

# LASER IN DER MATERIALBEARBEITUNG

Forschungsberichte des  IFSW

Peter Stritt

## Prozessstrategien zur Vermeidung von Heißrissen beim Remote- Laserstrahlschweißen von AlMgSi 6016



Herbert Utz Verlag 

Peter Stritt

**Prozessstrategien zur Vermeidung von Heißrissen  
beim Remote-Laserstrahlschweißen von AlMgSi 6016**

Herbert Utz Verlag · München 2016

Laser in der Materialbearbeitung  
Band 81

Ebook (PDF)-Ausgabe:  
ISBN 978-3-8316-7212-7 Version: 1 vom 05.04.2016  
Copyright© Herbert Utz Verlag 2016

Alternative Ausgabe: Softcover  
ISBN 978-3-8316-4555-8  
Copyright© Herbert Utz Verlag 2016

# **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.

# **Prozessstrategien zur Vermeidung von Heißbrissen beim Remote- Laserstrahlschweißen von AlMgSi 6016**

von Dr.-Ing. Peter Stritt  
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  
1. Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Manfred Berroth  
2. Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

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., 2015

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 2016

ISBN 978-3-8316-4555-8

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

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

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>7</b>
<b>Kurzfassung der Arbeit</b>	<b>11</b>
<b>Abkürzungen</b>	<b>13</b>
<b>Formelzeichen</b>	<b>15</b>
<b>Extended Abstract</b>	<b>19</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>23</b>
1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit .....	23
1.2 Aufbau der Arbeit.....	27
<b>2 Stand der Technik</b>	<b>29</b>
2.1 Laserstrahlschweißen von Aluminium.....	29
2.1.1 Nahtfehler beim Schweißen von Aluminium .....	30
2.1.1.1 Wasserstoffporen.....	30
2.1.1.2 Prozessporen und Schmelzbadauswürfe .....	31
2.1.1.3 Heißrisse.....	31
2.2 Heißrisse beim Laserstrahlschweißen von Aluminium.....	32
2.2.1 Definition von Heißrisen .....	32
2.2.2 Einflussfaktoren auf die Heißrisbildung .....	33
2.2.3 Theorien zur Beschreibung der Heißrisbildung .....	34
2.2.3.1 Metallurgisch basierte Theorien.....	35
2.2.3.2 Dehnungsbasierte Theorien.....	37
2.2.3.3 Spannungsbasierte Theorien .....	41
2.2.4 Bestehende Ansätze zur Vermeidung von Heißrisen.....	44
2.2.4.1 Metallurgische Beeinflussung.....	45
2.2.4.2 Thermische Beeinflussung.....	49
2.2.4.3 Mechanische Beeinflussung.....	51
2.3 Numerische Schweißsimulation .....	52
2.3.1 Bestehende numerische Modelle der Heißrisbildung .....	55

<b>3</b>	<b>Numerische Modellierung</b>	<b>59</b>
3.1	Prinzip der numerischen Prozessabbildung	59
3.1.1	Thermische Berechnungen	61
3.1.2	Gekoppelte strukturmechanische Berechnungen	62
3.1.3	Post-Process Auswertung	63
3.2	Werkstoffdatenbasis	63
3.2.1	Thermophysikalische Werkstoffeigenschaften	63
3.2.2	Strukturmechanische Werkstoffeigenschaften	67
3.3	Kalibrierung der Wärmequelle	71
<b>4</b>	<b>Ergebnisse der Simulation</b>	<b>75</b>
4.1	Temperaturfeldverteilung in Blechrandlage	75
4.2	Strukturmechanik in Blechrandlage	77
4.2.1	Verformungen	78
4.2.2	Lokale Dehnungen	79
4.2.3	Berücksichtigung der Schmelzeeigenschaften	81
4.3	Zeitliche Effekte beim Laserstrahlschweißen	83
4.3.1	Entwicklung der Temperaturfeldverteilung in Blechrandlage	83
4.3.2	Zeitliche Entwicklung der Strukturmechanik in Blechrandlage	87
<b>5</b>	<b>Heißbrisskriterium</b>	<b>91</b>
5.1	Definition der Rissneigungsenergie	91
5.2	Zeitlicher Verlauf der Rissneigungsenergie	94
5.3	Randabstandsvariation zur Ermittlung der kritischen Rissneigungsenergie	97
<b>6</b>	<b>Experimentelle Validierung der Simulation</b>	<b>99</b>
6.1	Thermografieanalyse der Wärmeausbreitung in Blechrandlage	99
6.2	Zeitliches Verhalten der Heißbrissneigung in Experiment und Simulation	101
6.3	Rissanfällige Versuchsprobe - Diagnostik und Simulation	103
<b>7</b>	<b>Optimierte Bearbeitungsstrategien zur Rissminimierung</b>	<b>109</b>
7.1	Geeignete Prozessparameterwahl	109
7.1.1	Einfluss der Laserleistung und Schweißgeschwindigkeit	109
7.1.2	Einfluss der Fokussierung der Laserstrahlung	116
7.2	Geeigneter Randabstand	120

