

# **Die Kornstruktur und der Heißrisswiderstand von Laserstrahlschweißnähten in Aluminiumlegierungen**

von Dr.-Ing. Christian Hagenlocher  
Universität Stuttgart



utzverlag München

Als Dissertation genehmigt  
von der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik  
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf  
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. Dr. h. c. Siegfried Schmauder

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

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2020

D 93

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

Copyright © utzverlag GmbH 2020

ISBN 978-3-8316-4864-1

Printed in Germany

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

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>5</b>
<b>Verzeichnis der Symbole.....</b>	<b>7</b>
<b>Kurzfassung der Arbeit.....</b>	<b>13</b>
<b>Extended Abstract .....</b>	<b>15</b>
<b>1 Einführung .....</b>	<b>17</b>
1.1 Grundlagen .....	18
1.2 Zielsetzung .....	25
1.3 Aufbau der Arbeit.....	26
<b>2 Thermomechanische Belastung von Schweißnähten .....</b>	<b>28</b>
2.1 Methode.....	28
2.2 Änderung des Dehnungsverhaltens bei Rissbildung.....	35
2.3 Fazit.....	40
<b>3 Einfluss der Kornstruktur auf den Heißbrisswiderstand.....</b>	<b>44</b>
3.1 Bewerten der Kornstruktur .....	45
3.2 Bestimmung der kritischen Dehnraten.....	49
3.3 Ergebnis.....	51
<b>4 Einfluss der Prozessparameter auf die Kornstruktur .....</b>	<b>54</b>
4.1 Implizite Berechnung der lokalen Erstarrungsbedingungen .....	57
4.2 Analytische Beschreibung des Parametereinflusses auf die Kornstruktur.....	63
4.3 Fazit.....	77
<b>5 Einfluss der Prozessparameter auf den Heißbrisswiderstand .....</b>	<b>78</b>
5.1 Analytische Beschreibung des Heißbrisswiderstandes .....	80
5.2 Validierung am Beispiel von AA6016.....	83
5.3 Fazit.....	89

---

<b>6</b>	<b>Prozessoptimierung auf der Grundlage der Modellierung .....</b>	<b>92</b>
6.1	Statische Beeinflussung der Kornstruktur.....	92
6.2	Dynamische Beeinflussung der Kornstruktur .....	102
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>107</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>111</b>
	<b>Danksagung.....</b>	<b>123</b>
<b>A</b>	<b>Anhang: Tabellarische Darstellung der Versuchsparameter und Ergebnisse.....</b>	<b>125</b>
A.1	Kritische Dehnraten .....	126
A.2	Kornstrukturen.....	129

# Kurzfassung der Arbeit

Die Kornstruktur einer Schweißnaht beeinflusst ihren Widerstand gegen die Bildung von Nahtmitteneißbrissen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der übergreifende Zusammenhang zwischen Schweißparameter, Kornstruktur und Heißbrisswiderstand beim Laserstrahlschweißen durch analytische Gleichungen beschrieben und das resultierende Modell experimentell validiert.

Die thermomechanische Belastung von Laserstrahlschweißnähten bei der Bildung von Heißbrissen wurde mit dem optischen Messverfahren der digitalen Bildkorrelation während des Schweißprozesses ermittelt. Mit diesem Messverfahren wurde außerdem die kritische Dehnrage als Quantifizierung für den Heißbrisswiderstand identifiziert und der Zusammenhang zwischen Kornstruktur und Heißbrisswiderstand experimentell nachgewiesen.

Zur Beschreibung des Einflusses der Schweißparameter auf die Kornstruktur von Laserstrahlschweißnähten in Aluminiumlegierungen, wurden aus der zweidimensionalen Wärmeleitungsgleichung explizite analytische Gleichungen abgeleitet. Die Gleichungen zeigen, dass die Art der Kornstruktur durch die eingebrachte Leistung pro Schweißnahttiefe bestimmt wird und die Feinheit dieser Kornstruktur durch die Streckenenergie pro Schweißnahttiefe. Metallografische Analysen von geschweißten Nähten belegen, dass das Modell für eine Vielfalt von Prozessparametern die Kornstruktur innerhalb der gemessenen Streuung und Messunsicherheit zuverlässig vorhersagt.

