie in die Temperaturmessung mit ein, so dass auch die Volumenarbeit mit berücksichtigt wird. Der Term $q_{Umgebung}^*$ umfasst letztendlich die Verlustwärme, die mittels Konvektion und Strahlung an die Umgebung abgegeben wird. [Loose, 2007]

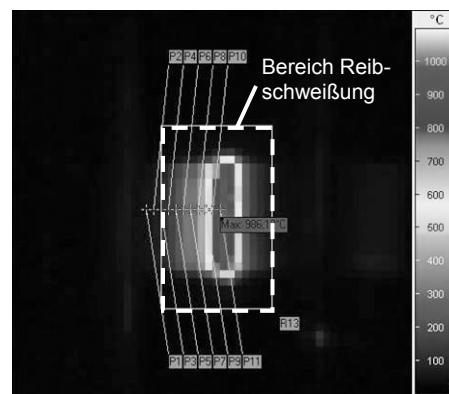
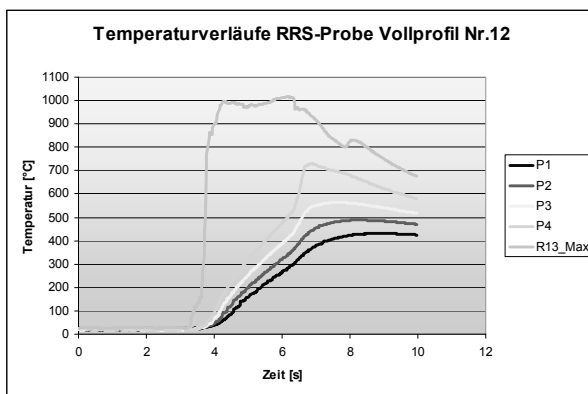


Abbildung 9: Thermografieaufnahme Rotationsreibschweißen

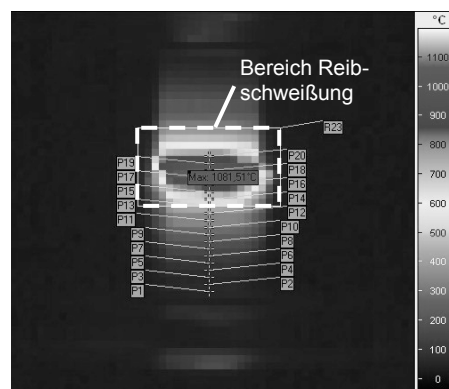
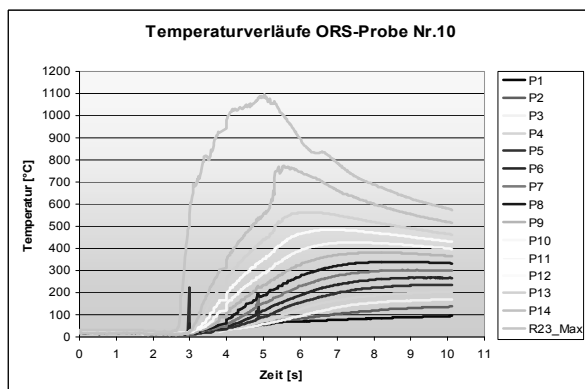


Abbildung 10: Thermografieaufnahme Orbitalreibschweißen

Die Bestimmung des Wärmeeintrages $q(t)$ erfolgte anschließend iterativ durch den Vergleich von gemessenen mit berechneten Temperaturprofilen, wobei das Ziel war, die Differenz beider Temperaturen so klein wie möglich zu halten. Abbildung 11 zeigt beispielhaft die ermittelte Wärmeeintragsfunktion für das ORS und die Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Temperaturverläufe eines ausgesuchten Punktes (Punkt 13) auf der Bauteiloberfläche. Es ist ersichtlich, dass die gesamte Wärmeenergie während der Reibphase ($t=2,5s$) eingebracht wird. (siehe dazu auch Abbildung 7) Nach einem steilen Anstieg ($t=0,5s$) bleibt der Wärmeeintrag für eine gewisse Zeit ($t=1,5s$) lang nahezu konstant. Wärmeentwicklung und Wärmeabfuhr sind im Gleichgewicht, so dass sich ein quasistatischer Zustand einstellt. Nach Ende der Reibphase und dem damit verbundenen Abschalten des Schwingantriebes fällt der Wärmeeintrag auf Null ab ($t=0,5s$). Mit Nutzung dieser Wärmeeintragsfunktion konnte das Temperaturprofil für das Probeteil simuliert werden. Der Vergleich mit der mittels Thermografie aufgenommenen Messkurve zeigt eine sehr gute Übereinstimmung.

