





Laser in der Materialbearbeitung  
Forschungsberichte des IFSW

A. J. Birnesser  
Prozessregelung beim  
Laserstrahlschweißen

# **Laser in der Materialbearbeitung**

## **Forschungsberichte des IFSW**

Herausgegeben von  
Prof. Dr. phil. nat. habil. 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.

Andreas Josef Birnesser

# Prozessregelung beim Laserstrahlschweißen



Herbert Utz Verlag · München

## **Laser in der Materialbearbeitung**

Band 68

Zugl.: Diss., Stuttgart, Univ., 2011

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

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 Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2011

ISBN 978-3-8316-4133-8

Printed in EC  
Herbert Utz Verlag GmbH, München  
089-277791-00 · [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>3</b>
<b>Verzeichnis der Symbole</b>	<b>7</b>
<b>Kurzfassung der Arbeit</b>	<b>11</b>
<b>Extended Abstract</b>	<b>13</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>17</b>
1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit . . . . .	17
1.2 Aufbau der Arbeit . . . . .	18
<b>2 Grundlagen und Stand der Technik</b>	<b>21</b>
2.1 Grundlagen des Laserstrahlschweißprozesses . . . . .	21
2.1.1 Verfahrensprinzip . . . . .	22
2.1.2 Wärmeleitungsschweißen . . . . .	23
2.1.3 Tiefschweißen . . . . .	23
2.2 Prozessüberwachung beim Laserschweißen . . . . .	24
2.2.1 Anordnung der Sensoren . . . . .	25
2.2.2 Überwachung der reflektierten Laserstrahlung . . . . .	28
2.2.3 Überwachung der Prozesssekundärstrahlung . . . . .	29
2.2.4 Überwachung von akustischen Emissionen . . . . .	33
2.2.5 Bildgebende Verfahren . . . . .	34
2.2.6 Multi-Detektor-Systeme und weitere Verfahren . . . . .	36
2.3 Prozessregelung beim Laserstrahlschweißen . . . . .	38
2.3.1 Regelung der Fokuslage . . . . .	38
2.3.2 Regelung einer Durchschweißung . . . . .	40
2.3.3 Regelung der Einschweißtiefe . . . . .	41
2.4 Zusammenfassung . . . . .	42

<b>3</b>	<b>Systemtechnik und Auswertemethodik</b>	<b>45</b>
3.1	Strahlquelle . . . . .	45
3.2	Methoden zur Prozessdiagnostik . . . . .	46
3.2.1	Spektroskopie . . . . .	46
3.2.2	Highspeedaufnahmen . . . . .	47
3.2.3	Infrarotthermographie . . . . .	48
3.3	Aufbau eines Sensorsystems zur Regelung . . . . .	48
3.3.1	Anforderungen an serientaugliche Prozesssicherungssysteme . . . . .	49
3.3.2	Mechanischer und optischer Aufbau . . . . .	50
3.3.3	Elektrischer Aufbau . . . . .	52
3.4	Schliffpräparation . . . . .	53
3.5	Probekörper . . . . .	56
<b>4</b>	<b>Signale gesteuerter Laserschweißungen</b>	<b>57</b>
4.1	Spektrale Eigenschaften des Sensoraufbaus . . . . .	57
4.1.1	Wellenlängenbereiche des Laserschweißprozesses . . . . .	57
4.1.2	Vergleich wellenlängenspezifischer und integraler Messungen . . . . .	59
4.2	Untersuchungen zur Faserkopplung . . . . .	60
4.2.1	Untersuchte Beobachtungsfasern . . . . .	60
4.2.2	Auswahl applikationsangepasster Beobachtungsfasern . . . . .	61
4.2.3	Positioniergenauigkeit der Faserkopplung . . . . .	66
4.2.4	Strahlungsprofile des Schweißprozesses . . . . .	68
4.2.5	Fokuslage der Faserkopplung bei defokussierter Optik . . . . .	69
4.3	Korrelation von Signalen zu Nahtkenngrößen . . . . .	70
4.3.1	Betrachtete Nahtkenngrößen . . . . .	71
4.3.2	Korrelation durch Variation der Laserleistung . . . . .	71
4.3.3	Einfluss von Schutzgas auf die Korrelation . . . . .	73
4.4	Mikrokorrelation der Einschweißtiefe . . . . .	74
4.5	Prozessphasen . . . . .	76
4.5.1	Prozessphasen für Schweißungen mit Stickstoff . . . . .	77
4.5.2	Prozessphasen für Schweißungen ohne Schutzgas . . . . .	79
4.6	Zusammenfassung . . . . .	80

