

LASER IN DER MATERIALBEARBEITUNG

Forschungsberichte des ... **IFSW** 

Jürgen Müller-Borhanian

**Kamerabasierte In-Prozessüberwachung
beim Laserstrahlschweißen**

Herbert Utz Verlag 

Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

J. Müller-Borhanian
Kamerabasierte In-Prozessüber-
wachung 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.

Kamerabasierte In- Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen

von Dr.-Ing. Jürgen Müller-Borhanian
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

Als Dissertation genehmigt
von der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel
Mitberichter: Prof. Dr. sc. nat. Wolfgang Osten

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., 2008

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 2009

ISBN 978-3-8316-0890-4

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
Tel.: 089-277791-00 · www.utzverlag.de

Kurzfassung

Um die Fertigungsqualität beim Laserstrahlschweißen sicherzustellen, werden häufig In-Prozessüberwachungsmethoden eingesetzt. Hierbei wird die durch die Wechselwirkung zwischen Laserstrahl und Werkstück entstehende Sekundärstrahlung analysiert, da sie Informationen über die Dynamik und die Stabilität des Schweißprozesses in sich trägt. Die Detektion dieser Prozessstrahlung mit Einzeldetektoren wie Photodioden ist als Verfahren robust und erprobt. Die Kombination mehrerer Einzeldetektoren, die die Prozessemissionen in unterschiedlichen Spektralbereichen oder an unterschiedlichen Messpositionen aufnehmen, soll die Zuverlässigkeit der Qualitätsaussage erhöhen, die dennoch, aufgrund der räumlich integrierenden Messung, begrenzt bleibt.

Wird statt der Einzeldetektoren eine Kamera für die Detektion der Prozessemissionen verwendet, bietet dies den Vorteil der orts aufgelösten Messung. Die Kamerabilder liefern somit eine Fülle an Informationen über den Schweißprozess. Die softwaretechnische Verarbeitung der Kamerabilder ist jedoch verglichen mit der Auswertung der Signale der Einzeldetektoren sehr viel aufwendiger.

Insbesondere die Auswertung der Geometrie der Kapillaröffnung und des Schmelzbades stellt einen allgemeinen Ansatz zur kamerabasierten In-Prozessüberwachung dar. Die gleichzeitige Visualisierung von Schmelzbad und Kapillaröffnung ist jedoch nur unter bestimmten Voraussetzungen möglich und abhängig von den Kameraeigenschaften, von der Detektionswellenlänge, aber auch vom Bearbeitungsmaterial.

Basierend auf den in Vorversuchen durchgeführten spektroskopischen Untersuchungen und durch den Einsatz verschiedener Kamertypen und unterschiedlicher Detektionswellenlängen wird ein für die kamerabasierte In-Prozessüberwachung geeigneter Wellenlängenbereich gefunden. Weiter wird ein allgemeiner Bildverarbeitungsansatz zur Berechnung der Geometrie der Kapillaröffnung und des Schmelzbades aus den Kamerabildern vorgeschlagen und entsprechende Grundlagenversuche beim Laserstrahlschweißen werden durchgeführt.

Die gesammelten Erkenntnisse dienen der Modifikation eines bestehenden Echtzeit-Bildverarbeitungssystems. Der entwickelte Bildverarbeitungsansatz wird für dieses System umgesetzt, wobei durch optimierte Algorithmen und den Einsatz von DSP-Technik eine hohe Bildfolgefrequenz erreicht wird, um der Dynamik des Schweißprozesses gerecht zu werden. Das System wird bei Parameterstudien erprobt und seine Eignung für die Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen untersucht und beurteilt.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	5
Inhaltsverzeichnis	7
Liste der verwendeten Symbole	11
Extended Abstract	15
1 Einleitung	19
1.1 Ausgangslage	19
1.2 Zielsetzung	20
1.3 Gliederung der Arbeit	21
2 Grundlagen	23
2.1 Laserstrahliefschweißen	23
2.1.1 Prinzip des Laserstrahliefschweißens	23
2.1.2 Schweißfehler und Fehlerindikatoren	25
2.2 Strahlungsphysikalische Größen	27
2.3 Wärmestrahlung	29
2.4 Bildverarbeitung	31
2.4.1 Optische Abbildung	32
2.4.1.1 Absorption und Reflexion	32
2.4.1.2 Brechung	33
2.4.1.3 Abbildung mit Linsen	34
2.4.1.4 Optische Filter	34
2.4.1.5 Abbildungsfehler	36
2.4.1.6 Schärfentiefe	37
2.4.1.7 Wellenphänomene	37
2.4.2 Kameras für die In-Prozessüberwachung	37
2.4.2.1 CCD-Kameras	39
2.4.2.2 CMOS-Kameras	40
2.4.2.3 IR-Kameras	42
2.4.3 Bilddigitalisierung	44

