



Universität Stuttgart  
Institut für Strahlwerkzeuge



## LASER IN DER MATERIALBEARBEITUNG

Forschungsberichte des IFSW

Marcel Schäfer

### **Energetische Beeinflussung von Schmelzefluss und Heißrissbildung beim Laserstrahlschweißen von Vergütungsstahl**

Herbert Utz Verlag 



Marcel Schäfer

**Energetische Beeinflussung von Schmelzefluss und  
Heißrissbildung beim Laserstrahlschweißen von  
Vergütungsstahl**

Herbert Utz Verlag · München 2018

Laser in der Materialbearbeitung  
Band 93

Ebook (PDF)-Ausgabe:  
ISBN 978-3-8316-7410-7 Version: 1 vom 25.09.2018  
Copyright© Herbert Utz Verlag 2018

Alternative Ausgabe: Softcover  
ISBN 978-3-8316-4742-2  
Copyright© Herbert Utz Verlag 2018





Laser in der Materialbearbeitung  
Forschungsberichte des IFSW

M. Schäfer  
Energetische Beeinflussung von  
Schmelzfluss und Heißrissbildung  
beim Laserstrahlschweißen von  
Vergütungsstahl

# **Laser in der Materialbearbeitung**

## **Forschungsberichte des IFSW**

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf, Universität Stuttgart  
Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW)

Das Strahlwerkzeug Laser gewinnt zunehmende Bedeutung für die industrielle Fertigung. Einhergehend mit seiner Akzeptanz und Verbreitung wachsen die Anforderungen bezüglich Effizienz und Qualität an die Geräte selbst wie auch an die Bearbeitungsprozesse. Gleichzeitig werden immer neue Anwendungsfelder erschlossen. In diesem Zusammenhang auftretende wissenschaftliche und technische Problemstellungen können nur in partnerschaftlicher Zusammenarbeit zwischen Industrie und Forschungsinstituten bewältigt werden.

Das 1986 gegründete Institut für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart (IFSW) beschäftigt sich unter verschiedenen Aspekten und in vielfältiger Form mit dem Laser als einem Werkzeug. Wesentliche Schwerpunkte bilden die Weiterentwicklung von Strahlquellen, optischen Elementen zur Strahlführung und Strahlformung, Komponenten zur Prozessdurchführung und die Optimierung der Bearbeitungsverfahren. Die Arbeiten umfassen den Bereich von physikalischen Grundlagen über anwendungsorientierte Aufgabenstellungen bis hin zu praxisnaher Auftragsforschung.

Die Buchreihe „Laser in der Materialbearbeitung – Forschungsberichte des IFSW“ soll einen in der Industrie wie in Forschungsinstituten tätigen Interessentenkreis über abgeschlossene Forschungsarbeiten, Themenschwerpunkte und Dissertationen informieren. Studenten soll die Möglichkeit der Wissensvertiefung gegeben werden.



# **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](http://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

# Verzeichnis der Symbole

Symbol	Bedeutung	Einheit
<b>Lateinische Buchstaben:</b>		
$a$	Beschleunigung	$\text{m/s}^2$
$a_x$	Beschleunigungskomponente in $x$ -Richtung	$\text{m/s}^2$
$a_z$	Beschleunigungskomponente in $z$ -Richtung	$\text{m/s}^2$
$b$	Steigung der Ausgleichsgeraden	
$b_y$	Breite der Schweißprobe in $y$ -Richtung	$\text{m}$
$c_p$	Massenspezifische Wärmekapazität	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
$d$	Abstand zwischen Haupt- und Nebenfokus	$\text{m}$
$d_f$	Durchmesser der Laserstrahltaile	$\text{m}$
$d_K$	Kerndurchmesser des Lichtleitkabels	$\text{m}$
$f_{ES}$	Frequenz der Erstarrungsstruktur im Längsschliff	$\text{s}^{-1}$
$f_F$	Fokussierbrennweite	$\text{m}$
$f_K$	Kollimationsbrennweite	$\text{m}$
$f_{Kap,x\text{-ray}}$	Frequenz der Kapillarfluktuation im Röntgenvideo	$\text{s}^{-1}$
$f_{Kap,IDM}$	Frequenz der Kapillarfluktuation im IDM-Signal	$\text{s}^{-1}$
$f_{mess}$	Bildwiederholfrequenz	$\text{s}^{-1}$
$f_M$	Modulationsfrequenz	$\text{s}^{-1}$
$f_R$	Frequenz der Rissentstehung im Röntgenbild	$\text{s}^{-1}$
$f_{R,m}$	Mittlere Frequenz der Rissentstehung im Röntgenbild	$\text{s}^{-1}$
$f_{SBL}$	Frequenz der Schmelzebadlängenfluktuation	$\text{s}^{-1}$
$g_{av}$	Mittlerer Grauwert	
$h_z$	Höhe der Schweißprobe in $z$ -Richtung (Blechdicke)	$\text{m}$
$i$	Index der Tracer-Partikeltrajektorie	
$I$	Index der interpolierten Punkte	
$j$	Index der Interpolationspunkte zwischen zwei Messpunkten der Tracer-Partikeltrajektorie	
$k$	Index der Spiegelquelle	
$l_{Kap}$	Tiefe der Dampfkapillare	$\text{m}$