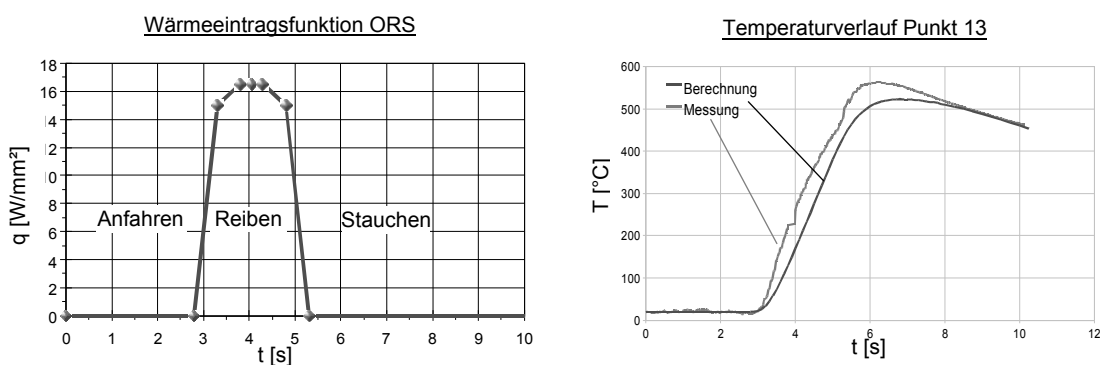


Abbildung 11: Wärmeeintragsfunktion ORS und Temperaturverlauf Punkt 13

3.2 Wärmeeintrag in Abhängigkeit vom Ort

Betrachtet man beim RRS die Relativgeschwindigkeit, so stellt man fest, dass diese von einem Maximalwert am Umfang zum Zentrum hin abnimmt. Analog dazu verhält sich auch die Wärmeentstehung. Während die größte Wärmeentwicklung (100%) in den äußeren Randgebieten vorliegt, geht sie zur Mitte hin gegen null. Über Leitungsvorgänge wird jedoch auch Wärme in die zentralen Bereiche transportiert. Um den ungleichmäßigen Energieeintrag in der Simulation zu berücksichtigen, wird die Wärmeeintragsfunktion mit einem Faktor versehen, der nach Funktion (2) berechnet wird. (Abbildung 12) Abhängig vom Abstand zum Probenzentrum kann damit jedem Punkt auf der Fügeebene der entsprechende Wärmeeintrag zugeordnet werden.

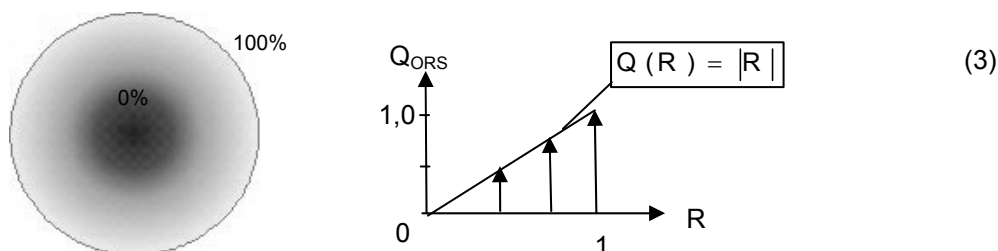


Abbildung 12: Temperaturverteilung und durchschnittlicher Wärmeeintrag beim RRS

Der Wärmeeintrag beim ORS verteilt sich durch die gleiche Relativgeschwindigkeit in der Reibebene viel homogener als beim RRS. In Anlehnung an [Craine und Francis, 1987] wird die Quadratfläche in fünf Bereiche (I-V) eingeteilt, siehe Abbildung 13. Verursacht durch die Orbitalbewegung der Fügebauteile zueinander, werden die Bereiche I-V im Laufe des Prozesszyklusses

