



Universität Stuttgart
Institut für Strahlwerkzeuge



LASER IN DER MATERIALBEARBEITUNG

Forschungsberichte des IFSW

Andreas Heider

**Erweitern der Prozessgrenzen beim
Laserstrahlschweißen von Kupfer mit
Einschweißtiefen zwischen 1 mm
und 10 mm**

Herbert Utz Verlag



Andreas Heider

**Erweitern der Prozessgrenzen beim
Laserstrahlschweißen von Kupfer mit
Einschweißtiefen zwischen 1 mm und 10 mm**

Herbert Utz Verlag · München 2018

Laser in der Materialbearbeitung
Band 92

Ebook (PDF)-Ausgabe:

ISBN 978-3-8316-7390-2 Version: 1 vom 26.07.2018

Copyright© Herbert Utz Verlag 2018

Alternative Ausgabe: Softcover

ISBN 978-3-8316-4738-5

Copyright© Herbert Utz Verlag 2018

Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

A. Heider

Erweitern der Prozessgrenzen beim
Laserstrahlschweißen von Kupfer mit
Einschweißtiefen zwischen 1 mm
und 10 mm

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.

Erweitern der Prozessgrenzen beim Laserstrahlschweißen von Kupfer mit Einschweißtiefen zwischen 1 mm und 10 mm

von Dr.-Ing. Andreas Heider
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. habil. Thomas Graf
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. Siegfried Schmauder

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 978-3-8316-4738-5

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

Tel.: 089-277791-00 · www.utzverlag.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
Formelzeichen und Abkürzungen	7
Kurzfassung der Arbeit	9
Extended Abstract	11
1 Einleitung	15
1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit.....	15
1.2 Aufbau der Arbeit	16
2 Prozessgrenzen beim Laserstrahlschweißen von Kupfer	18
2.1 Prozessgrenze der Einschweißtiefe.....	20
2.2 Prozessgrenze der Schweißnahtqualität.....	21
2.2.1 Spritzer und Schmelzauswürfe	22
2.2.2 Poren	24
2.2.3 Schwankungen in der Einschweißtiefe.....	26
2.2.4 Unregelmäßige Nahtzeichnung	27
2.2.5 Klassifizierung und Quantifizierung von Nahtdefekten.....	27
2.3 Werkstoffspezifische Einflussgrößen auf die Prozessgrenzen	29
2.3.1 Wärmeleitfähigkeit	32
2.3.2 Absorption	33
2.3.3 Oberflächenbeschaffenheit und Werkstoffzustand.....	35
2.3.4 Zusammenführung der werkstoffspezifischen Einflussgrößen	36
2.4 Verfahrensspezifische Einflussgrößen auf die Prozessgrenzen.....	36
2.4.1 Einfluss des Fokusedurchmessers	37
2.4.2 Einfluss der Fokusslage.....	43
2.4.3 Einfluss der Schweißgeschwindigkeit und Laserleistung	43
2.4.4 Wirkungsgrade und Prozesseffizienz	48
2.5 Bewertung der Prozessgrenzen.....	52
3 Verhalten der Kapillare beim Laserstrahlschweißen	56
3.1 Röntgen-Systemtechnik für die Bewertung des Kapillarverhaltens.....	57
3.2 Charakteristische Geometrien der Dampfkapillare beim Schweißen.....	59
3.3 Verhalten der Dampfkapillare beim Prozessbeginn	61
3.4 Verhalten der Dampfkapillare während des Schweißprozesses	63
3.5 Verhalten der Dampfkapillare bei der Spritzerbildung	66
3.5.1 Bildung von kleinen Spritzern	67

