

LASER IN DER MATERIALBEARBEITUNG

Forschungsberichte des ... **IFSW** 

Jan-Philipp Weberpals

Nutzen und Grenzen guter Fokussierbarkeit beim Laserschweißen

Herbert Utz Verlag 

Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

J.-P. Weberpals
Nutzen und Grenzen guter Fokussier-
barkeit beim Laserschweißen

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.

Nutzen und Grenzen guter Fokussierbarkeit beim Laserschweißen

von Dr.-Ing. Jan-Philipp Weberpals
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 (i.R.)
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. Reinhart Poprawe M.A.

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., 2010

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 2010

ISBN 978-3-8316-0995-6

Printed in Germany

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

Kurzfassung der Arbeit

Die stetige Weiterentwicklung im Bereich der Hochleistungsfestkörperlaser ermöglicht eine sukzessive Steigerung der Laserleistung bei gleichzeitig hervorragender Fokussierbarkeit. Diese lässt sich auf verschiedenste Art und Weise nutzen, gleichwohl im Rahmen dieser Arbeit das Hauptaugenmerk auf die Reduktion des Fokusedurchmessers gerichtet ist.

Ausgangspunkt der Untersuchungen ist die Ausbildung der Dampfkapillare. Erst sie ermöglicht den Prozess des Laserstrahltiefschweißens. Hinsichtlich der Kapillarausbildung ist bekannt, dass deren Ausprägung auf dem Prinzip der Mehrfachreflexion des einfallenden Laserstrahls im Kapillarinneren basiert. Diese Modellvorstellung findet vornehmlich bei geringen Vorschubgeschwindigkeiten im Fall einer Einschweißung ihre Gültigkeit. Hingegen wird die Anzahl der kapillarbestimmenden Reflexionen mit zunehmendem Vorschub reduziert bzw. beträgt bei einer Durchschweißung eins. Dennoch zeigen beide Modellvorstellungen, dass die Neigung der sich ausbildenden Kapillarfront der monotonen Funktion Vorschubgeschwindigkeit je eingebrachter Intensität folgt. Da demzufolge ein kleinerer Fokusedurchmesser die Kapillare aufrichtet, ist insbesondere beim Tiefschweißen eine gute Fokussierbarkeit von großer Bedeutung.

Aufgrund dessen kann mit kleiner werdendem Fokusedurchmesser bei sonst gleichen Prozessparametern die Einschweißtiefe gesteigert werden. Allerdings stellt im Bereich von Fokusedurchmessern kleiner 200 μm der Divergenzwinkel des fokussierten Laserstrahls zusätzlich einen limitierenden Faktor bezüglich der resultierenden Einschweißtiefe dar. Da selbst bei solch hohen Intensitäten eine Plasmaabschirmung nicht existent ist, kann diese scheinbare Effizienzgrenze infolge der Verringerung des Divergenzwinkels aufgehoben werden.

Ein ganzheitliches Prozessverständnis erlaubt es, den Zusammenhang zwischen den Prozessparametern und der Stabilität des Tiefschweißprozesses zu evaluieren. Dabei zeigt sich, dass Prozesssporen in Aluminium sowie Schmelzbadauswürfe beim Schweißen von Stahl in direktem Zusammenhang mit der Fokussierbarkeit stehen. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass ein kleiner Divergenzwinkel für den Schweißprozess von Vorteil ist, weshalb sich die Prozessgrenzen bei gleichzeitig besserer Schweißnahtqualität erweitern und neue Anwendungsgebiete erschließen lassen.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung der Arbeit	5
Inhaltsverzeichnis.....	7
Formelzeichen und Abkürzungen	9
Extended Abstract	13
1 Einleitung	17
1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit	17
1.2 Aufbau der Arbeit.....	18
2 Strahlwerkzeug Laser	21
2.1 Strahlqualität der Laserstrahlung.....	21
2.2 Fokussierung der Laserstrahlung.....	23
3 Ausbildung der Dampfkapillare	25
3.1 Grundlagen	25
3.2 Versuchsaufbau	28
3.3 Bestimmung der Kapillarneigung	29
3.4 Variation des Anstellwinkels der Bearbeitungsoptik.....	35
3.5 Kapillarausbildung bei einer Einschweißung.....	39
4 Nutzen und Grenzen guter Fokussierbarkeit.....	45
4.1 Einfluss der Fokussierbarkeit	45
4.1.1 Variation des Fokusedurchmessers	46
4.1.2 Variation des Divergenzwinkels.....	56
4.1.3 Variation der Fokuslage.....	59
4.1.4 Variation der Laserleistung.....	64
4.2 Wirkungsgrade beim Laserstrahlschweißen.....	70
4.2.1 Einkoppelgrad	70
4.2.2 Thermischer Wirkungsgrad	73
4.2.3 Prozesswirkungsgrad	76
5 Schweißnahtqualität	83
5.1 Prozesssporen beim Schweißen von Aluminium.....	83
5.1.1 Einfluss von Fokussierbarkeit und Laserleistung	85