Dieses Modell wurde anschließend mit dem RDG-Kriterium von Rappaz kombiniert, das die Bildung von Heißbrissen anhand der Druckbilanz in den Schmelzefilmen zwischen den erstarrenden Körnern beschreibt. Hierbei werden die wesentlichen Druckänderungen durch Erstarrungsschrumpfung und thermomechanische Verformung hervorgerufen. Die Kombination der beiden Modelle beschreibt den Einfluss der Schweißparameter auf die kritische Dehnrage, die zur Bildung von Heißbrissen überschritten werden muss. Es zeigt sich, dass die eingebrachte Streckenenergie pro Schweißnahttiefe der Schlüsselparameter ist, um den Wert dieser Grenze,

also den Heißrisswiderstand der Schweißnaht, zu beeinflussen. Die berechneten kritischen Dehnraten stimmen mit den mittels digitaler Bildkorrelation experimentell bestimmten kritischen Dehnraten innerhalb der gemessenen Streuung überein.

Durch die Kenntnis der in dieser Arbeit hergeleiteten Zusammenhänge, kann bei Laserstrahlschweißnähten allein durch die Prozessführung und ohne spezielle Legierungen oder Zusatzwerkstoffe die Kornstruktur optimiert werden und der Heißrisswiderstand erhöht werden. Die Anwendbarkeit der Modelle zur Prozessoptimierung wurde abschließend am Beispiel verschiedener Prozessstrategien, wie z.B. Schweißen mit Vorschüben über 20 m/min und örtliche Strahloszillation, nachgewiesen

## Extended Abstract

The grain structure of a weld affects its resistance against the formation of hot cracks. Within the context of this work, the overall relation between welding parameters, grain structure and resistance against hot crack formation was described by analytical equations. The resulting model was experimentally validated.

The thermomechanical load of a weld during the formation of hot cracks was determined by means of the optical measurement technique of digital image correlation during welding. By means of this measurement technique, the critical strain rate was identified as a quantitative value, which describes the resistance against hot crack formation. Additionally, the relationship between grain structure and the resistance against hot cracking was verified experimentally.

Explicit analytical equations were derived from the two-dimensional heat conduction equation, in order to describe the influence of the welding parameters on the grain structure of laser beam welds in aluminum alloys. The equations show that the morphology of the grain structure is determined by the power per welded depth and the refinement of this grain structure is determined by the line energy per welding depth. Metallographic analyses of experimentally generated weld seams show that the model predicts the grain structure in a wide range of process parameters with sufficient accuracy.

This model was combined with the RDG criterion of Rappaz, which describes the formation of hot cracks based on the pressure balance between solidification shrinkage and thermomechanical deformation. The combination of the two models describes the influence of the welding parameters on the critical strain rate for the formation of hot cracks. It is shown that the line energy per welded depth is the key parameter to influence the value of the hot cracking resistance of the weld seam. The calculated critical strain rates agree well with the experimentally determined critical strain rates measured by means of digital image correlation.

The knowledge of the relations, which were derived in this thesis, allows for an increase of the hot cracking resistance of laser beam welds solely by adapting the process parameters without the application of special alloys or filler materials. Finally, the process optimization by means of the derived models was demonstrated with the development of various process strategies, e.g. high-speed welding and spatial beam oscillation.

# Laser in der Materialbearbeitung

## Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW ab 2005 erschienen im Herbert Utz Verlag, München

### Thomas Fuhrich

Marangoni-effekt beim Laserstrahl-tiefschweißen von Stahl

2005, 163 Seiten, ISBN 3-8316-0493-2

### Daniel Müller

Pulseenergiestabilität bei regenerativen Kurzpuls-verstärkern im Scheibenlaserdesign

2005, 172 Seiten, ISBN 3-8316-0508-4

### Jiancun Gao

Neodym-dotierte Quasi-Drei-Niveau-Scheiben-laser: Hohe Ausgangsleistung und Frequenzver-dopplung

2005, 148 Seiten, ISBN 3-8316-0521-1

### Wolfgang Gref

Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen mit der Fokusmatrixtechnik

2005, 136 Seiten, ISBN 3-8316-0537-8

### Michael Weikert

Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laser-pulsen

2005, 116 Seiten, ISBN 3-8316-0573-4

### Julian Sigel

Lasergenerieren metallischer Bauteile mit vari-ablem Laserstrahldurchmesser in modularen Fert-igungssystemen

2006, 132 Seiten, ISBN 3-8316-0572-6

### Andreas Ruß

Schweißen mit dem Scheibenlaser-Potentiale der guten Fokussierbarkeit

2006, 142 Seiten, ISBN 3-8316-0580-7

### Gabriele Seibold

Absorption technischer Oberflächen in der La-sermaterialbearbeitung

2006, 156 Seiten, ISBN 3-8316-0618-8

### Dirk Lindenau

Magnetisch beeinflusstes Laserstrahlschweißen

2007, 180 Seiten, ISBN 978-3-8316-0687-0

### Jens Walter

Gesetzmäßigkeiten beim Lasergenerieren als Basis für die Prozesssteuerung und -regelung

