



Universität Stuttgart
Institut für Strahlwerkzeuge

IFSW

LASER IN DER MATERIALBEARBEITUNG

Forschungsberichte des IFSW

Florian Fetzer

**Analyse der Geometrie und Stabilität der
Kapillare beim Laserstrahl-tiefschweißen
mittels reduzierter Modelle**

utzverlag



Florian Fetzner

**Analyse der Geometrie und Stabilität der Kapillare
beim Laserstrahl-tiefschweißen mittels reduzierter
Modelle**

Laser in der Materialbearbeitung
Band 99

Ebook (PDF)-Ausgabe:
ISBN 978-3-8316-7606-4 Version: 1 vom 27.07.2020
Copyright© utzverlag 2020

Alternative Ausgabe: Softcover
ISBN 978-3-8316-4874-0
Copyright© utzverlag 2020

Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

Florian Fetzer
Analyse der Geometrie und Stabilität
der Kapillare beim Laserstrahl-
schweißen mittels reduzierter Modelle

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.

Analyse der Geometrie und Stabilität der Kapillare beim Laserstrahl-tiefschweißen mittels reduzierter Modelle

von Dr.-Ing. Florian Fetzner
Universität Stuttgart



utzverlag 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., 2020

D 93

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Sämtliche, auch auszugsweise Verwertungen bleiben vorbehalten.

Copyright © utzverlag GmbH 2020

ISBN 978-3-8316-4874-0 (gebundenes Buch)
ISBN 978-3-8316-7606-4 (E-Book)

Printed in Germany

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

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
Formelzeichen und Abkürzungen	8
Kurzfassung der Arbeit	13
Extended Abstract	17
1 Einleitung.....	20
1.1 Motivation	20
1.2 Aufbau der Arbeit.....	22
2 Grundlagen und Stand der Technik	24
2.1 Grundlagen des Laserstrahl-tiefschweißens	24
2.2 Entwicklung der Laserstrahlquellen	27
2.3 Modellierung des Laserstrahl-tiefschweißens	28
2.3.1 Herausforderungen und Modelle	28
2.3.2 Verwendete Berechnungsmethoden	34
2.3.2.1 Raytracing	34
2.3.2.2 Smoothed Particle Hydrodynamics.....	36
2.4 Diagnostik der Kapillare beim Laserstrahl-tiefschweißens	39
2.4.1 Online-Röntgenvideographie.....	39
2.4.2 Hochgeschwindigkeitsaufnahmen in transparenten Medien	42
2.4.3 Optische Kohärenztomographie	44
3 Stationäre Modellierung der Kapillartiefe	46
3.1 Ziele und Ansatz.....	46
3.2 Modellierungsschema.....	48
3.2.1 Berechnete Geometrien.....	48
3.2.2 Physikalisches Wärmeleitungsmodell	50
3.2.3 Iterationsschema	53

3.3	Implementierung.....	56
3.4	Validierung und Anwendung.....	56
3.5	Diskussion und Ausblick.....	60
4	Transiente Modellierung der Kapillartiefe mit einem analytischen Ansatz	62
4.1	Ziele und Vorgehen	62
4.2	Methodik.....	63
4.2.1	Mathematischer Ansatz.....	63
4.2.2	Experimentelle Kalibrierung.....	68
4.2.3	Quantifizierung der Kapillardynamik	69
4.3	Anwendung.....	72
4.4	Limitierungen und Diskussion.....	74
4.5	Zusammenfassung und Fazit	76
5	Intrinsische Fluktuationen der Kapillartiefe	78
5.1	Das Spikingphänomen.....	79
5.2	Experimenteller Aufbau	80
5.3	Einfluss der Prozessstabilität auf das Spiking.....	82
5.4	Modellbasierte Untersuchung des Spikings	94
5.4.1	Absorbierte Bestrahlungsstärke in der Kapillare	94
5.4.2	Der Spikingmechanismus.....	97
5.4.3	Verifikation mittels multiphysikalischer Simulation	98
5.5	Experimentelle Validierung.....	106
5.5.1	Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Spikingfrequenz	106
5.5.2	Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Kapillarstabilität.....	107
5.6	Zusammenfassung und Fazit	109
6	Kapillargeometrie und Nahtqualität bei hohen Vorschüben und Laserleistungen	110
6.1	Nahtqualität beim Laserstrahlschweißen von Aluminium	111
6.2	Einfluss des Vorschubs auf die Geometrie und Stabilität der Kapillare	113
6.2.1	Experimenteller Aufbau.....	113
6.2.2	Rekonstruktion der Kapillargeometrie.....	114
6.2.3	Ergebnisse	118