2.4.3.1	Kontinuierliche Bilder	44
2.4.3.2	Digitalisierte Bilder	44
2.4.3.3	Bildspeicherung	46
2.4.4	Bildverarbeitungsalgorithmen	47
2.4.4.1	Binarisierung/Schwellwertbildung	47
2.4.4.2	Mittelwerte	49
2.4.4.3	Falschfarben- und Pseudofarbdarstellung	49
2.4.4.4	Histogrammberechnung	50
2.4.4.5	Kantendetektion	51
2.4.4.6	Morphologische Operatoren	53
2.4.4.7	Zufallsvariablen und Momente	54
2.4.4.8	Formparameter	55
2.4.4.9	Objektbeschreibung und Konturapproximation	57
2.4.4.10	Objekterkennung	58
3	Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen	59
3.1	Offline-Verfahren	59
3.1.1	Zerstörende Qualitätskontrolle	60
3.1.2	Zerstörungsfreie Qualitätskontrolle	61
3.1.2.1	Röntgenverfahren	61
3.1.2.2	Ultraschallverfahren	62
3.1.2.3	Thermografieverfahren	62
3.1.2.4	Lichtschnittverfahren	63
3.1.2.5	Graubildauswertung	64
3.1.2.6	Penetrationsverfahren	64
3.1.2.7	Magnetpulverprüfung	64
3.2	Online-Verfahren	64
3.2.1	Pre- und Postprozessüberwachung	65
3.2.1.1	Lichtschnittverfahren	65
3.2.1.2	Graubildauswertung	65
3.2.2	In-Prozessüberwachung	66
3.2.2.1	Räumlich integrierende Verfahren	66
3.2.2.2	Bildgebende Verfahren	68
4	Voruntersuchungen	71
4.1	Untersuchung der Leistungsstabilität von Festkörperlasern	72
4.1.1	Versuchsaufbau	72
4.1.1.1	Messung der Laserleistung	72

4.1.1.2	Messung der Leistung der reflektierten Laserstrahlung	73
4.1.1.3	Optimierung des Versuchsaufbaus	74
4.1.1.4	Signalverarbeitung	75
4.1.2	Untersuchung der Leistungsstabilität	76
4.1.3	Einflüsse der reflektierten Strahlung	78
4.1.4	Zusammenfassung	78
4.2	Spektroskopische Untersuchungen	79
4.2.1	Versuchsaufbau und -durchführung	79
4.2.2	Ergebnisse	81
4.2.3	Zusammenfassung	83
4.3	Prozessvisualisierung mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeits-IR-Kamera	83
4.3.1	Versuchsaufbau und -durchführung	84
4.3.2	Ergebnisse	86
4.3.3	Zusammenfassung	89
4.4	Untersuchung der Leistungsdichteverteilung der reflektierten Laserstrahlung	91
4.4.1	Ergebnisse der Simulationsrechnung	91
4.4.2	Versuchsaufbau	93
4.4.3	Versuchsdurchführung und -auswertung	95
4.4.4	Ergebnisse	97
4.4.4.1	Kapillarneigung	97
4.4.4.2	Unterschiedliche Schachtverhältnisse	101
4.4.4.3	Auswürfe	102
4.4.5	Zusammenfassung	103
5	Kamerabasierte In-Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen	105
5.1	Einleitung	105
5.2	Analyse der Schmelzbad- und Kapillargeometrie	106
5.2.1	Kameraeigenschaften	106
5.2.2	Versuchsaufbau	107
5.2.3	Einfluss der Detektionswellenlänge	108
5.2.3.1	Störung durch das Metaldampfleuchten	109
5.2.3.2	Visualisierung des Schmelzbades	110
5.2.4	Erfassung der Schmelzbad- und Kapillargeometrie	114
5.2.4.1	Objekterkennung	116
5.2.4.2	Bestimmung und Auswertung der Formparameter	118
5.3	Zusammenfassung	119

6 Realisierung eines Echtzeit-Bildverarbeitungssystems	121
6.1 Einleitung	121
6.2 Systemhardware	121
6.3 Systemsoftware	122
6.4 Systemanpassung	124
6.5 Versuchsdurchführung	124
6.6 Detektionsergebnisse	126
6.6.1 Variation der Laserleistung	127
6.6.2 Variation der Fokusbildung	128
6.6.3 Spalt beim Überlappstoß	131
6.6.4 Kombination aus Lateralversatz und Spalt beim Stumpfstoß	136
6.6.5 Lateralversatz bei Stumpfstoß von Tailored Blanks	138
6.6.6 Lateralversatz bei Kehlnahtschweißungen	139
6.6.7 Schutzgaseinflüsse	141
6.7 Zusammenfassung	142
7 Zusammenfassung	146
Literaturverzeichnis	148
Danksagung	153