2008, 140 Seiten, ISBN 978-3-8316-0770-9

### Heiko Ridderbusch

Longitudinal angeregte passiv gütegeschaltete Laserzündkerze

2008, 175 Seiten, ISBN 978-3-8316-0840-9

### Markus Leimser

Strömungsinduzierte Einflüsse auf die Nahteigen-schaften beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen

2009, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-0854-6

### Mikhail Larionov

Kontaktierung und Charakterisierung von Kristal-len für Scheibenlaser

2009, 186 Seiten, ISBN 978-3-8316-0855-3

### Jürgen Müller-Borhanian

Kamerabasierte In-Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen

2009, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-0890-4

### Andreas Letsch

Charakterisierung allgemein astigmatischer La-serstrahlung mit der Methode der zweiten Mo-mente

2009, 176 Seiten, ISBN 978-3-8316-0896-6

### Thomas Kübler

Modellierung und Simulation des Halbleiterschei-benlasers

2009, 152 Seiten, ISBN 978-3-8316-0918-5

### Günter Ambrosy

Nutzung elektromagnetischer Volumenkräfte beim Laserstrahlschweißen

2009, 170 Seiten, ISBN 978-3-8316-0925-3

### Agnes Ott

Oberflächenmodifikation von Aluminiumlegierun-gen mit Laserstrahlung: Prozessverständnis und Schichtcharakterisierung

2010, 226 Seiten, ISBN 978-3-8316-0959-8

### Detlef Breiting

Gasphaseneinflüsse beim Abtragen und Bohren mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung

2010, 200 Seiten, ISBN 978-3-8316-0960-4

### Dmitrij Walter

Online-Qualitätssicherung beim Bohren mittels ultrakurz gepulster Laserstrahlung

2010, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-0968-0

### Jan-Philipp Weberpals

Nutzen und Grenzen guter Fokussierbarkeit beim Laserstrahlschweißen

2010, 154 Seiten, ISBN 978-3-8316-0995-6

### Angelika Beyertt

Yb:KYW regenerativer Verstärker für ultrakurze Pulse

2010, 166 Seiten, ISBN 978-3-8316-4002-7

**Christian Stolzenburg**

Hochrepetierende Kurzpuls-Scheibenlaser im infraroten und grünen Spektralbereich  
2011, 184 Seiten, ISBN 978-3-8316-4041-6

**Svent-Simon Beyertt**

Quantenfilm-Pumpen zur Leistungsskalierung von Halbleiter-Scheibenlasern  
2011, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4051-5

**Sonja Kittel**

Verzugsarmes Laserstrahlschweißen an axial-symmetrischen Bauteilen  
2011, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-4088-1

**Andrey Andreev**

Schweißen mit dem Scheibenlaser im Getriebebau – Prozessmerkmale und Anlagenkonzepte  
2011, 140 Seiten, ISBN 978-3-8316-4103-1

**Christian Föhl**

Einsatz ultrakurz gepulster Laserstrahlung zum Präzisionsbohren von Metallen  
2011, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-4120-8

**Andreas Josef Birnesser**

Prozessregelung beim Laserstrahlschweißen  
2011, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4133-8

**Christoph Neugebauer**

Thermisch aktive optische Bauelemente für den resonatorinternen Einsatz beim Scheibenlaser  
2012, 220 Seiten, ISBN 978-3-8316-4178-9

**Andreas Dauner**

Fluidmechanische Maßnahmen zur Reduzierung von Schmelzablagerungen beim Hochgeschwindigkeitslaserbohren  
2012, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4194-9

**Axel Heß**

Vorteile und Herausforderungen beim Laserstrahlschweißen mit Strahlquellen höchster Fokussierbarkeit  
2012, 164 Seiten, ISBN 978-3-8316-4198-7

**Christian Gehrke**

Überwachung der Struktureigenschaften beim Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laserpulsen  
2013, 164 Seiten, ISBN 978-3-8316-4271-7

**David Schindhelm**

In-Prozess Qualitätssicherung für das Laserstrahlschneiden von Metallen  
2013, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4345-5

**Tilman Froschmeier-Hanss**

Festigkeitsverhalten laserstrahlgeschweißter belastungsangepasster Stahlwerkstoffverbindungen  
2014, 200 Seiten, ISBN 978-3-8316-4347-9

**Moritz Vogel**

Specialty Fibers for High Brightness Laser Beam Delivery  
2014, 187 Seiten, ISBN 978-3-8316-4382-0

