

# Konduktiv unterstütztes Rührreibschweißen

Von der Fakultät für Maschinenwesen  
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von  
Alexander Harms

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisgen  
Univ.-Prof. Dr. Ing. Sven Jüttner

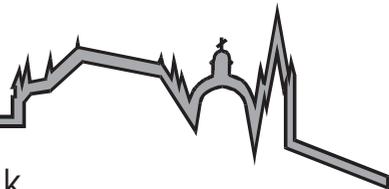
Tag der mündlichen Prüfung: 22.04.2014



**Alexander Harms**

---

**Konduktiv unterstütztes  
Rührreibschweißen**



Aachener Berichte Fügetechnik  
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. U. Reisgen

Band 3/2014

Shaker Verlag

**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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2014)

Copyright Shaker Verlag 2014

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2944-4

ISSN 0943-9358

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)

## Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik (ISF) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

Dem Institutsleiter Herrn Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisgen danke ich herzlich für die hervorragende Unterstützung und den wissenschaftlichen Freiraum bei allen meinen Projekten am Institut. Mein Dank gilt auch dem zweiten Bericht Herr Prof. Dr.-Ing. Sven Jüttner für die kritische Durchsicht, sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher für die Übernahme des Vorsitzes.

Meinem Oberingenieur Prof. Dr.-Ing. Markus Schleser bin ich sehr dankbar für das mir entgegen gebrachte Vertrauen und die Möglichkeit meine Ideen umzusetzen. Weiterhin gilt mein Dank allen Mitarbeitern des ISF für die sehr gute Zusammenarbeit und Unterstützung bei allen meinen Aufgaben. Es war eine schöne Zeit am ISF.

Ein großes Dankeschön geht an meinen Bürokollegen Herrn Dipl.-Ing. Alexander Schiebahn. Mit ihm konnte man nicht nur geistreiche Fachgespräche führen, er ist auch einfach ein guter Freund. Meinen beiden langjährigen wissenschaftlichen Hilfskräften Andreas Naumov und Paul Pauli möchte ich für ihren großen Eifer und Arbeitsbereitschaft danken. Umso mehr freut es mich, dass Herr Dipl.-Ing. Andreas Naumov die Arbeiten im Bereich FSW-Schweißen am ISF fortsetzt.

Die zum Gelingen dieser Arbeit beitragenden Untersuchungen wurden von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) und von der Forschungsvereinigung DVS – Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V. – im Rahmen des Paketvorhabens "Integration des Rührreibschweißens in Fertigungsprozessketten" gefördert. Für diese Förderung bedanke ich mich.

Meinen persönlichen Dank möchte ich meiner Familie aussprechen. Meinen Eltern Anke und Hans-Gerd Harms dafür, dass sie mir die Ausbildung ermöglicht und an mich geglaubt haben und auch meinem Bruder Allan sei für seine Unterstützung gedankt.

Vor allem bedanke ich mich bei meiner Frau Natalia für ihre Geduld und fast grenzloses Verständnis bezüglich meiner zeitlichen Abwesenheit während der intensiven Arbeitsphasen.

Ich widme diese Arbeit meinen drei Söhnen Maximilian, Leander und Konstantin.



## I. Inhaltsverzeichnis

I. Inhaltsverzeichnis.....	I
II. Bildverzeichnis .....	IV
III. Tabellenverzeichnis .....	X
IV. Abkürzungen und Formelzeichen.....	XII
V. Abstract.....	XV
1. Einleitung .....	1
1.1. Anwendungen des Rührreibschweißen .....	2
2. Stand der Technik .....	6
2.1. Rührreibschweißen.....	6
2.1.1. Verfahrensprinzip.....	6
2.1.2. Schweißparameter.....	8
2.1.3. Schweißnahtstruktur .....	9
2.1.4. Unregelmäßigkeiten beim Rührreibschweißen .....	10
2.1.5. Prozesswärme beim Rührreibschweißen.....	12
2.2. Rührreibschweißprozesse mit zusätzlicher Wärmeeinbringung .....	12
2.2.1. Laserstrahlunterstütztes Rührreibschweißen .....	13
2.2.2. Induktiv unterstütztes Rührreibschweißen .....	14
2.2.3. Ultraschallunterstütztes Rührreibschweißen .....	15
2.2.4. Autogenunterstütztes Rührreibschweißen mittels vorlaufender Gasflamme .....	15
2.2.5. Konduktiv unterstütztes Rührreibschweißen .....	16
2.2.6. Wärmebilanz konventioneller gegenüber konduktiv unterstütztem Rührreibschweißprozess .....	17
2.3. Bindemechanismen .....	20
2.3.1. Rekristallisation.....	20

---

2.3.2.	Diskontinuierliche und kontinuierliche Rekristallisation .....	21
2.3.3.	Geometrisch dynamische Rekristallisation (GDRX) .....	22
2.3.4.	Dynamische Erholung .....	22
2.3.5.	Ausbildung des Gefüges beim Rührreißschweißen .....	23
3.	Ziel der Arbeit .....	25
4.	Versuchswerkstoffe .....	27
4.1.	Aluminiumlegierung .....	27
4.1.1.	Aluminiumlegierungen AW-5454 und AW-5754 .....	27
4.1.2.	Aluminiumlegierung AW-6016 .....	28
4.2.	Stahlwerkstoffe .....	29
4.2.1.	Tiefziehstahl DC04 .....	29
4.2.2.	Höherfester Stahl H300 .....	29
4.3.	Magnesiumlegierung AZ31B .....	29
5.	Versuchsaufbau .....	31
5.1.	Antriebsmaschine .....	31
5.2.	Stromquellen .....	32
5.3.	Kontaktierungseinheit .....	36
5.4.	Messaufbau .....	40
5.5.	Verwendete Schweißwerkzeuge .....	48
6.	Prüfung geschweißter Verbindungen .....	51
6.1.	Zug- und Biegeprüfung .....	51
6.2.	Metallographische Untersuchung und Härtemessung .....	54
7.	Schweißversuche an artgleichen Verbindungen .....	56
7.1.	Ermittlung von Prozessparameterfeldern .....	58
7.2.	Vergleich von Querschliffen .....	69
7.2.1.	AW-6016 .....	69

---

7.2.2. AW-5754 .....	80
7.2.3. AW-5454 .....	86
7.3. Vergleich von Prozesskräften .....	89
7.4 Performance-Vergleich .....	98
8. Schweißen von Mischverbindungen .....	101
8.1. Aluminium-Stahl-Mischverbindungen .....	104
8.2. Magnesium-Stahl-Mischverbindungen .....	107
9. An den Rührreibschweißprozess angepasste Stromquelle .....	111
9.1. Kritische Betrachtung der bisher eingesetzten Versuchsaufbaus .....	111
9.2. Rührreibschweißanlage mit angepasster Stromquelle .....	114
10. Beispiele für mögliche industrielle Umsetzungen .....	116
11. Zusammenfassung der Ergebnisse und Ausblick .....	120
12. Literaturverzeichnis .....	122