---

7.3	Angepasste Spannsituation.....	122
7.4	Modulation der Laserleistung.....	126
7.4.1	Auswahl geeigneter Modulationsformen.....	127
7.4.2	Sinusförmige Leistungsmodulation.....	130
7.4.3	Stufenförmige Leistungsmodulation.....	135
7.4.4	Leistungsmodulation mit koaxialer Rückreflexmessung.....	139
7.5	Endrampengestaltung gegen Endkraterisse.....	145
7.6	Stepp-Strategie.....	147
<b>8</b>	<b>Übertragbarkeit auf industrielle Fertigung</b>	<b>157</b>
8.1	Festigkeitsanalyse.....	157
8.2	Strategien zur Produktivitätssteigerung.....	158
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>163</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>167</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>185</b>

# Kurzfassung der Arbeit

Aluminium ist als Leichtbauwerkstoff in den verschiedensten industriellen Bereichen unverzichtbar. Insbesondere beim Fahrzeug- und Flugzeugbau wird dieser Werkstoff aufgrund seines Verhältnisses von Festigkeit zu Dichte häufig eingesetzt. Für die Produktionskette aus einzelnen Aluminium-Komponenten hin zu komplexen Strukturen ist die Fügbarkeit der Komponenten eine notwendige Voraussetzung. Das Laserstrahlschweißen hat sich dabei als Verfahren zum Fügen von Aluminium etabliert.

Gleichwohl sind bei Verwendung hochfester magnesium- und siliziumhaltiger Aluminiumlegierungen dem Laserstrahlschweißprozess einige Restriktionen gesetzt. So muss zur Vermeidung von Heißrissen dem Schweißprozess Zusatzwerkstoff lokal zugeführt werden. Die komplexe Handhabung dieses Zusatzwerkstoffs in Drahtform ist aufwendig und zeitintensiv. Daher wird eine schnellere Positionierung des Laserstrahles durch einen Remote-Schweißprozess ohne Zusatzwerkstoff angestrebt.

Aus diesem Grund werden in der vorliegenden Arbeit Ansätze behandelt, welche eine Vermeidung von Heißrissen in Randnähe ohne die Verwendung eines Zusatzwerkstoffs ermöglichen.

Wie sich aus numerischen Betrachtungen ableiten lässt, liegt, insbesondere beim Prozessstart des Laserstrahlschweißens, eine verminderte mechanische Belastung der Erstarrungszone vor, was auch experimentell direkt mit einer rissfreien Schweißnahtzone zum Prozessstart korreliert. Aus dieser Kenntnis lassen sich zwei wesentliche Strategien ableiten, die es ermöglichen, die Heißrissneigung zu senken. Dies ist zum einen das Schweißen unter Verwendung von modulierter Laserleistung. Zum anderen bietet sich die Möglichkeit mittels Stepp-Strategie heißrissfreie Schweißnähte in Randnähe zu erzeugen. Hierzu werden kurze Steppnähte mit zeitlichem Versatz räumlich derart überlagert, dass der für Endkraterisse anfällige Endbereich erneut überschweißt wird. Die so erzeugten nahtmittenrissfreien Schweißnähte entsprechen nachweislich den gängigen Qualitäts- und Festigkeitsanforderungen.

Beide Verfahren bieten die Möglichkeit einer Umsetzung mittels Remote-Technik. Gegenüber der Verwendung eines Zusatzwerkstoffs zum Schweißen von Aluminium eröffnen die entwickelten Ansätze die für Remoteverfahren typischen Vorteile geringerer Produktionszeiten bei geringeren Kosten und erhöhter Flexibilität.