6.2.3.1	Instabile Kapillargeometrie bei niedrigen Vorschüben	118
6.2.3.2	Stabile Kapillargeometrie bei hohen Vorschüben	124
6.2.4	Diskussion	130
6.3	Einfluss des Vorschubs auf den Prozesswirkungsgrad	132
6.3.1	Wärmeleitungsmodell zur Berechnung des thermischen Wirkungsgrades	133
6.3.2	Messung und Berechnung des Prozesswirkungsgrades	137
6.4	Implementierung	140
6.4.1	Experimenteller Aufbau	140
6.4.2	Porenreduktion und Stabilität der Einschweißtiefe	141
6.4.3	Reduzierung des kritischen Randabstands bei Nahtmittenrissen	143
6.4.4	Limitierung	147
6.5	Zusammenfassung und Fazit	148
7	Zusammenfassung	150
	Literatur- und Quellenverzeichnis	153
	Danksagung	169

Formelzeichen und Abkürzungen

Symbol	Bedeutung	Einheit
A	Absorptionsgrad	
A_P	Absorptionsgrad bei parallelem Einfall	
A_S	Absorptionsgrad bei senkrechtem Einfall	
\vec{b}_i	Normalenvektor am Oberflächenpartikel i	m
c_p	isobare Wärmekapazität	J/(kg·K)
$c_{p,l}$	Wärmekapazität im flüssigen Zustand	J/(kg·K)
$c_{p,s}$	Wärmekapazität im festen Zustand	J/(kg·K)
D	Kapillartiefe	m
D_n	zeitabhängiger Anteil des Kapillartiefenverlaufs	m
\bar{D}	mittlere Kapillartiefe	m
d_B	Strahldurchmesser auf der Werkstückoberseite	m
d_F	Durchmesser der Strahltaile des fokussierten Laserstrahls	m
f	Frequenz	1/s
h	Enthalpie	J
h_l	latente Wärme des Schmelzvorgangs	J/kg
h_v	latente Wärme der Verdampfung	J/kg
I	Intensität	W/m ²
i	imaginäre Einheit	

J	Bestrahlungsstärke	W/m ²
k	imaginärer Anteil des komplexen Brechungsindex	
k_B	Boltzmannkonstante	J/K
m_i	Masse des Partikels i	kg
m_v	Molekulargewicht verdampfender Partikel	kg
\vec{n}	Normalenvektor	m
n^*	komplexer Brechungsindex	
n	realer Anteil des komplexen Brechungsindex	
P	eingestrahlte Laserleistung	W
P_{in}	eingekoppelte Laserleistung	W
P_n	zeitabhängiger Anteil der eingestrahkten Laserleistung	W
\bar{P}	mittlere eingestrahlte Laserleistung	W
$P_{v,f}$	Verlustleistung durch fluiddynamische Verlustmechanismen	W
$P_{v,o}$	Verlustleistung durch optische Verlustmechanismen	W
$P_{v,t}$	Verlustleistung durch thermische Verlustmechanismen	W
p_0	Dampfdruck	kg/(m·s ²)
p_a	Umgebungsdruck	kg/(m·s ²)
p_s	Oberflächendruck	kg/(m·s ²)
q_l	lokal in das Schmelzebad eingebrachte Leistung	W
q_s	lokale Verdampfungsleistung	W
s_{cap}	Kapillaroberfläche	m ²
T	Temperatur	K

T_{evap}	Verdampfungstemperatur	K
T_l	Liquidustemperatur	K
T_{melt}	Schmelztemperatur	K
T_s	Solidustemperatur	K
T_0	Raumtemperatur	K
t	Zeit	s
\vec{U}	Geschwindigkeitsfeld	m/s
\dot{V}	pro Zeit erzeugtes Nahtvolumen	m ³ /s
v	Vorschub	m/s
w_c	maximale Breite der Kapillare	m
w_m	maximale Breite des Schmelzebades	m
z_R	Rayleighlänge	m
α	linearer Abschwächungskoeffizient	1/m
γ	relativer Anteil der flüssigen Phase	
μ	dynamische Viskosität	kg/(m·s)
η_{th}	thermischer Wirkungsgrad	
λ	Wellenlänge der Laserstrahlung	m
λ_{th}	Wärmeleitfähigkeit	W/(m·K)
λ_l	Wärmeleitfähigkeit im flüssigen Zustand	W/(m·K)
λ_s	Wärmeleitfähigkeit im festen Zustand	W/(m·K)
η_A	Einkoppelgrad	
η_P	Prozesswirkungsgrad (experimentell ermittelt)	

