



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
Schmelzefluss 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

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
Lateinische Buchstaben:		
a	Beschleunigung	m/s^2
a_x	Beschleunigungskomponente in x -Richtung	m/s^2
a_z	Beschleunigungskomponente in z -Richtung	m/s^2
b	Steigung der Ausgleichsgeraden	
b_y	Breite der Schweißprobe in y -Richtung	m
c_p	Massenspezifische Wärmekapazität	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
d	Abstand zwischen Haupt- und Nebenfokus	m
d_f	Durchmesser der Laserstrahltaile	m
d_K	Kerndurchmesser des Lichtleitkabels	m
f_{ES}	Frequenz der Erstarrungsstruktur im Längsschliff	s^{-1}
f_F	Fokussierbrennweite	m
f_K	Kollimationsbrennweite	m
$f_{Kap,x\text{-ray}}$	Frequenz der Kapillarfluktuation im Röntgenvideo	s^{-1}
$f_{Kap,IDM}$	Frequenz der Kapillarfluktuation im IDM-Signal	s^{-1}
f_{mess}	Bildwiederholfrequenz	s^{-1}
f_M	Modulationsfrequenz	s^{-1}
f_R	Frequenz der Rissentstehung im Röntgenbild	s^{-1}
$f_{R,m}$	Mittlere Frequenz der Rissentstehung im Röntgenbild	s^{-1}
f_{SBL}	Frequenz der Schmelzebadlängenfluktuation	s^{-1}
g_{av}	Mittlerer Grauwert	
h_z	Höhe der Schweißprobe in z -Richtung (Blechdicke)	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	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 ²
p_C	Kritischer Kavitationsdruck	N/m ²
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:

α	Winkel	°
α_{therm}	Wärmeausdehnungskoeffizient	K ⁻¹
β	Optisches Abbildungsverhältnis	
γ	Oberflächenspannungskoeffizient	N/m ²
Θ_f	Divergenzwinkel im Fokus	Rad
ε	Maximal zu ertragende Verformung	
ε_{el}	Elastische Dehnung	
ε_{ges}	Lokale Gesamtdehnung	
ε_{mech}	Mechanische Dehnung	
ε_{max}	Maximale Gesamtdehnung in z-Richtung	
ε_{pl}	Plastische Dehnung	
ε_{therm}	Thermische Dehnung	
ε_F	Innere Verformungen durch Formänderungen	
ε_P	Kritische Verformungen	
ε_{Sch}	Innere Verformungen durch Schrumpfung	
ε_V	Auftretende kumulierte Verformungen	
κ_{therm}	Temperaturleitfähigkeit	m ² /s
λ	Wellenlänge	m
λ_{th}	Wärmeleitfähigkeit	W/(m·K)
μ	Querkontraktionszahl	
ρ	Dichte	kg/m ³
σ	Lokale mechanische Spannung	N/m ²
$\bar{\sigma}$	Standardabweichung	
Λ	Normierte Raumfrequenz	
Λ_R	Kumulierte relative Risslänge	
Π	Modulationstiefe	

Abkürzungen

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