# Abkürzungen

Al	Aluminium
ANSYS	ANalysis SYStem (Finite-Elemente-Software)
bzw.	beziehungsweise
Cr	Chrom
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CT	Computertomografie
Cu	Kupfer
DVS	Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V.
engl.	englisch
FE	Finite Elemente
HS	Hochgeschwindigkeit (High-Speed)
LLK	Lichtleitkabel
LIT	Liquid Impenetrable Temperature (Schmelznachspeisungstemperatur)
MISO	Measurement by Means of In-Situ-Observation
Mat	Werkstoff Probenmaterial
Mg	Magnesium
NA	Numerische Apertur
Ni	Nickel
PFO	Programmierbare Fokussieroptik

---

P <sub>V</sub>	Verformungsvermögen
PVR	Programmierter Verformungs-Riss-Versuch
RR	Rückreflex
RDG	Rappaz-Drezet Kriterium
REM	Rasterelektronenmikroskop
ROF	Rate of Feeding
ROS	Rate of Shrinkage
Si	Silizium
St	Stahl
SPV	Speisungsvermögen
SRG	Schrumpfgeschwindigkeit
TS	Tiefschweißen
TIS	Temperaturintervall der Sprödigkeit
vgl.	vergleiche
w. E.	willkürliche Einheiten
WLS	Wärmeleitungsschweißen
WS	Werkstück
Yb	Ytterbium
YAG	Yttrium-Aluminium-Granat
ZDT	Zero Ductility Temperature (Temperatur der Nullduktilität)
ZST	Zero Strength Temperature (Nullfestigkeitstemperatur)
⊥	Senkrechte zu einer Fläche

# Formelzeichen

$A$	%	Absorptionsgrad
$b$	mm	Nahtbreite
$b_B$	mm	Breite des Biegebalken
$b_{SP}$	mm	Breite der Schweißprobe
$c_P$	J/(g·K)	Spezifische Wärmekapazität
$d_{OB}$	mm	Dicke Oberblech
$d_{UB}$	mm	Dicke Unterblech
$H$	J	Enthalpie
$H_{lat}$	J	Latente Wärme
$h_B$	m	Höhe des Biegebalken
$d_f$	m	Fokusbereich
$E$	N/mm <sup>2</sup>	Elastizitätsmodul
$f$	Hz	Frequenz
$f_M$	Hz	Modulationsfrequenz
$F_{max}$	MPa	Maximalkraft bei Bruch
$h_m$	J/g	Spezifische Schmelzenthalpie
$\Delta l$	mm	Längenänderung durch Wärmedehnung
$l_0$	mm	Bezugslänge
$l_{SN}$	mm	Schweißnahtlänge
$l_{SP}$	mm	Stepplänge

$L_S$	mm	Schmelzbadlänge
$M^2$	-	Beugungsmaßzahl
$p$	Pa	Druck
$P$	kW	Laserleistung
$P_m$	kW	Mittlere Laserleistung
$E_{Riss}$	MPa	Rissneigungsenergie
$E_{krit}$	MPa	Kritische Rissneigungsenergie
$P_A$	kW	Eingekoppelte Leistung
$\dot{Q}$	kW	Wärmezufuhr
$R$	mm	Randabstand
$R_{Sp}$	-	Verhältnis der Schmelznachspeisung
$S$	mm	Abstand zwischen Optik und Spannmittel
$S_B$	mm	Biegesteifigkeit
$SPP$	mm·mrad	Strahlparameterprodukt
$t$	mm	Nahttiefe
$T_S$	°C	Solidustemperatur
$T_L$	°C	Liquidustemperatur
$T_M$	ms	Dauer des Modulationssignals
$T_V$	°C	Verdampfungstemperatur
$T_Z$	ms	Zeit zwischen zwei modulierten Leistungssignalen
$U$	J	Innere Energie
$v$	m/min	Schweißgeschwindigkeit bei bewegtem Laserstrahl
$v_q$	mm/s	Geschwindigkeit der Querverschiebungen

---

$v_{q\ kr}$	mm/s	Kritische Zuggeschwindigkeit der Querverschiebungen
$V$	mm <sup>3</sup>	Volumen
$V_{spez.}$	m <sup>3</sup> /kJ	Energiespezifisches Schmelzvolumen
$V_{Erstarrung}$	mm <sup>3</sup>	Erstarrungsvolumen
$V_{Liquidus}$	mm <sup>3</sup>	Liquidusvolumen
$V_{Solidus}$	mm <sup>3</sup>	Solidusvolumen
$z_f$	mm	Fokusslage in Laserstrahlrichtung
$z_R$	mm	Rayleighlänge eines Laserstrahles