3.5.2	Verhalten der Dampfkapillare bei der Entstehung von Schmelzauswürfen.....	69
3.5.2.1	<i>Modellvorstellung</i>	71
3.6	Verhalten der Dampfkapillare bei der Bildung von Poren	73
3.7	Einfluss der Schweißgeschwindigkeit auf das Verhalten der Dampfkapillare	75
3.8	Einfluss der Laserleistung auf das Verhalten der Dampfkapillare	77
3.9	Einfluss der Streckenenergie auf das Verhalten der Dampfkapillare	79
3.10	Auswirkung des Kapillarverhaltens auf die Nahtgeometrie	81
3.11	Interpretation zum Kapillarverhalten hinsichtlich der Prozessgrenzen	85
4	Erweitern der Prozessgrenzen beim Laserstrahlschweißen.....	88
4.1	Zeitliche Änderung der Laserleistung (Leistungsmodulation)	89
4.1.1	Begriffsbestimmung	91
4.1.2	Verhalten der Kapillare bei der Leistungsmodulation.....	92
4.1.2.1	<i>Zulässige Einschweißtiefenschwankung</i>	95
4.1.2.2	<i>Einfluss der Modulationsfrequenz auf die Einschweißtiefe</i>	97
4.1.3	Einfluss der Leistungsmodulation auf die Anzahl der Nahtdefekte	99
4.1.3.1	<i>Einfluss der Modulationsfrequenz</i>	100
4.1.3.2	<i>Einfluss der Modulationstiefe</i>	101
4.1.3.3	<i>Einfluss der Schweißgeschwindigkeit</i>	102
4.1.3.4	<i>Einfluss des Fokusedurchmessers</i>	103
4.1.4	Auswirkungen der Leistungsmodulation auf die Nahtzeichnung	104
4.1.5	Zusammenführung der Ergebnisse der Leistungsmodulation	109
4.2	Steigerung der Laserleistung	114
4.2.1	Verhalten der Kapillare beim Schweißen mit Leistungen $P > 5 \text{ kW}$...	115
4.2.2	Einfluss der Laserleistung ($> 5 \text{ kW}$) auf die Anzahl an Nahtdefekten.	120
4.2.3	Ausbildung der Nahtform beim Schweißen mit Leistungen $> 5 \text{ kW}$...	124
4.2.4	Zusammenführung der Ergebnisse mit Laserleistungen $> 5 \text{ kW}$	125
5	Übertragung der Ergebnisse zur Erweiterung der Prozessgrenzen.....	130
6	Zusammenfassung	132
7	Literaturverzeichnis	136
8	Danksagung	145

Formelzeichen und Abkürzungen

Symbol	Bedeutung	Einheit
A	Absorptionsgrad	%
c_p	Spezifische Wärmekapazität	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_{p_m}	Mittlere spezifische Wärmekapazität	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
d_f	Fokusedurchmesser	m
E	Streckenenergie	kJ/m
F	Aufgeschmolzene Fläche	m^2
f	Frequenz	Hz
f_M	Modulationsfrequenz	Hz
h_s	Spezifische Schmelzenthalpie	J/kg
L_{Diff}	Thermische Diffusionslänge	m
l_M	Modulationslänge	m
P	Leistung	W
P_A	Absorbierte Leistung	W
P_{ampl}	Amplitude der Leistungsmodulation	W
P_{av}	Mittlere Leistung	W
P_{max}	Maximalleistung	W
P_{min}	Minimalleistung	W
P_v	Verlustleistung	W
r	Strahlradius	m
s	Einschweißtiefe	m
s_{max}	Maximale Einschweißtiefe	m
s_{min}	Minimale Einschweißtiefe	m
T	Temperatur	K
t	Wechselwirkungszeit	s
T_0	Umgebungstemperatur	K
T_{Liq}	Liquidustemperatur	K
T_p	Prozesstemperatur	K
T_s	Schmelzpunkt	K
T_{Sol}	Solidustemperatur	K
T_v	Verdampfungstemperatur	K
v	Schweißgeschwindigkeit	m/min

V_E	Energiespezifische Volumen	m^3/kJ
Δ_{mod}	Normierte Einschweißtiefenschwankung	-
η_A	Einkoppelgrad	%
η_{th}	Thermischer Wirkungsgrad	%
Λ	Normierte Frequenz	-
λ	Wärmeleitfähigkeit	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
Π	Modulationstiefe	-
ρ	Dichte	kg/m^3
ρ_m	Mittlere Dichte	kg/m^3
κ	Temperaturleitfähigkeit	m^2/s

