

# **Untersuchungen zum Orbitalreibschweißen für ausgewählte Metallwerkstoffe**

**Dissertation**

zur Erlangung des Akademischen Grades

**Doktoringenieur  
(Dr.-Ing.)**

von Dipl.-Ing.(FH) Frank Trommer  
geb. am 12.09.1982 in Osterburg

genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau  
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Irmhild Martinek  
Prof. Dr.-Ing. Harald Goldau  
Prof. Dr-Ing. Prof. h. c. Klaus Dilger

Promotionskolloquium am 04.10.2011



Schriftenreihe Fügetechnik Magdeburg

Band 2/2011

**Frank Trommer**

**Untersuchungen zum Orbitalreibschweißen  
für ausgewählte Metallwerkstoffe**

Shaker Verlag  
Aachen 2011

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Magdeburg, Univ., Diss., 2011

Copyright Shaker Verlag 2011

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0546-2

ISSN 1616-7376

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

---

## Kurzfassung

Angesichts der zunehmenden Nachfrage an Materialmischbauweisen in der Industrie spielen Fügeverfahren wie das Reibschweißen eine immer größere Rolle. Das Standardverfahren ist das Rotationsreibschweißen, mit dem aufgrund seiner Prozesscharakteristik hauptsächlich rotationssymmetrische Voll- und Hohlprofile geschweißt werden. Für Bauteile mit anderen Fügequerschnitten kommt unter anderem das Orbitalreibschweißen in Frage. Das Orbitalreibschweißen wird in der Kunststoffindustrie schon seit einigen Jahren angewendet, für metallische Verbindungen ist dagegen noch kein industrieller Einsatz zu finden.

Die Analyse zum Stand der Technik zeigt beim Orbitalreibschweißen von metallischen Werkstoffen noch Unvollständigkeiten auf. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, einige dieser Erkenntnislücken zu schließen. Vor allem auf dem Gebiet geeigneter Reibschweißanlagen besteht noch großer Optimierungs- und Handlungsbedarf. Die Ergebnisse dieser Arbeit dienen der Weiterentwicklung verbesserter Maschinenkonzepte, um den Einsatz der Orbitalreibschweißtechnologie in der Industrie zu forcieren.

Es wird eine theoretische Betrachtung des Prozessablaufes durchgeführt, um einen Überblick zum prozessspezifischen Bewegungs- und Geschwindigkeitsablauf sowie zur Wärmeentwicklung zu erhalten. Vor den experimentellen Untersuchungen findet eine Analyse der verwendeten Reibschweißmaschine statt, um die Stärken und Schwachstellen des Systems aufzuzeigen. In praktischen Experimenten werden die wichtigsten Prozessparameter bei artgleichen Verbindungen aus dem unlegierten Baustahl S355J2, dem Vergütungsstahl C45, dem nichtrostenden Stahl X5CrNi18-10 und dem Aluminiumwerkstoff AlMgSi1 untersucht. Zur Anwendung kommt hierbei die Methodik der statistischen Versuchsplanung. In Vergleichsversuchen werden die Verfahren Orbital-, Rotations- und Linearreibschweißen gegenübergestellt. Zum einen wird der Wärmeeintrag anhand von Temperatur- und Verkürzungsmessungen verglichen, zum anderen werden Einsatzfelder für das Orbitalreibschweißen aufgezeigt. Die gewonnenen Erkenntnisse aus den theoretischen und praktischen Untersuchungen werden zur Aufstellung einer Simulation zum Orbitalreibschweißen für den unlegierten Baustahl S355J2 genutzt. Das Simulationsmodell basiert auf einem inversen Ansatz, um die eingebrachte Wärmeenergie zu definieren.

