

Energetische Beeinflussung von Schmelzefluss und Heißrissbildung beim Laserstrahlschweißen von Vergütungsstahl

von Dr.-Ing. Marcel Schäfer
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
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.-Ing. Uwe Reisgen

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., 2018

D 93

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch
begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung,
des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der
Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem
Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungs-
anlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwen-
dung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2018

ISBN 978-3-8316-4742-2

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

Tel.: 089-277791-00 · www.utzverlag.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Verzeichnis der Symbole	5
Kurzfassung der Arbeit	9
Extended Abstract	13
1 Einleitung	16
1.1 Motivation	16
1.2 Aufbau der Arbeit.....	18
2 Stand der Technik	19
2.1 Der Laser in der Fertigungstechnik.....	19
2.2 Nahtfehler beim Schweißen von Getriebebauteilen.....	20
2.2.1 Schmelzespritzer	21
2.2.2 Hohlräume.....	21
2.2.3 Risse	22
2.3 Heißrisse bei hochfesten Stahlwerkstoffen	23
2.3.1 Definition und Detektion von Heißrisen	23
2.3.1.1 Rissanalyse durch metallografische Zielpräparation	25
2.3.1.2 Kumulierte Risslänge als Maß für die Heißrissempfindlichkeit	26
2.3.2 Modelle und Kriterien der Heißrissempfindlichkeit.....	28
2.3.3 Einflussmöglichkeiten auf die Heißrissempfindlichkeit.....	38
3 Wirkung der Energieverteilung auf die Heißrissempfindlichkeit	44
3.1 Wirkung von Strahlqualität und Streckenenergie	45
3.2 Wirkung der Fokussierung	50

3.3	Charakteristische Prozessfrequenz	56
3.3.1	Oszillation der Dampfkapillartiefe.....	56
3.3.2	Oszillation der Schmelzebadlänge	60
3.3.3	Periodizität der Erstarrungsstruktur	61
3.3.4	Periodizität der Heißrissbildung.....	63
4	Wirkung der Fokuslage auf Schmelzefluss und Schmelzebadgeometrie	65
4.1	Röntgenografische Schmelzeflussanalyse mit Tracer-Partikeln	66
4.2	Verteilung der Schmelzeflussgeschwindigkeiten	68
4.3	Schmelzefluss- und Schmelzebadmodell	73
5	Thermomechanische Struktursimulation	76
5.1	Berechnung von Temperaturfeldern erzeugt durch unterschiedlich verteilte Punktwärmequellen	77
5.2	Berechnung der Strukturmechanik	81
5.3	Ergebnisse der Simulation	83
6	Strategien zur Heißrissvermeidung	88
6.1	Wirkung örtlicher Leistungsdistribution	89
6.1.1	Strahlformung mit einer Bifokaloptik.....	90
6.1.2	Strahlformung mit einem diffraktiven optischen Element.....	94
6.2	Wirkung zeitlicher Leistungsmodulation	97
6.2.1	Prozessfenster der Heißrissvermeidung.....	100
6.2.2	Verhalten von Kapillare, Schmelzefluss und Schmelzebad-geometrie	103
6.2.3	Industrielle Umsetzung am Realbauteil	107
7	Zusammenfassung	111
8	Literatur- und Quellenverzeichnis	114
	Danksagung	131
	Anhang A1	132

Kurzfassung der Arbeit

In der industriellen Praxis werden die Komponenten eines Getriebes, das im einfachsten Fall aus einer Welle und einem Zahnrad besteht, häufig mittels Laserstrahlschweißen aufgrund vieler verfahrensimplizanter Vorteile stoffschlüssig gefügt. Insbesondere im Bereich der Leistungsendrampe kommt es jedoch zur Bildung von Heißrisen im Schweißgut, welche die Festigkeit der Schweißnaht im Betrieb reduzieren (vgl. Bild 1).

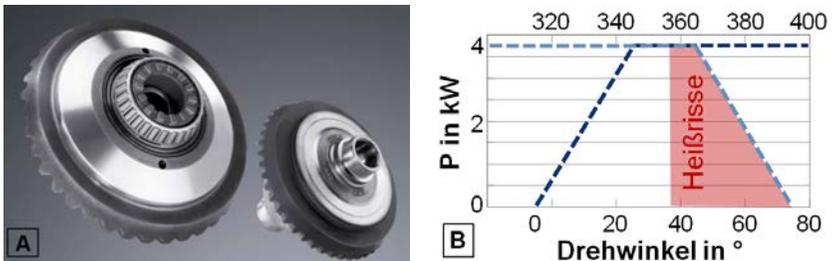


Bild 1: A: Differentialgetriebebauteile. B: Verlauf der Laserleistung für eine Axialrundnaht mit Leistungsanfang- und -endrampe. Rote Fläche: Winkelbereich, in dem Heißrisse auftreten.