5.1.2 Einfluss der Fokuslage	90
5.2 Spritzerentstehung beim Schweißen von Stahl	92
5.2.1 Versuchsaufbau	93
5.2.2 Spritzerentstehungsmechanismus bei einer Einschweißung	96
5.2.3 Spritzerentstehungsmechanismus bei einer Durchschweißung	106
5.2.4 Verbesserung der Schweißnahtqualität	112
6 Zusammenfassung	131
7 Literaturverzeichnis	137
Danksagung	145

Formelzeichen und Abkürzungen

BEO		Bearbeitungsoptik
cw		Dauerstrich (continuous wave)
DSL		Diodengepumpter Scheibenlaser
FL		Faserlaser
LLK		Lichtleitkabel
LSL		Lampengepumpter Stablasers
Nd		Neodym
SPP		Strahlparameterprodukt
TS		Tiefschweißen
Ü		Übergangsbereich
WLS		Wärmeleitungsschweißen
YAG		Yttrium-Aluminium-Granat
Yb		Ytterbium
A	-	Absorptionsgrad
A _F	-	Aspektverhältnis
α	°	Kapillarneigung
$\alpha_{\perp}$	°	Kapillarneigung bei senkrechtem Strahleinfall
α_{cal}	°	berechnete Kapillarneigung ($\arctan(d_f/t)$)
α_{rel}	°	Kapillarneigung relativ zur Strahlachse
b	mm	Nahtbreite
β	-	Abbildungsmaßstab
β	°	Einfallswinkel der Laserstrahlung gemessen zur Flächen-normalen
c _p	kJ/kg K	Wärmekapazität
γ	°	Anstellwinkel der Bearbeitungsoptik
D	mm	Strahldurchmesser auf der Linse
D _p	m ² /s	im Temperaturbereich von Raumtemperatur bis T _s gemittelte Temperaturleitfähigkeit
Δt	mm	Tiefe der nicht direkt bestrahlten Fläche bei einer Einschweißung
d	mm	Strahldurchmesser

d_f	μm	Fokusedurchmesser
d_k	mm	Kerndurchmesser der Glasfaser
δ	m	Diffusionslänge
E	W/mm^2	Leistungsdichte
e	mm	Materialdicke
ε	$^\circ$	Ablösewinkel der Spritzer
F	mm^2	Fläche
F	mm^2	Nahtquerschnitt
F	-	Fokussierzahl
f_f	mm	Brennweite Fokussierlinse
f_k	mm	Brennweite Kollimationslinse
H_p	J/m^3	zum Erwärmen auf T_s pro Volumen erforderliche Wärme (spezifischer Wärmebedarf)
h_s	kJ/kg	Schmelzenthalpie
h_v	kJ/kg	Verdampfungsenthalpie
I	W/mm^2	Intensität
I_0	W/mm^2	mittlere Intensität im Fokus
I_{abs}	W/mm^2	absorbierte Intensität
K	-	Strahlpropagationsfaktor
κ	m^2/s	Temperaturleitfähigkeit
L_{Kf}	mm	Länge der Kapillarfront
$L_{K\delta}$	mm	Länge der Kapillaröffnung
λ	mm	Wellenlänge
λ_{th}	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
M^2	-	Beugungsmaßzahl
m	-	Geradensteigung der Ausgleichsgeraden
η_A		Einkoppelgrad
η_{Pr}	-	Prozesswirkungsgrad
η_{th}	-	thermischer Wirkungsgrad
O	m^2	Wandfläche
O_k	m^2	Oberfläche der Vergleichskugel
o	m^2	Fläche der Eintrittsöffnung
Pe	-	Péclet-Zahl
P_L	W	Laserleistung
P_L/d_f	kW/mm	Strahlparameterquotient