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung .....</b>	<b>III</b>
<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>V</b>
<b>Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen .....</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik.....</b>	<b>3</b>
2.1 Rotationsreibschweißen.....	3
2.2 Reibschweißen mit schwingender Relativbewegung.....	7
2.2.1 Linearreibschweißen.....	8
2.2.2 Orbitalreibschweißen .....	9
2.2.3 Ultraschallschweißen .....	16
2.3 Überblick der Berechnungs- und Simulationsmodelle .....	18
<b>3 Zusammenfassung des Kenntnisstandes und Ableitung der Aufgabenstellung.....</b>	<b>24</b>
3.1 Kenntnisstand und Potential zum Orbitalreibschweißen .....	24
3.2 Aufgabenstellung .....	27
<b>4 Theoretische Betrachtungen des Orbitalreibschweißens .....</b>	<b>29</b>
4.1 Antriebskonzepte .....	29
4.2 Analyse der Orbitalbewegung.....	31
4.3 Einfluss des Schwingkreisdurchmessers.....	38
4.4 Einfluss der Schwingfrequenz.....	47
4.5 Einfluss der Axialkraft .....	47
<b>5 Vorversuche zur Maschinenauswahl.....</b>	<b>49</b>
5.1 Versuchsbeschreibung .....	49
5.2 Versuchsergebnisse .....	50
5.3 Versuchsfazit.....	56
<b>6 Versuchsaufbau und Anlagentechnik .....</b>	<b>57</b>

---

6.1	Systembetrachtung Reibschweißmaschine-Spannmittel- Werkstück-Prozess .....	57
6.1.1	Werkzeugmaschine .....	58
6.1.2	Spannmittel .....	58
6.1.3	Werkstück .....	59
6.1.3.1	Probengeometrie.....	59
6.1.3.2	Versuchswerkstoffe.....	60
6.2	Messtechnik zur Untersuchung des Schweißprozesses .....	62
6.2.1	Messdatenerfassung.....	63
6.2.2	Schwingungsmessung .....	63
6.2.3	Kraft- und Momentenmessung.....	64
6.2.4	Temperaturmessung.....	65
6.3	Systemvoruntersuchungen .....	65
6.3.1	Analyse der statischen Systemsteifigkeit.....	65
6.3.2	Analyse Schwingfrequenz und Schwingkreisdurchmesser .....	67
6.3.3	Eigenfrequenz des Mehrkomponenten-Kraftmessensors.....	72
6.3.4	Zusammenfassung und Fazit der Systemvorunter- suchungen .....	73
<b>7</b>	<b>Versuchsdurchführung und -auswertung .....</b>	<b>75</b>
7.1	Grundlagen der statistischen Versuchsplanung .....	75
7.2	Untersuchungen zum unlegierten Stahl S355J2 .....	76
7.2.1	Versuchsplanung .....	76
7.2.2	Versuche zur statistischen Versuchsplanung .....	79
7.2.3	Versuchsauswertung und Fazit.....	83
7.2.4	Einflussanalyse der Schweißparameter .....	88
7.2.4.1	Einfluss der Schwingfrequenz.....	88
7.2.4.2	Einfluss des Schwingkreisdurchmessers.....	90
7.2.4.3	Einfluss des Reibdrucks.....	92
7.2.5	Querkraftuntersuchungen .....	95
7.2.6	Weitere Werkstoffprüfungen und metallografische Untersuchungen.....	98
7.2.7	Absicherung der Schweißparameter.....	100
7.3	Untersuchungen zum Vergütungsstahl C45 .....	102
7.3.1	Versuche zur statistischen Versuchsplanung .....	102
7.3.2	Einflussanalyse der Schweißparameter .....	105