unterschiedlich überdeckt, so dass einige Bereiche während der Reibphase frei liegen. Dies hat zur Folge, dass einerseits der Reibvorgang unterbrochen und infolgedessen auch die Wärmeentwicklung beeinträchtigt wird. Überdies ergibt sich an den freien Flächen auch eine verstärkte Abkühlung durch Konvektion und Strahlung, die sich ebenfalls negativ auf eine gleichmäßige Erwärmung auswirkt. Wird beim ORS von einem homogenen Energieeintrag gesprochen, dann ist dies bei genauerer Betrachtung nur im zentralen Bereich I (100% Überdeckung) der Fall. In Richtung der Bauteilränder wird die durchschnittliche Überdeckung immer kleiner, so dass diese an den Kanten nur noch 50% beträgt. Die Eckpunkte werden sogar nur zu 25% überdeckt und sind damit die am wenigsten erwärmten Bereiche. In der Praxis findet durch Wärmeleitung bei einer entsprechenden Reibzeit aber ein gewisser Temperatursausgleich statt. Die Aufteilung eines Rechteckprofils in die fünf Bereiche ist allerdings nur bei kleineren Querschnitten von Bedeutung. Hier können die Randbereiche II-V bei entsprechender Wahl des Schwingkreisdurchmessers schon relativ groß ausfallen, weshalb die Annahme eines homogenen Wärmeeintrages nicht mehr zutreffen würde. Bei großen Querschnitten [Maalekian, 2007] ist der zentrale Bereich I ebenfalls groß im Verhältnis zur Gesamtfläche, so dass ein einheitlicher Wärmeeintrag über die komplette Fügefläche angenommen werden kann. In Abbildung 14 ist der ortsabhängige Wärmeeintrag im 2D-FE-Modell für das RRS und das ORS dargestellt.