Cu-ETP	zähgepoltes Elektrolytkupfer (electrolytic tough-pitch)
CuSn6	Kupfer-Bronze-Legierung
STAW	Standardabweichung
cw	Continuous wave, Dauerstrichbetrieb

Kurzfassung der Arbeit

Kupfer ist aufgrund seiner besonderen Materialeigenschaften (wie einer hohen Wärmeleitfähigkeit) in allen Bereichen der Elektromobilität, Elektrik und Elektronik ein unverzichtbarer Werkstoff. Damit einhergehend spielt die Füge-technologie dieser Werkstoffe eine Schlüsselrolle für eine nachhaltige, effiziente und kostengünstige Produktion. Der Laserstrahl als Fügewerkzeug zum Schweißen hat sich bereits in zahlreichen industriellen Applikationen im Bereich der Stahl- und Aluminiumwerkstoffe etabliert. Die Prozessstabilität und die Reproduzierbarkeit beim Laserstrahlschweißen von Kupfer sind dahingegen insbesondere durch die stetig wachsenden Anforderungen an die Schweißverbindungen, wie einer reduzierten Wärmeeinbringung, einer geringen Spritzerbildung und steigenden Nahtquerschnittsflächen, derzeit noch unzureichend und einigen Prozessgrenzen ausgesetzt. Eine Prozessgrenze ist dabei immer dann erreicht, wenn die zuvor definierten Anforderungen an die Schweißnaht nicht mehr erfüllt werden. Als wesentliche Prozessgrenzen wurden eine Limitierung der erzielbaren Einschweißtiefe und eine geminderte Schweißnahtqualität identifiziert.

Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt im Erarbeiten eines grundlegenden Prozessverständnisses insbesondere im Hinblick auf die Prozessgrenzen, deren Einflussgrößen und Wirkzusammenhänge und dem Identifizieren der Ursachen der Prozessgrenzen. Mit Hilfe von Online-Hochgeschwindigkeits-Röntgenuntersuchungen wurde das Kapillarverhalten während des Schweißvorgangs analysiert und hinsichtlich der Prozessgrenzen bewertet.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wurden aus den prozesstechnischen und physikalischen Ursachen für die Prozessgrenzen Strategien zur Erweiterung abgeleitet, entwickelt und umgesetzt.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden werkstoffspezifische Eigenschaften (Absorption, Wärmeleitfähigkeit) und verfahrenstechnische Aspekte (Laserleistung, Schweißgeschwindigkeit) als Einflussgrößen auf die Prozessgrenzen identifiziert. Dabei wirken sich die Einflussgrößen in Form einer Limitierung auf die erzielbare Einschweißtiefe aus, welche maßgeblich durch die Laserleistung und die Schweißgeschwindigkeit bestimmt wird. Darüber hinaus äußern sich die Einflussgrößen durch die Bildung von Nahtdefekten (Spritzer, Schmelzauswürfe, Poren) in einer geminderten Schweißnahtqualität.

Es konnte eine Korrelation zwischen allen Einflussgrößen auf die Prozessgrenzen (Einschweißtiefe und Nahtqualität) und dem Kapillarverhalten während des Schweißvorgangs beobachtet werden. Aus diesem Grund besteht die plausible Vermutung, dass

größtenteils das Kapillarverhalten für die ermittelten Prozessgrenzen verantwortlich ist.

Mit dieser Kenntnis lassen sich die Strategien einer Leistungsmodulation und die Verwendung von hohen Laserleistungen ($>> 5 \text{ kW}$) zum Erweitern der Prozessgrenzen ableiten. Mit den umgesetzten Strategien ist es möglich qualitativ hochwertige Schweißnähte in Kupfer mit Einschweißiefen bis zu 10 mm zu erzeugen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit tragen dazu bei das grundlegende Prozessverständnis beim Schweißen von Kupfer zu erweitern und stellen somit Grundlage für das Ableiten und die Entwicklung zukünftiger Strategien für einen zuverlässigen und robusten Laserstrahlschweißprozess in Kupfer dar.