

Manuel Johannes Keßler

**Fehlerdetektion und -vermeidung beim  
Rotationsreibschweißen**



## Forschungsberichte IWB

Band 352

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2019

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.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt.  
Sämtliche, auch auszugsweise Verwertungen  
bleiben vorbehalten.

Copyright © utzverlag GmbH · 2020

ISBN 978-3-8316-4842-9 (gebundenes Buch)  
ISBN 978-3-8316-7531-9 (E-Book)

Printed in Germany  
utzverlag GmbH, München  
089-277791-00 · [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

# Inhalt

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>Verzeichnis der Formelzeichen</b>	<b>VII</b>
Lateinische Buchstaben . . . . .	VII
Griechische Buchstaben . . . . .	X
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Verfahrensprinzip des Rotationsreibschweißens . . . . .	1
1.2 Motivation . . . . .	2
1.3 Zielsetzung . . . . .	3
1.4 Aufbau der Arbeit . . . . .	4
<b>2 Grundlagen und Stand der Forschung</b>	<b>5</b>
2.1 Allgemeines . . . . .	5
2.2 Verfahrensgrundlagen . . . . .	5
2.2.1 Einordnung des Rotationsreibschweißens . . . . .	5
2.2.2 Verfahrensvarianten . . . . .	6
2.2.3 Ablauf des Prozesses . . . . .	10
2.2.4 Rotationsreibschweißen von Stählen . . . . .	12
2.3 Mangansulfide in Stählen . . . . .	14
2.3.1 Allgemeines . . . . .	14
2.3.2 Auswirkung von Mangansulfiden auf die Festigkeitseigenschaften . . . . .	14
2.3.3 Problematik für das Rotationsreibschweißen . . . . .	16
2.4 Qualitätssicherung beim Rotationsreibschweißen . . . . .	17
2.5 Ultraschall in der Produktprüfung . . . . .	22
2.5.1 Allgemeines . . . . .	22
2.5.2 Physikalische Grundlagen . . . . .	22
2.5.3 Ultraschallprüfung an heißen Metallen . . . . .	26

2.5.4	Phased-Array-Prüfsysteme . . . . .	27
2.6	Simulation des Rotationsreibschweißens . . . . .	31
2.6.1	Allgemeines . . . . .	31
2.6.2	Beschreibung des Fließverhaltens . . . . .	32
2.6.3	Reibmodelle . . . . .	38
2.7	Zusammenfassung und Handlungsbedarf . . . . .	43
2.8	Vorgehensweise . . . . .	43
<b>3</b>	<b>Prozessmodell</b>	<b>47</b>
3.1	Allgemeines . . . . .	47
3.2	Grundstruktur des Modells . . . . .	47
3.3	Werkstoffmodell . . . . .	49
3.3.1	Allgemeines . . . . .	49
3.3.2	Viskoelastisches Maxwell-Modell . . . . .	49
3.3.3	Implementierung in LS-Dyna . . . . .	50
3.3.4	Verwendete Materialkennwerte . . . . .	66
3.4	Reibmodell . . . . .	73
3.5	Zusammenfassung . . . . .	75
<b>4</b>	<b>System- und Messtechnik</b>	<b>77</b>
4.1	Allgemeines . . . . .	77
4.2	Versuchsaufbau . . . . .	77
4.2.1	Rotationsreibschweißanlage . . . . .	77
4.2.2	Verwendeter Werkstoff und Probengeometrie . . . . .	79
4.2.3	Prozessparameter . . . . .	80
4.2.4	Wegregelung . . . . .	81
4.3	Ultraschall-Prozessüberwachung . . . . .	85
4.3.1	Integration des Messsystems . . . . .	85
4.3.2	Signalauswertung und -verarbeitung . . . . .	87
4.3.3	Referenzversuch . . . . .	88
4.4	Detektierbare Störgrößen . . . . .	89
4.5	Zusammenfassung . . . . .	95
<b>5</b>	<b>Validierung des Modells und Plausibilitätsbetrachtung</b>	<b>97</b>
5.1	Allgemeines . . . . .	97
5.2	Verlauf der Prozessgrößen . . . . .	97