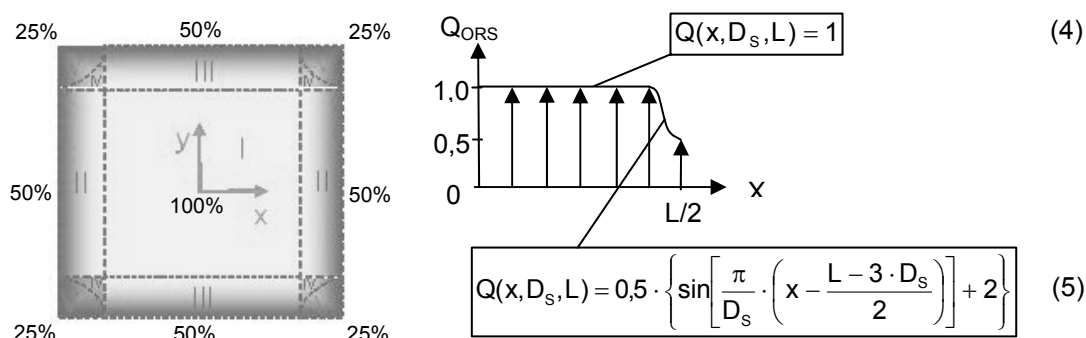


Abbildung 13: Temperaturverteilung und durchschnittlicher Wärmeeintrag beim ORS

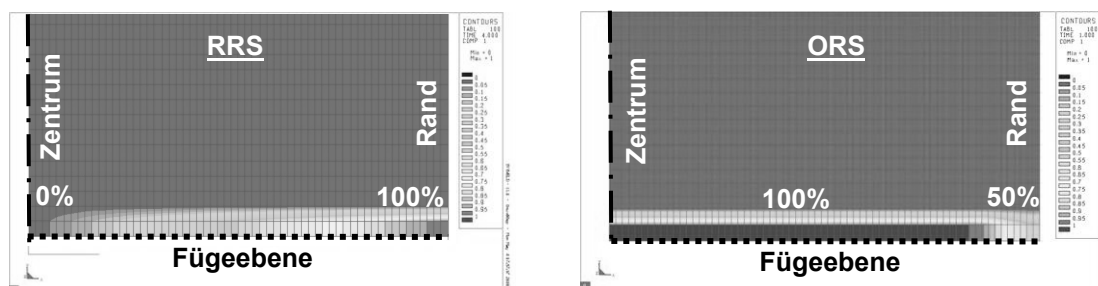


Abbildung 14: Darstellung Wärmeeintrag RRS/ORS im 2D-FE-Modell

3.3 Simulation thermo-mechanisches FE-Modell

Mit Hilfe der beschriebenen Bestimmung des Wärmeeintrages konnte das gekoppelte thermo-mechanische FE-Modell aufgestellt werden. Im ersten Schritt wurde mit einem 2D-Modell gerechnet. Aufgrund von Symmetriebedingungen (Rotationssymmetrie bzw. Achsensymmetrie) wurde nur ein Probeteil betrachtet und damit Rechenaufwand eingespart. Die Vernetzung der Bauteile wurde mit dem Softwaretool VISUAL-MESH realisiert. In den Abbildungen 12 und 13 sind jeweils die berechneten Verformungen beim RRS und ORS dargestellt sowie je ein Längsschliff der original reibgeschweißten Teile. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung

der simulierten und tatsächlichen Verformungen, wie z.B. an der Wulstausbildung zu erkennen ist. Ferner wird aus den Schliffbildern auch die unterschiedliche Wärmeverteilung bei den Verfahren RRS und ORS deutlich. Während die bikonvexe Form der Wärmeeinflusszone (WEZ) bei der RRS-Probe den ungleichmäßigen Wärmeeintrag anzeigt, ist die WEZ bei ORS-Probe annähernd parallel und weist auf den homogeneren Wärmeeintrag hin.

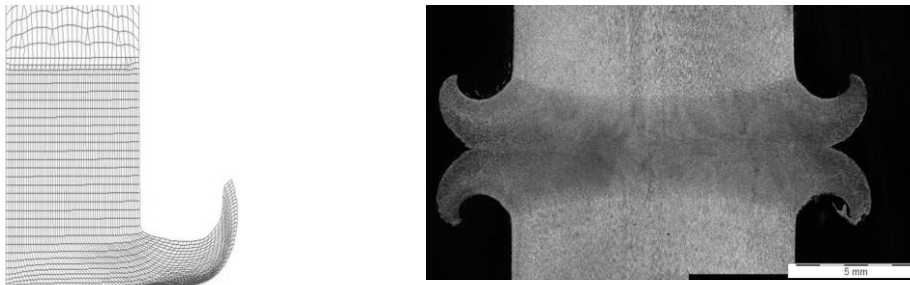


Abbildung 15: RRS: berechnete Verformung (links) und Längsschliff (rechts)



Abbildung 16: ORS: berechnete Verformung (links) und Längsschliff (rechts)

4 Zusammenfassung

Aufgrund des bestehenden Potentials zur Reduzierung von Versuchszeit und -kosten sowie der Möglichkeit zu einem erweiterten Einblick in verschiedenste Prozessvorgänge stößt die Reibschweißsimulation auf großes Anwenderinteresse. In der vorliegenden Arbeit werden das Rotationsreibschweißen sowie auch das Orbitalreibschweißens von unlegierten Stählen untersucht im Speziellen der Baustahl S355J2. Praktische Schweißversuche dienen zur Festlegung der Basisparameter, zudem werden mit Hilfe von Thermografieaufnahmen die Temperaturverläufe auf der Bauteiloberfläche analysiert, um den Energieeintrag während dem Schweißprozess zu bestimmen. Durch diese inverse Vorgehensweise ist die Kenntnis über die komplexen Reibungsvorgänge in der Fügeebene nicht mehr erforderlich. Mit der Software SYSWELD wird jeweils ein thermo-mechanisches FE-Modell aufgestellt, anschließend werden die Simulation- mit den experimentellen Versuchsergebnissen gegenübergestellt. Es zeigen sich sehr gute Übereinstimmungen in den Temperaturverläufen und auch die plastischen Verformungen sowie die Wulstausbildung stimmen sehr gut überein.

Die inverse Simulationsmethodik bietet einen möglichen Ansatz, Verfahren wie das Reibschweißen auf dem Gebiet der Prozessdigitalisierung voran zutreiben. Für den untersuchten Werkstoff und die verwendeten Versuchsgeometrien konnten gute Simulationsergebnisse aufgezeigt werden. Dennoch müssen weiterhin Versuche erfolgen, um das Modell zu optimieren und zu verifizieren. In einem laufenden Forschungsprojekt zum Thema Orbitalreibschweißen werden weitere Werkstoffe und Fügegeometrien untersucht, damit das vorgestellte Simulationsmodell auf eine breitere Basis gestellt werden kann.