---

<b>5</b>	<b>Geregeltes Laserstrahlschweißen</b>	<b>83</b>
5.1	Aufbau der Regelung . . . . .	84
5.1.1	Digitale Signalverarbeitung zur Regelung des Prozesses . . .	85
5.1.2	Einflüsse durch die digitale Filterung und Regelung . . . . .	86
5.1.3	Reaktionszeiten des Lasers . . . . .	87
5.2	Einführung von vergleichenden Kenngrößen . . . . .	89
5.3	Funktionsweise geregelter Schweißprozesse . . . . .	91
5.4	Reduzierung der Einschweißtiefschwankung . . . . .	92
5.4.1	Nachweis für ein Einschweißtiefniveau . . . . .	93
5.4.2	Untersuchungen für den Tiefschweißbereich . . . . .	95
5.4.3	Untersuchung wärmeleitungsdominierter Schweißungen . . .	97
5.5	Regelung bei Störungen der Laserleistung . . . . .	99
5.5.1	Schwankungen der Laserleistung . . . . .	100
5.5.2	Verschmutzung des Schutzglases . . . . .	101
5.6	Variation der Fokusslage der Bearbeitungsoptik . . . . .	104
5.7	Variation der Vorschubgeschwindigkeit . . . . .	107
5.8	Einfluss von Schutzgasen auf die Regelung . . . . .	110
5.8.1	Prozessbedingte Einschweißtiefschwankungen . . . . .	110
5.8.2	Variation der Fokusslage der Bearbeitungsoptik . . . . .	112
5.8.3	Geregeltes Schweißen im Übergangsbereich . . . . .	114
5.9	Diskussion der Ergebnisse . . . . .	116
5.10	Zusammenfassung . . . . .	118
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>121</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>125</b>
A.1	Technische Zeichnungen der Probekörper . . . . .	125
A.2	Korrelationsuntersuchungen für Argon und Helium . . . . .	126
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>127</b>



# Verzeichnis der Symbole

## Formelzeichen – Lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Beschreibung
$A_f$	$m^2$	Fläche des Laserfokus
$A_{ges}$		Einkoppelgrad
$\bar{A}$		mittlerer Einkoppelgrad
$A_N$		Aspektverhältnis der Schweißnaht
$b$	$m$	Nahtbreite
$d$	$m$	Öffnungsdurchmesser
$d_f$	$m$	Fokusbildungsdurchmesser
$h(t)$	$W/m^2$	Funktion zur Beschreibung des Schweißprozesses
$H$		Tiefenkoeffizient
$I_0$	$W/m^2$	Leistungsdichte im Fokus
$I_{max}$	$W/m^2$	maximale Intensität
$I_{min}$	$W/m^2$	minimale Intensität
$P_L$	$W$	Laserleistung
$Q_{.25}$	$m$	0,25-Quantil
$Q_{.75}$	$m$	0,75-Quantil
$R_{ges}$		Reflexionsgrad
$S$	$V$	Sollwertspannung
$s$	$m$	Nahttiefe
$t$	$s$	Zeit
$u_1(t)$	$m$	Position der Bearbeitungsoptik zum Zeitpunkt $t$
$\hat{u}_1$	$m$	Amplitude der Bearbeitungsoptik
$u_2(t)$	$W/m^2$	Intensität der Photodiode zum Zeitpunkt $t$
$\hat{u}_2$	$W/m^2$	Amplitude des Photodiodensignals
$v$	$m/s$	Vorschubgeschwindigkeit