η_P^*	Prozesswirkungsgrad (rechnerisch ermittelt)	
ρ	Dichte	kg/m ³
ξ	relativer Anteil des verdampfenden Materials	
ν	kinematische Viskosität	m ² /s
ϑ	Einfallswinkel	
φ	Phasenversatz	
ω	Kreisfrequenz	1/s
Co-Zahl	Courant-Zahl	
CO ₂	Kohlenstoffdioxid	
Cu-OF	Kupfer, desoxidiert	
cw	continuous wave (Dauerstrich)	
ED	Randabstand	
IFSW	Institut für Strahlwerkzeuge	
LLK	Lichtleitkabel	
M ²	Beugungsmaßzahl	
NaOH	Natronlauge	
OCT	optische Kohärenztomographie	
OpenFOAM	Open Field Operation and Manipulation	
SPH	Smoothed Particle Hydrodynamics	
SPP	Strahlparameterprodukt	
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol	

Kurzfassung der Arbeit

Beim Laserstrahl-tiefschweißen haben Geometrie und Stabilität der Dampfkapillare einen entscheidenden Einfluss auf die Einschweißtiefe und die resultierende Nahtqualität. In der vorliegenden Arbeit werden Modelle und experimentelle Untersuchungsmethoden vorgestellt, mit denen die Kapillargeometrie stationär sowie zeitabhängig prognostiziert und die Stabilität der Kapillargeometrie analysiert werden kann. Die dargestellten Untersuchungen sind in vier Kapitel gegliedert, welche die Beschreibung und Untersuchung der Kapillargeometrie zunehmend detaillierter gestalten, motiviert durch Erkenntnisse im jeweils vorangegangenen Schritt. Diese behandeln die folgenden Aspekte:

- Die Schätzung der Kapillartiefe mit einem iterativen Wärmeleitungsmodell beim Laserstrahlschweißen mit konstanten Prozessparametern,
- die analytische, transiente Beschreibung der Kapillartiefe beim Schweißen mit zeitabhängiger Laserleistung,
- die experimentelle und theoretische Untersuchung von inhärenten Fluktuationen der Kapillargeometrie und
- die Untersuchung der Kapillargeometrie, Kapillarstabilität und Nahtqualität beim Laserstrahlschweißen mit hohen Vorschüben und Laserleistungen.

Bei der Modellierung des Laserstrahlschweißens muss der Zielkonflikt zwischen Detaillierungsgrad und Präzision sowie benötigten Rechenressourcen gelöst werden. Die in dieser Arbeit dargestellten Methoden wurden vor diesem Gesichtspunkt entwickelt. Sie sind auf die Abbildung der physikalischen Effekte reduziert, welche zur Analyse der relevanten Wirkmechanismen notwendig sind und werden durch experimentelle Untersuchungen unterstützt.

Es wurde ein numerisches Modell zur Prognose der mittleren Kapillartiefe beim Laserstrahlschweißen mit konstanter Laserleistung entwickelt. Das Modell basiert auf einem physikalischen Wärmeleitungsmodell, welches in ein Iterationsschema zur Anpassung der Kapillartiefe eingebettet ist. Das Wärmeleitungsmodell bildet die grundlegenden physikalischen Zusammenhänge der Wärmeleitung, Phasenübergänge und der geomet-

rieabhängigen Einkopplung der Laserleistung in die Kapillare ab und berechnet das stationäre Temperaturfeld. Die Kapillartiefe wird iterativ, abhängig von diesem berechneten Temperaturfeld, skaliert. Der Iterationsmechanismus kann anhand einer einzelnen Schweißung experimentell kalibriert werden. Die Auswirkungen unbekannter Materialdaten und nicht implementierter physikalischer Effekte werden durch diese Kalibrierung und die Iteration abgefangen. Messungen der Kapillartiefe mittels optischer Kohärenztomographie (OCT) wurden zur Kalibrierung und Verifikation verwendet. Die mittlere relative Abweichung zwischen berechneten und gemessenen Kapillartiefen betrug 13,5%. Bei Schweißprozessen mit einem Vorschub von mindestens 5 m/min verringerte sich die Abweichung auf 7%. Die bessere Übereinstimmung von Modell und Experiment bei höheren Vorschüben legt nahe, dass der Schweißprozess bei hohen Vorschüben in geringerem Maße von transienten Effekten beeinflusst wird, die im Modell nicht berücksichtigt sind. Die weiteren Untersuchungen widmen sich daher der Beschreibung und Modellierung zeit- und vorschubabhängiger Prozesse. Hierzu wurde zunächst die Dynamik der Kapillargeometrie beim Laserstrahlschweißen mit kontrolliert fluktuierender Laserleistung untersucht.