$L_{ges}$	Gesamtlänge der analysierten Schweißprobe	m
$L_R$	Relative Risslänge	m
$l_x$	Länge der Schweißprobe in $x$ -Richtung	m
$m$	Index der Partikelposition	
$P$	Laserleistung	W
$P_{Amp}$	Amplitude der Laserleistung	W
$P_{HF}$	Laserleistung im Hauptfokus	W
$P_m$	Mittlere Laserleistung	W
$P_{min}$	Minimale Laserleistung	W
$P_{NF}$	Laserleistung im Nebenfokus	W
$P_V$	Verformungsvermögen des Werkstoffs	
$p_m$	Lokaler Druck in der Schmelze	N/m <sup>2</sup>
$p_C$	Kritischer Kavitationsdruck	N/m <sup>2</sup>
$Q$	Wärmeeintrag	J
$t$	Zeit	s
$t_m$	Zeitpunkt für die Messung der Partikelbewegung	s
$T$	Temperatur	K
$T_{Liq}$	Liquidustemperatur	K
$T_{Sol}$	Solidustemperatur	K
$T_{Schweiß}$	Schweißtemperatur	K
$v$	Schweißgeschwindigkeit	m/s
$v_{abs}$	Absolutgeschwindigkeit der Tracer-Partikel	m/s
$v_{ix}$	Geschwindigkeitskomponente in $x$ -Richtung	m/s
$v_{ij}^J$	Vektorielle Geschwindigkeit der Tracer-Partikel	m/s
$v_{iz}$	Geschwindigkeitskomponente in $z$ -Richtung	m/s
$x$	$x$ -Koordinate	m
$x_i$	$z$ -Koordinate der Spline-Interpolation	m
$x_{im}$	Gemessene Position der Tracer-Partikel in $x$ -Richtung	m
$x_{ij}^J$	Interpolationspunkte Partikeltrajektorie in $x$ -Richtung	
$y$	$y$ -Koordinate	m
$z$	$z$ -Koordinate	m
$z_i$	$z$ - Koordinate der Spline-Interpolation	m
$z_{im}$	Gemessene Position der Tracer-Partikel in $z$ -Richtung	m
$z_{ij}^J$	Interpolationspunkte Partikeltrajektorie in $z$ -Richtung	

$z_R$	Rayleigh-Länge	m
$\overline{z_{RT}}$	Mittlere Risstiefe in z-Richtung	m

### Griechische Buchstaben:

$\alpha$	Winkel	°
$\alpha_{therm}$	Wärmeausdehnungskoeffizient	K <sup>-1</sup>
$\beta$	Optisches Abbildungsverhältnis	
$\gamma$	Oberflächenspannungskoeffizient	N/m <sup>2</sup>
$\Theta_f$	Divergenzwinkel im Fokus	Rad
$\varepsilon$	Maximal zu ertragende Verformung	
$\varepsilon_{el}$	Elastische Dehnung	
$\varepsilon_{ges}$	Lokale Gesamtdehnung	
$\varepsilon_{mech}$	Mechanische Dehnung	
$\varepsilon_{max}$	Maximale Gesamtdehnung in z-Richtung	
$\varepsilon_{pl}$	Plastische Dehnung	
$\varepsilon_{therm}$	Thermische Dehnung	
$\varepsilon_F$	Innere Verformungen durch Formänderungen	
$\varepsilon_P$	Kritische Verformungen	
$\varepsilon_{Sch}$	Innere Verformungen durch Schrumpfung	
$\varepsilon_V$	Auftretende kumulierte Verformungen	
$\kappa_{therm}$	Temperaturleitfähigkeit	m <sup>2</sup> /s
$\lambda$	Wellenlänge	m
$\lambda_{th}$	Wärmeleitfähigkeit	W/(m·K)
$\mu$	Querkontraktionszahl	
$\rho$	Dichte	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	Lokale mechanische Spannung	N/m <sup>2</sup>
$\bar{\sigma}$	Standardabweichung	
$\Lambda$	Normierte Raumfrequenz	
$\Lambda_R$	Kumulierte relative Risslänge	
$\Pi$	Modulationstiefe	

### Abkürzungen

<i>ANSYS</i>	ANalysis SYStem (Finite-Elemente-Software)
<i>BEO</i>	Bearbeitungsoptik