p_{Kf}	N	dynamischen Druck des abströmenden Metaldampfes
p_{PG}	Ns	nach oben wirkender Impuls der Schmelze an der Phasengrenze gasförmig/flüssig der Kapillarrückwand
Θ_0	mrاد	gesamter Divergenzwinkel (Grundmode)
Θ_f	mrاد	gesamter Divergenzwinkel des fokussierten Strahls
θ	mrاد	Divergenzwinkel
θ_0	mrاد	Divergenzwinkel (Grundmode)
θ_f	°	Divergenzwinkel des fokussierten Laserstrahls
R	-	Reflexionsgrad
r	mm	Radialer Abstand der Orte konstanter Intensität
ρ	g/cm ³	Dichte
T	-	Transmissionsgrad
T	K	Temperatur
T_s	K	Schmelztemperatur
t	s	Zeit
t	mm	Einschweißtiefe
t_0	mm	Einschweißtiefe bei $z = 0$ mm
t_{be}	mm	Tiefe der direkt bestrahlten Fläche bei einer Einschweißung
$V_{spez.}$	mm ³ /kJ	spezifisches Schmelzvolumen
v	m/min	Vorschubgeschwindigkeit
v_D	m/min	Bohrgeschwindigkeit
v_E	m/min	Eindringgeschwindigkeit
w	mm	Strahlradius
w_0	mm	Strahlradius im Fokus (Grundmode)
w_f	mm	Strahlradius des fokussierten Laserstrahls
ω	m ³ /J	werkstoffabhängige Konstante
x	mm	Ortskoordinate
Y	-	normierte Geschwindigkeit
y	mm	Ortskoordinate
z	mm	Ortskoordinate
z	mm	Strahlausbreitungsrichtung
z	mm	Fokuslage
z_{Kap}	mm	Tiefe der Dampfkapillare
z_{Rf}	mm	Rayleighlänge

Extended Abstract

In the past years lasers have evolved to important tools for industrial manufacturing technologies. High processing speed and good welding quality, low heat load as well as very high flexibility are the most important advantages of laser welding. Thereby the decision for the used laser system arises from the particular application range. The determining reason for solid state lasers in comparison with CO₂-lasers is their short wavelength: the beam can be transported via optical fibers, which allows high flexibility and accessibility as well as lower costs for the handling device. In addition, the shorter wavelength of YAG-lasers in comparison with CO₂-lasers brings along advantages for the process such as higher absorptivity in metals and lower sensitivity to laser induced plasma.

Regarding these aspects and driven by market and customer requirements, latest developments are aimed at expanding the above mentioned advantages of solid state lasers. Lasers of this recent generation are the diode-pumped thin disk laser and the fiber laser as well. Both concepts lead to higher efficiency and higher focusability at the same time. Focusability is understood as the ability to achieve a small focus diameter with a given optical element. It is defined by the inverse beam parameter product (BPP). The advantages of stronger focusability can be used for an expansion of the application range; for example it allows a significant reduction of the focus diameter by using the same focal length. Other system benefits from enhanced focusability are the reduced optic dimensions or the longer focal distance at same focus diameters.

Until now only the last mentioned benefit is used in large scale in particular for remote welding even for industrial applications. Thereby the possibilities which are given by reducing the focus diameter are less considered. However, they become more important concerning an increase of the required welding depth for example at power train manufacturing. A great potential to produce weld seams with unprecedented high aspect ratio was revealed. Under these conditions the divergence angle of the laser beam plays a role on the achievable welding depth as well. Therefore it is especially the profound process understanding which is the prerequisite for a successful and economic use of lasers with strong focusability in industrial production engineering. At the same time the welding quality should be kept clearly in mind because it defines both strength of the weld seam and surface property regarding technical functionality. The main aim of this work is to bring out the resulting potential to produce weld seams

with high aspect ratios at improved welding quality for an enlarged process understanding in order to extend existing or to open up new application ranges.