$\alpha$	-	Einspanngrad
$\alpha_L$	°	Stechender Anstellwinkel des Laserstrahles
$\alpha_{therm}$	1/K	Wärmeausdehnungskoeffizient
$\Delta \varepsilon_{Sch}$	%	Anteil der freien Schrumpfvormung
$\Delta \varepsilon_F$	%	Anteil der Formänderungsverformung
$\Delta \varepsilon_P$	%	Anteil der kritischen Verformung
$\varepsilon_{lok}$	%	Lokale Gesamtdehnung
$\varepsilon_{therm}$	%	Wärmeausdehnung
$\varepsilon_{el}$	%	Elastische Dehnung
$\varepsilon_{pl}$	%	Plastische Dehnung
$\varepsilon_{cr}$	%	Kriechdehnung
$\varepsilon_{mech,y,ave}$	%	Gemittelte mechanische Dehnungen in y-Richtung auf der Erstarrungsfläche
$\kappa_{temp}$	m <sup>2</sup> /s	Temperaturleitfähigkeit
$\lambda$	nm	Wellenlänge
$\lambda_{th}$	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte
$\sigma_y$	MPa	Spannungen in y-Richtung
$\sigma_{y,ave}$	MPa	Gemittelte Spannungen in y-Richtung auf der Erstarrungsfläche
$\nu$	-	Querkontraktionszahl

# Extended Abstract

Continuously rising material prices and strict emissions legislation are increasingly resulting in the use of lighter materials in the automotive industry. Aluminium is therefore one of the most relevant materials used to realise lightweight construction.

From the production point of view the necessity of appropriate joining technologies exists. In terms of aluminium, laser welding is a well-established joining technology.

However, hot cracking is one of the major issues in laser welding of high-strength aluminium alloys. Additional filler wire can be added to the fusion zone within the welding process in order to prevent hot cracks. But the use of such wires is not desirable since it proved to be cost and time consuming and is not compatible with the highly requested remote laser welding process.

As an alternative to the use of filler wire, several other approaches to overcome the hot cracking issue are discussed in literature. Some of these approaches are considered within this thesis and categorized into the three main methods using a metallurgical, thermal or mechanical approach to prevent hot cracking.

A theoretical analysis based on a finite element model is performed in order to obtain a better scientific understanding of the hot cracking mechanisms during laser welding in close-edge position. High speed videos from experimental welding processes were used to calibrate and evaluate this simulation model as well as to identify the location of hot crack formation during the solidification phase. The developed two-staged numerical model is capable of calculating the temperature distribution for close-edge laser welding in first stage and determine the resultant stress and strain fields in second stage.

A criterion for the initiation of hot cracks could be defined based on this expertise. The criterion implies that positive strain combined with positive stress and multidirectional solidification conditions are responsible for hot crack formation.

Temporal analyses of the welding process with respect to melt pool volume, solidifying volume and maximum edge temperature led to the finding that there are three different stages of the close-edge welding process: The first phase is the starting stage, where the temperature field distribution develops, the volume of the melt rises as well as the maximum temperature at the edge. A quasi constant stage is reached after about

0,2 s, where a stationary temperature distribution is developed and no volume changes of the melt pool can be noticed. The third stage can be recognized after turning off the heat source, i.e. the laser power. Here a linear decrease of the melt pool size occurs and the temperature gradients start to flatten.

According to the numerically calculated welding conditions a hot cracking criterion was developed as follows: Multiplying the average strain and stress at the solidifying solidus-area with the quotient of the solidification volume and the melt volume gives a measure for sensitivity of hot cracking.

In terms of time-dependent structural changes, it is shown that minor strain and stress on the solidifying melt pool occur within the starting phase of welding. The time-dependent behaviour of strain and stress in the starting phase of the welding process leads to a low hot cracking affinity and increases with further processing time until saturation occurs leading to a constantly high cracking sensitivity. With this knowledge two approaches to overcome hot cracking were developed.

The first approach investigated in this work uses a modulated laser power signal, where the two regimes of heat-conduction welding and deep-penetration welding are run through, thus leading to a repeating utilization of the starting phase of the welding process. As experiments with sinusoidally shaped and pulsed laser power signals proved, centerline hot cracks can be prevented with this method. However, due to the repeating closure of the deep-penetration welding capillary, the likeliness of pore formation increases.

The second proposed approach uses the maximum length of the starting phase as welding step size. To overcome the problem of crater crack formation at the end of such a weld step, the consecutive step are spatially overlaid. In order to effectively avoid hot cracks, the time between the steps is of major influence and has to be sufficient to allow solidification and uniform spreading of the temperature distribution. Applying the step strategy to four weld steps with sufficient cooling time led to a continuous, crack-free weld of 60 mm length. These welds can be evaluated with established quality control procedures, such as tensile and bending tests. Experimental results prove that the tendency for hot cracking is reduced, which is confirmed by welding tests on specimen shapes with high crack sensitivity. The resultant welds show no centerline crack.

In order to increase the efficiency of the step-strategy, it can be used with remote scanner optics which allows fast position jumps of the laser beam. This enables an almost simultaneous processing of different welds within the scanning field.

---

A final comparison of the developed step-strategy to the conventional metallurgical approach to overcome hot cracking with additional filler wire reveals higher productivity, higher efficiency and higher flexibility.