---

7.3.2.1	Einfluss der Schwingfrequenz.....	106
7.3.2.2	Einfluss des Reibdrucks.....	107
7.3.2.3	Einfluss der Reibzeit .....	109
7.3.3	Metallografische Untersuchung .....	110
7.3.4	Absicherung der Schweißparameter.....	111
7.4	Untersuchungen zum nichtrostenden Stahl X5CrNi18-10.....	112
7.4.1	Versuche zur statistischen Versuchsplanung .....	112
7.4.2	Einflussanalyse der Schweißparameter .....	117
7.4.2.1	Einfluss der Schwingfrequenz.....	117
7.4.2.2	Einfluss des Reibdrucks.....	119
7.4.2.3	Einfluss der Reibzeit .....	120
7.4.3	Metallografische Untersuchung .....	122
7.4.4	Absicherung der Schweißparameter.....	122
7.5	Untersuchungen zur Aluminiumknetlegierung AlMgSi1 .....	124
7.5.1	Versuche zur statistischen Versuchsplanung .....	124
7.5.2	Einflussanalyse der Schweißparameter .....	128
7.5.2.1	Einfluss der Schwingfrequenz.....	128
7.5.2.2	Einfluss des Reibdrucks.....	130
7.5.2.3	Einfluss der Reibzeit .....	131
7.5.3	Metallografische Untersuchung .....	133
7.5.4	Absicherung der Schweißparameter.....	134
7.6	Verfahrensvergleich Orbital-, Rotations- und Linearreibschweißen .....	136
7.6.1	Vergleich Rotationsreibschweißen.....	136
7.6.2	Vergleich Linearreibschweißen.....	140
7.7	Zusammenfassung und Fazit der experimentellen ORS- Untersuchungen.....	146
7.7.1	Prozessgrundlagen .....	146
7.7.2	Maschinentechnik .....	149
7.7.3	Einsatzfelder .....	150
<b>8</b>	<b>Prozesssimulation Orbitalreibschweißen .....</b>	<b>153</b>
8.1	Berechnungsannahmen.....	153
8.1.1	Annahmen für das 2D-FE-Modell .....	153
8.1.2	Temperaturfeldberechnungen.....	155

---

8.1.3	Strukturmechanische Berechnungen.....	158
8.1.4	Gefügeumwandlungsberechnungen.....	159
8.2	Schweißsimulation und Vergleich mit dem Experiment.....	160
8.3	Untersuchung ausgewählter Einstellgrößen.....	162
8.3.1	Untersuchungen zum Wärmeeintrag.....	162
8.3.2	Untersuchungen zum Reibdruck.....	164
8.3.3	Untersuchungen zur Reibzeit.....	165
8.4	Zusammenfassung und Fazit der ORS-Simulationen.....	166
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>168</b>
<b>10</b>	<b>Schrifttum.....</b>	<b>170</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>184</b>
	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>190</b>
	<b>Anlagenverzeichnis.....</b>	<b>191</b>
	<b>Anlagen.....</b>	<b>I</b>
	<b>Danksagung.....</b>	<b>XXXII</b>
	<b>Lebenslauf.....</b>	<b>XXXIV</b>

## Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen

### Formelzeichen, Symbol,

<b>Abkürzung</b>	<b>Benennung</b>	<b>Einheit</b>
a	Schwingamplitude	[mm]
A	Querschnittsfläche	[mm <sup>2</sup> ]
A <sub>S</sub>	Amplitude	[mm]
A <sub>ü</sub>	überdeckte Fläche	[mm <sup>2</sup> ]
A <sub>iü</sub>	durchschnittlich überdeckte Fläche	[mm <sup>2</sup> ]
A <sub>ürel</sub>	relative überdeckte Fläche	[%]
b	Breite	[mm]
c	statische Steifigkeit	[N/μm]
c <sub>P</sub>	spezifische Wärmekapazität	[J/kg·K]
d	Durchmesser	[mm]
D	Spannungsverzerrungsmatrix	-
D <sub>S</sub>	Schwingkreisdurchmesser	[mm]
DMS	Dehnungsmessstreifen	-
f	Frequenz	[1/s]
F	Kraft	[kN]
F <sub>Ax</sub>	Axialkraft	[kN]
F <sub>Fl</sub>	Fliehkraft	[kN]
F <sub>Reib</sub>	Axialkraft beim Reiben	[kN]
F <sub>Stauch</sub>	Axialkraft beim Stauchen	[kN]
F <sub>X, Y, Z</sub>	Kraft in jeweiliger Richtung	[kN]
F <sub>Zug</sub>	Zugkraft	[N]
k	Werkstoffkonstante	[mm <sup>2</sup> /min <sup>2</sup> ]
l	Länge	[mm]
L	Bauteillänge	[mm]
LRS	Linearreibschweißen	-
M <sub>Reib</sub>	Reibmoment	[kNm]
n	Drehzahl	[1/min]
ORS	Orbitalreibschweißen	-
p	Druck	[N/mm <sup>2</sup> ]
p <sub>Ax</sub>	Axialdruck	[N/mm <sup>2</sup> ]
p <sub>Fü</sub>	Axialdruck bezogen auf Fügequerschnitt	[N/mm <sup>2</sup> ]
p <sub>Reib</sub>	Reibdruck	[N/mm <sup>2</sup> ]
p <sub>ReibM</sub>	Reibdruck, Maschineneinstellung	[bar]
p <sub>Stauch</sub>	Stauchdruck	[N/mm <sup>2</sup> ]
p <sub>StauchM</sub>	Stauchdruck, Maschineneinstellung	[bar]
P <sub>Reib</sub>	Reibleistung	[W]
q	Wärmestrom	[J/s]

## Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen, Symbole und Abkürzungen

$q^*$	Wärmestromdichte	[J/s·mm <sup>2</sup> ]
$q^*_{Umg}$	an die Umgebung abgegebene Wärme mittels Konvektion und Strahlung	[J/s·mm <sup>2</sup> ]
Q	Wärmeenergie	[J]
r	Radius	[mm]
RRS	Rotationsreibschweißen	-
RSWP	Gesamtsystem Reibschweiß- maschine-Spannmittel- Werkstück-Prozess	-
$R_m$	Zugfestigkeit	[N/mm <sup>2</sup> ]
$S_{Ges}$	Gesamtverkürzung	[mm]
$S_{Reib}$	Reibverkürzung	[mm]
$S_Z$	Axialweg	[mm]
SLV	Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt	-
t	Zeit	[s]
T	Temperatur	[K]
$T_{Fü}$	Fügezonentemperatur	[°C]
TWI	The Welding Institute	-
USS	Ultraschallschweißen	-
v	Geschwindigkeit	[m/s]
$v_{Rel}$	Relativgeschwindigkeit	[m/s]
VP	Versuchsplan	-
$W^*_{Vol}$	erzeugte Wärme durch Volumenarbeit	[J/s·mm <sup>2</sup> ]
$W_{Ax}$	durch Axialkraft hervorgerufene Arbeit	[J]
$W_{mech}$	mechanische Arbeit	[J]
$W_{Reib}$	Reibarbeit	[J]
<u>griechische Symbole:</u>		
$\alpha$	Wärmeausdehnungskoeffizient	[1/K]
$\alpha_K$	Wärmeübergangskoeffizient	[W/K·mm <sup>2</sup> ]
$\epsilon$	Emissionskoeffizient	-
$\epsilon$	Gesamtdehnung	-
$\epsilon_a$	Ausgangsdehnung	-
$\epsilon_{el}$	elastische Dehnung	-
$\epsilon_{pl}$	plastische Dehnung	-
$\epsilon_{th}$	thermische Dehnung	-
$\epsilon_{el}$	elastische Dehnung	-
$\epsilon_{um}$	umwandlungsbedingte Dehnung	-
$\epsilon_{ump}$	plastische umwandlungsbedingte Dehnung	-

## Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen, Symbole und Abkürzungen

---

$\epsilon_{kr}$	Kriechdehnung	-
$\sigma$	Spannung	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\vartheta$	Temperatur	[°C]
$\vartheta_S$	Schmelztemperatur	[°C]
$\lambda$	Wärmeleitkoeffizient	[W/m·K]
$\mu_{Reib}$	Reibungskoeffizient	-
$\pi$	Zahl Pi	-
$\rho$	Dichte	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\tau_{Reib}$	Reibschubspannung	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\varphi$	Phasenversatz	[°]
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit	[1/s]

### **Bemerkung:**

**Zur Berechnung der verwendeten Formeln müssen die Größen in SI-Einheiten eingesetzt werden, das heißt, sie müssen gegebenenfalls umgerechnet werden!**