Generally, in case of low welding speed, the welding depth shows a clear dependence on the laser power. But at high enough welding speed ($v \geq 6$ m/min) the curves of welding depth are well correlated by the beam parameter ratio (BPR), defined as laser power P_L divided by the focus respectively spot diameter d_f . In this regime, the welding depth scales with the BPR which means that at $P_L = \text{const}$ the welding depth scales proportional to d_f^{-1} . In contrast to the above mentioned findings with CO_2 - and lamp pumped solid state lasers, welding experiments with the recent generation of the diode-pumped laser sources revealed characteristics not seen before: When the focus diameter on the workpiece was reduced, the achieved welding depth increased according to d_f^{-1} . This tendency, however, stops at low values of the focus diameter – in case of strong focusability below $200\text{ }\mu\text{m}$. Even more, the welding depth becomes lower when the focus diameter is further decreased. Detailed experiments in a laser power range of up to 6 kW proved that both, the focus diameter and in particular the divergence angle of the focussed beam are deciding for the resulting seam geometry. This behaviour is explained with the distribution of lines with constant power density. Therefore, with a further reduction of the beam parameter product (lower divergence angle at constant focus diameter) it is possible to obtain an increase of the welding depth. An unexpected result of these experiments is further the fact, that the reachable cross sectional area which has been observed for both laser systems remains constant regardless of the aspect ratio of the weld seam. That means that in the investigated parameter range the process efficiency of keyhole welding is in fact independent of the focusability of the used laser source.

Indeed, the knowledge of the essential influence of the divergence angle on the keyhole geometry and therewith on the achievable welding depth contributes to the profound process understanding. However, not only the formation of the resulting weld seam but also the associated welding quality is of great interest. Based on the previous results it is shown that the keyhole geometry itself can be directly manipulated by the divergence angle of the focussed laser beam due to stronger focusability. Even with small focus diameters a reduction of imperfections of the weld seam like process pores in aluminium can be determined. It is shown that a suitable process handling stabilises the keyhole and reduces the imperfections. Mechanisms which are influencing the welding process like that are for example a higher ablating rate or a more favourable shape of the keyhole. Because of that laser welding with strong focusability facilitates an improved welding quality. On the one hand, the reduction of the focus diameter

allows an increase of the welding speed (at constant welding depth) which leads to a stabilisation of the welding process due to a higher ablating rate. On the other hand, the divergence angle of the focussed beam in the range of focus diameters smaller than 200 μm plays an important role on the resulting shape of the keyhole and the porosity as well. As a result of these findings, the utilisation of small focus diameter and a lower divergence angle produces a more favourable keyhole geometry yielding better quality of the weld seam.

Not only process pores in aluminium but also a strong spatter formation in laser welding of steel impairs the quality of the weld seam. Melt pool ejections in form of spatter are resulting in an unsteady appearance of the weld seam. Therewith the strength of the seam volume will be reduced in such a way that the welding quality is not acceptable. As a result, a better understanding of the melt pool behaviour in deep penetration laser welding is necessary to improve the weld seam quality. It is known that the coupling between the keyhole and the melt pool is very complex. In the meantime it is well known that the sideways liquid displacement around the front keyhole wall is the main process for generating high velocities of the fluid that enters into the resulting melt pool. Therefore the keyhole instabilities can be associated with this irregular flow of molten material around the keyhole.

In order to understand the underlying processes, measurements of the front keyhole inclination supported by simplified calculations have been performed. It was observed that the achievable welding depth depending on welding speed, laser power and focus diameter affects the inclination of the front keyhole wall. At increased welding speed the inclination of the capillary becomes larger and the evaporation process perpendicular to the capillary front wall is very important. Therefore, the expanding metal vapour impinges at the rear keyhole wall and causes spatters. The ejection direction of the spatters can be directly correlated with the inclination of the front keyhole wall and the welding depth as well. Because the ejection direction of the spatters is not equal to the inclination of the keyhole an additional driving force in upward direction must be existent. Against this background it is possible to find methods for influencing the melt flow in a positive manner. It is shown that the spatter formation can be reduced by an increase of the inclination angle of the keyhole in forward direction (caused by an inclination of the laser beam) or by a variation of the focal position.

All together a good focusability respectively beam quality is important for the entire welding process. Thereby the reduction of the divergence angle of the focussed beam at spot diameters below 200 μm has a positive effect on this in particular. According to