Eine analytische Methode zur Berechnung des Kapillartiefenverlaufs beim Laserstrahlschweißen mit zeitabhängiger Laserleistung wurde erarbeitet. Die komplexe Abhängigkeit zwischen Laserleistung und Kapillartiefe wird dabei durch eine Differentialgleichung zweiter Ordnung abstrahiert, welche die beiden Größen zeitabhängig koppelt und das dynamische Verhalten der Kapillare abbildet. Zur Kalibrierung dieser Gleichung wurde mittels OCT-Messungen der Verlauf der Kapillartiefe beim Laserstrahlschweißen mit oszillierender Laserleistung bestimmt. Mit diesen Messungen konnte die Abhängigkeit der Amplitude des Kapillartiefenverlaufs von der Oszillationsfrequenz bestimmt werden. Die Koeffizienten der Differentialgleichung wurden aus diesem Amplitudengang bestimmt. Die Differentialgleichung kann für beliebige zeitliche Verläufe der Laserleistung integriert werden und so der resultierende, zeitabhängige Verlauf der Kapillartiefe bestimmt werden. Die Methodik wurde am Extremfall einer Schweißung in Baustahl mit rechteckförmiger Leistungsmodulation validiert. Die Abweichung zwischen berechneten Kapillartiefen und experimentell gemessenen lag dabei fast ausschließlich im Bereich der Messunsicherheiten der experimentellen Messungen. Bei Oszillationsfrequenzen von mehr als 100 Hz trat ein Hystereseeffekt im Verlauf der Kapillartiefe auf, der die zeitabhängige Kopplung von Kapillargeometrie und Laserleistung belegt. Die Wechselwirkung von Kapillargeometrie, geometrieabhängiger Einstrahlung der Laserleistung und fluiddynamischen Prozessen kann zu Kapillarinstabilitäten führen. Dies wurde in den folgenden Untersuchungen mit bildgebender Diagnostik und detaillierterer Modellierung der physikalischen Phänomene an der Kapillare analysiert.

Fluktuationen der Kapillargeometrie beim Laserstrahlschweißen mit gleichbleibenden Prozessparametern wurden zunächst am Beispiel des Spikingphänomens untersucht. Aufgrund der guten visuellen Zugänglichkeit wurden hierzu Laserstrahlschweißprozesse in Eis analysiert. Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der Schweißprozesse konnten zur Untersuchung des Einflusses von Schmelzebadinstabilitäten auf das Spiking, sowie zur dreidimensionalen Rekonstruktion von Kapillargeometrien verwendet werden. Mittels einer multiphysikalischen, transienten Prozesssimulation wurde der Spikingmechanismus reproduziert und numerisch untersucht. In diesem Modell wird die Ausbreitung und Absorption der Laserstrahlung mittels Raytracing berechnet, thermo- und fluiddynamische Prozesse werden mit der Smoothed Particle Hydrodynamics Methode modelliert. Sowohl in der experimentellen, als auch in der numerischen Analyse konnte die zeitliche Änderung der lokalen Bestrahlungsstärke im unteren Bereich der Kapillarfront als Ursache des Spikings identifiziert werden. Eine Stabilisierung der Kapillargeometrie konnte einhergehend mit der Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit festgestellt werden. Eine Übertragung dieser Maßnahme auf reale Laserschweißanwendungen, die von Prozessinstabilitäten beeinträchtigt werden, liegt aufgrund ähnlicher Prozesscharakteristika der Laserbearbeitung von Eis und Metallen nahe.

Der Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Kapillargeometrie, deren Stabilität, sowie die resultierende Prozesseffizienz wurde für das Laserstrahl-tiefschweißen von Aluminiumlegierungen der 6000er-Serie analysiert. Bei diesen Laserstrahlschweißprozessen treten häufig Kapillarinstabilitäten auf und die Nahtqualität wird durch Fluktuationen der Einschweißtiefe, Prozessporen und Nahtmittenrisse gemindert. Online-Röntgenaufnahmen wurden verwendet, um die bei diesen Prozessen auftretenden Kapillargeometrien zu bestimmen. Die Abschwächung der Röntgenstrahlen beim Durchgang durch das Werkstück wurde zur quantitativen, dreidimensionalen Rekonstruktion der Kapillargeometrie genutzt. Die Einkopplung in diese Kapillaren wurde mittels Raytracing berechnet. Dabei konnten drei unterschiedliche Prozessregime abgegrenzt werden, die sich in der Form und Stabilität der Kapillare unterscheiden. Bei den untersuchten Versuchen vergrößerte sich der Abstand zwischen Kapillarfront und -rückwand mit steigendem Vorschub. Dies führte zu einer Zunahme der Kapillarstabilität und dadurch zu einer Reduzierung von Prozessporen und Schwankungen der Einschweißtiefe. Die Änderung der Kapillargeometrie geht mit einem abnehmenden Einkoppelgrad der Laserleistung einher. Gleichzeitig erhöht die zunehmende thermische Effizienz des Schweißprozesses den Gesamtwirkungsgrad und verringert die thermische Belastung der Werkstücke. An einem anwendungsnahen Beispiel wurde demonstriert, wie hohe Laserleistungen zum Schweißen bei hohen Vorschüben eingesetzt werden können, um die resul-