5 Literatur

Appel, L.(2002), „Grundlagen der Reibschweißtechnik“, 12. Erfahrungsaustausch Reibschweißen in der SLV München, München.

Appel, L. und Cramer, H.(2005), „Linear- und Orbitalreibschweißen, Fügeverfahren mit hohem Innovationspotential“, 2.Kongress "Join-Tec" – Fügen mit minimaler Grundwerkstoffbeeinflussung –, S.18-25.

Branson Ultrasonic Corp.(2006),
<http://www.branson.de/schweissverfahren/orbitalesvibrationsschweissen/index.html>

Ehrenstein, G.W.(2004), „Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik“, Hanser Fachbuchverlag, München.

EN ISO 15620, „Reibschweißen von metallischen Werkstoffen“, Juli 2000.

Freeman, R.(2003), „Flying high – with the aerospace industry“, TWI Bulletin.

Craine, R.E., Francis, A.(1987), „Frictional heat generated in the early stages of an orbital friction welding process“, Wear, 114, H.3, S. 355-365.

Grünauer, H.(1987), „Reibschweißen von Metallen“, Kontakt und Studium, Bd. 198, Expert Verlag, Ehningen bei Böblingen.

Goldau, H. und Behrend, Ch.(2006), „Präzisionsreibschweißen erschließt neue Anwendungsfelder“, Geesthachter Schweißstage '06, GKSS 2006/15, S.55-62.

Lison, R.(1996), „Schweißen und Löten von Sondermetallen und ihren Legierungen“, Fachbuchreihe Schweißtechnik, Bd. 118, Dt. Verl. für Schweißtechnik, DVS-Verlag, Düsseldorf.

Loose, T.(2007), „Einfluss des transienten Schweißvorganges auf Verzug, Eigenspannungen und Stabilitätsverhalten axial gedrückter Kreiszyinderschalen aus Stahl“, Dissertation, Universität Karlsruhe.

Maalekian, M.(2007), „A critical assessment of literature“, Science and Technology of Welding and Joining, vol.12, 8, S.738-759.

Maalekian, M.(2007), „Friction welding of high carbon steel in large cross-section“, PhD thesis, Graz University of Technology, Austria.

Maalekian, M. et al(2007), „Inverse modelling of heat generation in friction welding“, Mathematical modelling of weld phenomena 8, Verlag der TU Graz, S.881-890.

Na, S.-J.(1983), „Das Reibschweißen ungleichartiger Metalle“, Dissertation, TU Braunschweig.

Nentwig, A.W.E.(1986), „Reibschweißen von Wolfram“, Dt. Verl. für Schweißtechnik, DVS-Verlag, Düsseldorf.

Nentwig, A.W.E. und Appel, L.(1996), „Fügen nichtrotationssymmetrischer Teile durch Reibschweißen“, Stahl, H.4, S.34-36.

Neumann A. und Schober D.(1991), „Reibschweißen von Metallen; Konstruktion, Technologie, Qualitätssicherung“, Verlag Technik GmbH, Berlin.

- N.N.(2008), „Untersuchungen zum Orbitalreibschweißen von metallischen Werkstoffen und Mischverbindungen an nichtrotationssymmetrischen Verbindungsquerschnitten“, Forschungsvorhaben AiF-Nr. 14.962N, DVS-Nr. 5.038, Laufzeit 01/2007-12/2008.
- Schäfer, R.(1971), „Beitrag zum Reibschweißen von Metallen unter besonderer Berücksichtigung der Energieumwandlung während des Schweißprozesses“, Dissertation, TH Aachen.
- Trommer, F. et al(2008), „Das Orbital- und Präzisionsreibschweißen als innovative Fügeverfahren für moderne Werkstoffe“, DVS-Berichte Band 250, DVS Media GmbH, Düsseldorf, S.422-424.
- Vill, V.I.(1967), „Reibschweißen von Metallen“, DVS-Berichte Band 2, Deutscher Verlag für Schweißtechnik (DVS) GmbH, Düsseldorf.