## Formelzeichen – Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Beschreibung
$\alpha$		Koeffizient der digitalen Filterung
$\beta$		Koeffizient der digitalen Filterung
$\Delta$	$m$	Spannweite der Einschweißtiefe
$\mu$	$m$	Mittelwert der Einschweißtiefe
$\omega$	$Hz$	Kreisfrequenz
$\phi$	$rad$	Phasenverschiebung
$\pi$		Kreiszahl
$\sigma$	$m$	Standardabweichung der Einschweißtiefe

## Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
AC	alternating current
b.E.	beliebige Einheiten
bzw.	beziehungsweise
CCD	charge-coupled device
CMT	Cadmium Mercury Telluride
CNN	cellular neural network
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
cw	continuous wave
DC	direct current
DSP	digitaler Signalprozessor
ET	Einschweißtiefe
FFT	Fast-Fourier-Transformation
FL	Nahtfläche
IIR	infinite impulse response
i.O.	in Ordnung
I/O	Input/Output
InGaAs	Indiumgalliumarsenid
InSb	Indiumantimonid
IR	Infrarot
Nd:YAG	Neodym:Yttrium-Aluminium-Granat
n.i.O.	nicht in Ordnung
P	Proportional
PI	Proportional-Integral
PID	Proportional-Integral-Differential
rel.	relativ
STFT	Short-Time-Fourier-Transformation
TS	Tiefschweißen
ÜB	Übergangsbereich
UV	Ultraviolett
vgl.	vergleiche
VIS	sichtbares Spektrum des Lichts
WS	Wärmeleitungsschweißen
Yb:YAG	Ytterbium:Yttrium-Aluminium-Granat



# Kurzfassung der Arbeit

Die Vorzüge des Laserstrahlschweißens führten nach der Entwicklung von Lasergeräten schnell zu einer industriellen Durchdringung dieses Fertigungsverfahrens. Den Instabilitäten des Prozesses wurde in der Vergangenheit mit der Konzeption zahlreicher Überwachungssysteme begegnet. Im Rahmen dieser Arbeit wird durch die Entwicklung eines geregelten Schweißprozesses der konsequente Schritt zu einer weiteren Steigerung der Qualität und Reduzierung der Ausschussquote vollzogen.

Ein vertieftes Verständnis des gesteuerten Schweißprozesses wird zunächst durch eine detaillierte Charakterisierung des Regelsystems geschaffen. Dabei ermöglichen diese grundlegenden Untersuchungen die eindeutige Identifizierung des Keyholes als das Emissionszentrum der infraroten Prozessstrahlung. Eine Korrelation dieser Strahlungsanteile mit Nahtkenngrößen – im Speziellen der Einschweißtiefe – lässt sich sowohl auf makroskopischer als auch auf mikroskopischer Ebene ableiten. Die Phasen des Laserstrahlschweißens – Wärmeleitungsschweißen, Übergangsbereich, Tiefschweißen und Durchschweißen – sind in der Korrelationsbeziehung erkennbar.

Basierend auf dieser Korrelationsbeziehung wird ein Regelungssystem entwickelt, welches prozessspezifische Instabilitäten durch gezielte Eingriffe in den Laserschweißprozess reduziert. Ein Rückgang der Standardabweichung der Einschweißtiefe um bis zu 75,3 % wird erreicht. Auch externe Störgrößen werden untersucht wie beispielsweise Abweichungen der Laserleistung, Verschmutzungen des Schutzglases, Variationen der Fokusposition und verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten. Dabei erfolgt die qualitative und quantitative Bewertung des Verbesserungspotentials des Regelkreises sowohl für Laserschweißungen mit als auch ohne Schutzgas.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Regelung des Prozesses zu einer Verbesserung des Schweißergebnisses führt. Durch die gezielte Beeinflussung der Laserschweißung, basierend auf Informationen aus der Wechselwirkungszone, lässt sich folglich die Qualität und die Zuverlässigkeit der Verbindung steigern und die Ausschussquote reduzieren. Bezogen auf zukünftige Anwendungen des Laserstrahlschweißens ist eine klare Steigerung der Effizienz dieses Fertigungsverfahrens die Folge.