Die röntgenografische Analyse von partiellen Einschweißungen in hochfestem Vergütungsstahl nach dem Schweißen ergab, dass die Bildung der Heißrisse in periodischen Abständen erfolgt. Durch Beobachtungen des Prozessverhaltens mit Hilfe von Verfahren, die sich Röntgenstrahlung oder neuester interferometrischer Messverfahren bedienen, konnte gezeigt werden, dass zum einen die Tiefe der Dampfkapillare fluktuiert, zum anderen aber auch die Länge des Schmelzebades, die thermografisch an dessen Oberfläche gemessen wurde. Die resultierenden Frequenzen stimmen mit der Entstehungsfrequenz der Heißrisse überein. Der Fokus der in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen lag auf dem Zusammenhang zwischen dem thermischen Energieeintrag in den Schweißprozess, der primär in der Dampfkapillare erfolgt, den Strömungsverhältnissen im Schmelzebad und der Anfälligkeit für die Entstehung von Heißrisen am Ende der Erstarrung (vgl. Schema in Fig. 1).

Durch die Veränderung der in den Prozess eingebrachten Energieverteilung kann die Neigung zur Heißrisbildung beeinflusst werden. So wurde gezeigt, dass für konstante mechanische Einspanbedingungen der Schweißnaht die Variation der Strahlqualität

und Laserwellenlänge nur unwesentlichen, die Variation der Streckenenergie und der Fokuslage jedoch wesentlichen Einfluss auf die Heißrissneigung besitzen. Um die Wirkung der Fokuslage auf die Strömungsbedingungen im Schmelzebad zu analysieren, wurden detaillierte, röntgenografische Beobachtungen des Schweißprozesses durchgeführt und der resultierende Schmelzeffluss mit Hilfe von Tracer-Partikeln aufgezeichnet. Daraus wurden die mittlere Verteilung von Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Strömungen im Schmelzebad berechnet, die eine modellhafte Darstellung des mittleren „Fußabdrucks“ des Prozesses erlaubten. So konnten bei Verschiebung der Fokuslage um eine Rayleigh-Länge sowohl eine Geometrieänderung der Dampfkapillare als auch eine Umkehr der Strömungsrichtung des Wirbels im oberen Schmelzebadbereich sowie qualitative Veränderungen der Schmelzebadgeometrie beobachtet werden.

Die experimentell ermittelte Geometrie der Schmelzebäder diente zudem der Kalibrierung der Flächenisotherme der Liquidustemperatur für die berechneten Schmelzebäder, die im Rahmen der thermomechanischen Struktursimulation durch die unterschiedliche Verteilung der Energie auf 40 Punktwärmequellen erzeugt wurden. Wie mit Hilfe der statischen Struktursimulation gezeigt werden konnte, verschiebt sich die Tiefe der maximalen Dehnung in z -Richtung (Einschweißtieferichtung), sofern sich die Geometrie des Schmelzebads wie experimentell beobachtet ändert. Die Position dieser maximalen Dehnung in z -Richtung stimmte gleichzeitig gut mit der mittleren Tiefe der Rissbildung im Experiment überein.

Im Lichte dieser Erkenntnisse wurden Verfahren entwickelt, die durch eine gezielte Änderung des Energieeintrags eine Geometrieänderung des Schmelzebads bewirkten und das Problem der Heißrissbildung zu lösen halfen. Durch eine örtliche Umverteilung der Energie unter Verwendung einer Bifokaloptik einerseits und eines speziell entwickelten diffraktiven Elements im Strahlengang andererseits konnten rissfreie Schweißungen erzielt werden.

Zudem konnte gezeigt werden, dass durch eine zeitliche Modulation der Laserleistung die Neigung zur Heißrissbildung signifikant reduziert werden kann, sofern die Amplitude der Laserleistung und die Frequenz der Modulation entsprechend gewählt werden. Wie der Vergleich der Strömungsverhältnisse für den modulierten und den unmodulierten Fall zeigte, geht die Vermeidung der Heißrisse mit einem veränderten Strömungsverhalten und einer veränderten mittleren Geometrie des Schmelzebads einher. Weil die zeitliche Modulation der Laserleistung praktikabler ist und zudem softwareseitig in der Lasersteuerung programmiert werden konnte, wurde nur diese Verfahrensanweisung auf reale Getriebebauteile übertragen und konnte am Beispiel einer

Axialrundnaht mit hoher Einschweißtiefe ($EST = 7,5 \text{ mm}$) erfolgreich demonstriert werden.

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

Pulsenergiestabilität 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 Fer-tigungssystemen

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

Moritz Vogel

Speciality 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 Heißrissen 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 978-3-8316-4638-8

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 faserintegrierte Strahlweichen
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 Einschweißiefen zwischen 1 mm und 10 mm
2018, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-4738-5

Marcel Schäfer

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