Liste der verwendeten Symbole

Symbol	Bezeichnung	Wert	Dimension
Lateinische Buchstaben			
a_{ix}, a_{iy}	Richtungskomp. des Kettencodes	1	1
A	Absorption	1	1
A_D	Detektorfläche	1	m ²
A_O	Objektfläche	1	Pixel
b_W	Bildweite	1	m
b	Wiensche Konstante	$2,8978 \cdot 10^{-3}$	m·K
b_B	Bildbreite	1	Pixel
B	Bildgröße	1	m
c	Lichtgeschwindigkeit	1	ms ⁻¹
C	Speicherbedarf	1	Bit
d	Dicke des Dielektrikums	1	m
d_f	Fokusedurchmesser	1	m
d_{kap}	Öffnungsdurchmesser der Kapillare	1	1
D	Dicke der planparallelen Platte	1	m
E	Extinktion	1	1
E_S	Bestrahlungsstärke	1	Wm ⁻²
f	Brennweite	1	m
f_f	Formfaktor	1	1
F	Farbtiefe	1	Bit
g	Grauwert	1	1
g_W	Gegenstandsweite	1	m
G	Gegenstandsgröße	1	m
h	Plancksche Konstante	$6,6262 \cdot 10^{-34}$	Js
h	Laplace-Operator	1	1
h_B	Bildhöhe	1	Pixel
H	Histogrammfunktion (rel. Häufigkeit)	1	1
HW	Halbwertsbreite	1	m
i	Wahrscheinlichkeit	1	1

Symbol	Bezeichnung	Wert	Dimension
I	Intensität	1	Wm^{-2}
k	Boltzmann-Konstante	$1,3807 \cdot 10^{-23}$	JK^{-1}
L	Strahlungsdichte	1	$\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1}$
m	Ordnung	1	1
M, N	Quantisierungsschritte	1	1
M_S	Strahlungsflussdichte	1	Wm^{-2}
MW	Mittlerer Grauwert	1	1
n	Brechzahl	1	1
n_e, n_o	Schritte des Kettencodes	1	1
n_p	Pixelanzahl	1	1
N	Gesamtzahl der Pixel	1	1
N_q	Quantisierungsschritte	1	1
OD	Optische Dichte	1	1
P_L	Laserleistung	1	W
p	Pixelwert	1	1
q	Histogrammtransformationsfunktion	1	1
r	Radius	1	m
R	Reflexion	1	1
s	Abstand	1	m
s	Sobel-Operator	1	1
S	Fläche der Strahlungsquelle	1	m^2
SNR	Signal-Rausch-Verhältnis	1	1
t	Zeiteinheit	1	s
t_{kap}	Kapillartiefe	1	m
T	Temperatur	1	K
T_G	Schwelle der morphologischen Operatoren	1	1
T_S	Transmission	1	1
T_v	Verdampfungstemperatur	1	K
U	Objektumfang	1	Pixel
v	Vorschubgeschwindigkeit	1	ms^{-1}
W	Strahlungsenergie	1	J
x	Bildbreite	1	m
$\bar{x}$	Arithmetischer Mittelwert	1	1
$\bar{\bar{x}}$	Intensitätsschwerpunkt	1	1

Symbol	Bezeichnung	Wert	Dimension
x_c, y_c	Intensitätsschwerpunkt, Komponenten	1	Pixel
x_D	Doppelbildabstand	1	m
x_k	Bildbreite	1	Pixel
y	Bildhöhe	1	m
Y	Vergrößerung	1	1
y_j	Bildhöhe	1	Pixel
z	Fokuslage	1	m

Griechische Buchstaben

α	Absorptionsgrad	1	1
β	Raumwinkel	1	Grad
γ	Winkel	1	Grad
δ	Deltafunktion	1	1
ε	Emissionsgrad	1	1
ε_f	Exzentrizität	1	1
ϑ	Emissionswinkel	1	Grad
λ	Wellenlänge	1	m
λ_c	Kantenwellenlänge	1	m
λ_W	Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffes	1	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
μ	Mittelwert	1	1
$\mu_n, \mu_{p,q}$	Momente des Bildes	1	1
ν	Messfrequenz	1	s^{-1}
ξ	Objektorientierung	1	Grad
σ	Standardabweichung	1	1
σ_B	Stefan-Boltzmann-Konstante	$5,6703 \cdot 10^{-8}$	$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$
σ^2	Varianz	1	1
τ	Transmissionsgrad	1	1
φ	Gradient des Sobel-Operators	1	1
ϕ	Strahlungsfluss	1	W
Ω	Raumwinkel	1	Grad