**Andreas Michalowski**

Untersuchungen zur Mikrobearbeitung von Stahl mit ultrakurzen Laserpulsen  
2014, 176 Seiten, ISBN 978-3-8316-4424-7

**Georg Stöppler**

Untersuchung eines OPOs im mittleren Infrarot im Hinblick auf Anwendungen für minimalinvasive Chirurgie  
2015, 144 Seiten, ISBN 978-3-8316-4437-7

**Patrick Mucha**

Qualitäts- und produktivitätsbeeinflussende Mechanismen beim Laserschneiden von CF und CFK  
2015, 120 Seiten, ISBN 978-3-8316-4516-9

**Claus-Dieter Reiniger**

Fluiddynamische Effekte beim Remote-Laserstrahlschweißen von Blechen mit Fügespalt  
2015, 188 Seiten, ISBN 978-3-8316-4528-2

**Andreas Leitz**

Laserstrahlschweißen von Kupfer- und Aluminiumwerkstoffen in Mischverbindung  
2016, 172 Seiten, ISBN 978-3-8316-4549-7

**Peter Stritt**

Prozessstrategien zur Vermeidung von Heißrisen beim Remote-Laserstrahlschweißen von AlMgSi 6016  
2016, 194 Seiten, ISBN 978-3-8316-4555-8

**Katrin Sarah Wentsch**

Analyse Ytterbium-dotierter Materialien für den Einsatz in ultrakurz-gepulsten Scheibenlasersystemen  
2016, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-4578-7

**Jan-Philipp Negel**

Scheibenlaser-Multipassverstärker für ultrakurze Laserpulse mit Ausgangsleistungen im kW-Bereich  
2017, 142 Seiten, ISBN 978-3-8316-4632-6

**Christian Freitag**

Energietransportmechanismen bei der gepulsten Laserbearbeitung Carbonfaser verstärkter Kunststoffe  
2017, 152 Seiten, ISBN 978-3-8316-4638-8

**Andreas Popp**

Faserlaser und Faserlaserverstärker als Brillanzkonverter für Scheibenlaserstrahlen  
2017, 242 Seiten, ISBN 978-3-8316-4643-2

**Karin Heller**

Analytische Temperaturfeldbeschreibung beim Laserstrahlschweißen für thermographische Prozessbeobachtung  
2017, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4654-8

**Stefan Piehler**

Resonatorinterne Kompensation thermisch induzierter Wellenfrontstörungen in hochbrillanten Scheibenlasern  
2017, 148 Seiten, ISBN 978-3-8316-4690-6

**Felix Abt**

Bildbasierte Charakterisierung und Regelung von Laserschweißprozessen  
2017, 232 Seiten, ISBN 978-3-8316-4691-3

**Volker Rominger**

Untersuchungen der Prozessvorgänge bei Einschweißungen in Baustahl mit Lasern hoher Brillanz  
2017, 186 Seiten, ISBN 978-3-8316-4692-0

**Thomas Rataj**

Hochleistungstaugliche faseringegrierte Strahlweiche  
2018, 142 Seiten, ISBN 978-3-8316-4733-0

**Michael Diez**

Pulsformung zur schädigungsarmen Laserbearbeitung von Silizium  
2018, 194 Seiten, ISBN 978-3-8316-4737-8

**Andreas Heider**

Erweitern der Prozessgrenzen beim Laserstrahlschweißen von Kupfer mit Einschweißtiefen zwischen 1 mm und 10 mm  
2018, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-4738-5

**Marcel Schäfer**

Energetische Beeinflussung von Schmelzfluss und Heißrissbildung beim Laserstrahlschweißen von Vergütungsstahl  
2018, 146 Seiten, ISBN 978-3-8316-4742-2

## Laser in der Materialbearbeitung

### Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW ab 2019 erschienen im utzverlag, München

**Tom Dietrich**

Gitterwellenleiterstrukturen zur Strahlformung in Hochleistungsscheibenlasern  
2019, 154 Seiten, ISBN 978-3-8316-4785-9

**Martin Rumpel**

Applications of Grating Waveguide Structures in Solid-State Lasers  
2019, 112 Seiten, ISBN 978-3-8316-4801-6

**Michael Eckerle**

Generation and amplification of ultrashort pulsed high-power cylindrical vector beams  
2019, 112 Seiten, ISBN 978-3-8316-4804-7

**Martin Stubenvoll**

Messung und Kompensation thermisch induzierter Wellenfrontdeformationen in optischen Elementen  
2019, 118 Seiten, ISBN 978-3-8316-4819-1

**Christian Hagenlocher**

Die Kornstruktur und der Heißrisswiderstand von Laserstrahlschweißnähten in Aluminiumlegierungen  
2020, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4864-1