5.3	Vergleich mit den Ultraschall-Messergebnissen . . . . .	105
5.3.1	Korrelation von Temperaturfeld und Laufzeitverzögerung	105
5.3.2	Schalltransmission an den Stoßflächen . . . . .	109
5.4	Zusammenfassung . . . . .	112
<b>6</b>	<b>Prozessuntersuchungen an verunreinigten Werkstoffen</b>	<b>115</b>
6.1	Allgemeines . . . . .	115
6.2	Wirkmechanismen der Fehlerentstehung . . . . .	115
6.2.1	Schweißversuche . . . . .	116
6.2.2	Ergebnisse . . . . .	118
6.2.3	Fazit . . . . .	121
6.3	Strategie zur Fehlervermeidung . . . . .	122
6.3.1	Auswahl der Maßnahmen . . . . .	122
6.3.2	Anpassung der Prozessführung . . . . .	124
6.3.3	Ergebnisse . . . . .	127
6.3.4	Fazit . . . . .	129
6.4	Zusammenfassung . . . . .	130
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>131</b>
7.1	Zusammenfassung . . . . .	131
7.2	Nutzenbewertung . . . . .	133
7.3	Ausblick . . . . .	136
<b>Literatur</b>		<b>139</b>
<b>8</b>	<b>Studienarbeiten</b>	<b>159</b>
<b>9</b>	<b>Anhang</b>	<b>161</b>
9.1	Spannungs-Dehnraten-Zusammenhang . . . . .	161
9.2	Algorithmus zur Verfolgung der Knotenbewegung . . . . .	162
9.3	Kennwerte des Modells . . . . .	165
9.4	Approximierter Verlauf der Schallgeschwindigkeit . . . . .	165
9.5	Verwendete Software . . . . .	166

- 319 **Julian Christoph Sebastian Backhaus:** Adaptierbares aufgabenorientiertes Programmiersystem für Montagesysteme  
264 Seiten - ISBN 978-3-8316-4570-1
- 320 **Sabine G. Zitzlsberger:** Flexibles Werkzeug zur Umformung von Polycarbonatplatten unter besonderer Beachtung der optischen Qualität  
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-4573-2
- 321 **Christian Thiemann:** Methode zur Konfiguration automatisierter thermografischer Prüfsysteme  
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-4574-9
- 322 **Markus Westermeier:** Qualitätsorientierte Analyse komplexer Prozessketten am Beispiel der Herstellung von Batteriezellen  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4586-2
- 323 **Thorsten Klein:** Agiles Engineering im Maschinen- und Anlagenbau  
284 Seiten - ISBN 978-3-8316-4598-5
- 324 **Markus Wiedemann:** Methodik zur auslastungsorientierten Angebotsterminierung für hochvariante Produkte mit kundenindividuellen Leistungsanteilen  
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-4599-2
- 325 **Harald Krauss:** Qualitätssicherung beim Laserstrahlschmelzen durch schichtweise thermografische In-Process-Überwachung  
304 Seiten - ISBN 978-3-8316-4628-9
- 326 **Stefan Krottil:** Online-Simulation von fluidischen Prozessen in der frühen Phase der Maschinen- und Anlagenentwicklung  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4636-4
- 327 **Andreas Roth:** Modellierung des Rührschweißens unter besonderer Berücksichtigung der Spalttoleranz  
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4638-5
- 328 **Philipp Benjamin Michaeli:** Methodik zur Entwicklung von Produktionsstrategien am Beispiel der Triebwerksindustrie  
288 Seiten - ISBN 978-3-8316-4642-5
- 329 **Michael Richard Niehues:** Adaptive Produktionssteuerung für Werkstattfertigungssysteme durch fertigungsbegleitende Reihenfolgebildung  
314 Seiten - ISBN 978-3-8316-4650-0
- 330 **Johannes Stock:** Remote-Laserstrahltrennen von kohlenstoffaserverstärktem Kunststoff  
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4662-3
- 331 **Andreas Fabian Hees:** System zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme  
218 Seiten - ISBN 978-3-8316-4676-0
- 332 **Fabian Michael Distel:** Methodische Auslegung ultraschallbasierter berührungsloser Handhabungssysteme  
292 Seiten - ISBN 978-3-8316-4679-1
- 333 **Christian Plehn:** A Method for Analyzing the Impact of Changes and their Propagation in Manufacturing Systems  
276 Seiten - ISBN 978-3-8316-4695-1
- 334 **Josef Huber:** Verfahren zur Klassifikation von Ungängen bei der optischen Prüfung von Batterie-separatoren  
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-4593-0
- 335 **Martin Schmid:** Kognitive Prozesssteuerung zur Steigerung der Ressourceneffizienz in der Druckindustrie  
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-4139-0
- 336 **Alexander Beltzki:** Rechnergestützte Minimierung des Verzugs laserstrahlgeschweißter Bauteile  
234 Seiten - ISBN 978-3-8316-4254-0
- 337 **Georg Albin Josef Götz:** Methode zur Steigerung der Formflexibilität von Verpackungsmaschinen  
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4332-5
- 338 **Thomas Knoche:** Elektrolytbefüllung prismatischer Lithium-Ionen-Zellen  
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-4714-9
- 339 **Johannes Graf:** Ein Vorgehensmodell zur automatisierten und qualitätskonformen Handhabung textiler Halbzeuge  
262 Seiten - ISBN 978-3-8316-4745-3
- 340 **Georgios Dimitrios Theodosiadi:** Thermal Joining based on Reactive Multilayered Nanofolios  
110 Seiten - ISBN 978-3-8316-4747-7
- 341 **Fabian Karl Keller:** Methodik zur energiebezugsorientierten Auftragsplanung  
218 Seiten - ISBN 978-3-8316-4761-3

## Forschungsberichte IWB ab Band 342

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,  
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Forschungsberichte IWB ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim  
utzverlag, München, Fax 089-277791-01, info@utzverlag.de, www.utzverlag.de

- 342 **Johannes Karl Bernhard Schmalz:** Rechnergestützte Auslegung und Auswahl von Greifersystemen  
240 Seiten - ISBN 978-3-8316-4768-2
- 343 **Christoph Richter:** Modellbasierte Entwicklung von Mensch-Maschine-Schnittstellen im Maschinen- und Anlagenbau  
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-4773-6
- 344 **Benedikt Sager:** Konfiguration globaler Produktionsnetzwerke  
288 Seiten - ISBN 978-3-8316-4780-4
- 345 **Alexander Friedrich Schönmann:** Antizipative Identifikation produktionstechnologischer Substitutionsbedarfe durch Verwendung von Zyklusmodellen  
242 Seiten - ISBN 978-3-8316-4787-3
- 346 **Christian Rebelein:** Prognosefähige Simulation von Dämpfungseffekten in mechanischen Werkzeugmaschinenstrukturen  
270 Seiten - ISBN 978-3-8316-4790-3
- 347 **Toni Adam Krol:** Beitrag zur simulationsgestützten Steigerung der Bauteilmaßhaltigkeit für laserbasierte Strahlschmelztechnologien  
272 Seiten - ISBN 978-3-8316-4807-8
- 348 **Joachim Jan Michniewicz:** Automatische simulationsgestützte Arbeitsplanung in der Montage  
250 Seiten - ISBN 978-3-8316-4814-6

- 349 **Thilo Martens:** Bedarfsgerechte Rohbiogasproduktion durch eine modellunterstützte Anpassung der Fütterungsstrategie  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4815-3
- 350 **Simone Dietrich:** Lichtbogenbasierte Pulverherstellung für die additive Fertigung  
246 Seiten - ISBN 978-3-8316-4822-1
- 351 **Christian Markus Seidel:** Finite-Elemente-Simulation des Aufbauprozesses beim Laserstrahlschmelzen  
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-4833-7
- 352 **Manuel Johannes Keßler:** Fehlerdetektion und -vermeidung beim Rotationsreißschweißen.  
202 Seiten - ISBN 978-3-8316-4842-9