

Wärme- und Schmelzeströme beim Fügen mittels Laser

von Dr.-Ing. Eveline Reinheimer
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. habil. Jean Pierre Bergmann

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

Bei Fragen zur Produktsicherheit wenden Sie sich bitte
an unsere Adresse: utzverlag GmbH ·
Herr Matthias Hoffmann · Nymphenburger Straße 91 ·
80636 München · Telefon: 0049-89-27779100 oder
www.utzverlag.de

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2025

D DE 93

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

Copyright © utzverlag GmbH 2025

ISBN (Print) 978-3-8316-5087-3
ISBN (E-Book) 978-3-8319-7828-10

Printed in Germany

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

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Liste der verwendeten Symbole und Abkürzungen	5
Kurzfassung	11
Extended Abstract	14
1 Einleitung	16
2 Stand der Technik	18
2.1 Laserstrahlschweißen	18
2.2 Punktschweißung	22
2.2.1 <i>Industrielle Anwendung und daraus resultierender Forschungsbedarf</i>	24
2.3 Schweißen mit hoher Vorschubgeschwindigkeit	29
2.3.1 <i>Dampfkapillare</i>	30
2.3.2 <i>Strömung im Schmelzbad</i>	32
2.3.3 <i>Nahtdefekte beim Schweißen mit hohen Vorschüben</i>	35
2.3.4 <i>Industrielle Anwendung und daraus resultierender Forschungsbedarf</i>	36
2.4 Fazit aus dem Stand der Technik	39
3 Fügen von Komponenten der Leistungselektronik auf Leiterplatten	41
3.1 Bestimmung der zeit- und temperaturabhängigen Zerstörschwelle von FR4-Harz	41
3.2 Einordnung der Ergebnisse	57
4 Einfluss der Prozessparameter auf die Prozessgrenze beim Schweißen mit hohen Vorschüben	59
4.1 Untersuchung zur Prozessgrenze durch Randkerben beim Schweißen mit hohen Vorschüben	59
4.2 Einordnung der Ergebnisse	71
5 Kapillargeometrie und Strömungen im Schmelzbad beim Schweißen mit hohen Vorschüben	72

5.1 Bestimmung der superkritischen Strömungsbedingungen im Schmelzbad und deren Einfluss auf die Kapillargeometrie beim Schweißen mit hohen Vorschüben	72
5.2 Einordnung der Ergebnisse	98
6 Zusammenfassung und Ausblick	99
7 Literatur	101
8 Danksagung	119

Liste der verwendeten Symbole und Abkürzungen

Symbol	Bedeutung	Einheit
$3D$	Dreidimensional	—
α, β	Anstellwinkel der Optiken	$^\circ$
α_f	Volumenanteil schmelzflüssigen Materials	%
ρ	Dichte	$kg \cdot m^{-3}$
λ	Wellenlänge	μm
λ_{cu}	Wärmeleitfähigkeit von Kupfer	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
λ_{RF4}	Wärmeleitfähigkeit von FR4- Epoxidharz	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
λ_L	Wellenlänge des Laserstrahls	μm
λ_{th}	Wärmeleitfähigkeit	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
η_E	Wärmewirkungsgrad	%
κ	Temperaturleitfähigkeit	$m^2 \cdot s^{-1}$
A	Absorptionsgrad	1 oder %
AW-6082	Aluminiumlegierung	-
$A_c(x)$	Querschnittsfläche der Kapillare an der Position x	mm^2
$A_{ch}(x)$	Querschnittsfläche des schmelzflüssigen Kanals um die Kapillare an der Position x	mm^2

A_s	Querschnittsfläche des Schmelzebades	mm^2
b	Breite des Schmelzebades an der Oberfläche	mm
C	Benetzter Umfang des Schmelzebades	mm
c	Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle	$m \cdot s^{-1}$
c_p	Spezifische Wärmekapazität	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$c_{p,Cu}$	Spezifische Wärmekapazität von Kupfer	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
d_B	Strahldurchmesser	μm
d_c	Durchmesser des Faserkerns	μm
d_f	Fokusdurchmesser	μm
F	Bestrahlte Fläche auf der Oberfläche des Werkstückes	mm^2
Fr	Froude-Zahl	-
Fr_c	Froude-Zahl mit der charakteristischen Tiefe y_c	-
Fr_s	Froude-Zahl mit der charakteristischen Tiefe y_s	-
FR4	Klasse von Leiterplattenbasismaterial aus Epoxidharz-Glasgewebe-Verbundwerkstoff	-
F_q	Querschnittsfläche (Einschweißtiefe · Strahldurchmesser)	mm^2
f_f	Brennweite der Fokussierlinse	mm
g	Erdbeschleunigung	$m \cdot s^{-2}$
h_{cu}	Latente Wärme des Schmelzvorgangs in Kupfer	$J \cdot kg^{-1}$
h_s	Latente Wärme des Schmelzvorgangs	$J \cdot kg^{-1}$
h_V	Latente Wärme des Verdampfungsvorgangs	$J \cdot kg^{-1}$

I	Intensität	$W \cdot m^{-2}$
IR	infrarot	-
J	Bestrahlungsstärke	$W \cdot m^{-2}$
J_A	Absorbierte Bestrahlungsstärke	$W \cdot m^{-2}$
l_c	Länge der Kapillare in Vorschubrichtung	m
l_{diff}	Thermische Diffusionslänge	$m^2 \cdot s^{-1}$
\dot{m}	Masse je Zeiteinheit	$kg \cdot s^{-1}$
p	Druck	$mbar$
p_V	Rückstoßdruck durch Verdampfung	$mbar$
P	Leistung des Laserstrahls	W
P_A	Im Absorptionsvorgang freigesetzte Wärmeleistung	W
P_E	Benötigte Leistung zum Erwärmen auf Nutztemperatur	W
P_{Puls}	Pulsleistung	W
$P_{Threshold}$	Leistungsschwelle	W
$P_{Threshold}(t_{pulse})$	Pulsdauerabhängige Leistungsschwelle	W
P_V	Verlustleistung	W
PCB	Printed Circuit Board, Leiterplatte	-
Q	Querschnittsfläche	-
R	Verhältnis der Leistung zum Querschnitt einer Schweißung	$W \cdot m^{-2}$
r	Radius	mm

s	Einschweißtiefe	mm
s_c	Tiefe der Kapillare	mm
SPP	Strahlparameterprodukt	-
S235	Stahllegierung	-
T	Temperatur	K
T_s	Schmelztemperatur	K
$T_{s,Cu}$	Schmelztemperatur von Kupfer	K
T_N	Nutztemperatur	K
$T_{melt,Cu}$	Schmelztemperatur von Kupfer	K
T_{Int}	Temperatur am Übergang zwischen der Kupferschicht und Epoxidharz	K
$T_{Int_max}(\tau)$	Bestrahldauerabhängige Temperatur am Übergang zwischen Kupfer und Epoxidharz	K
$T_{Int_max}(\tau)$	Bestrahldauerabhängige Schädigungstemperatur am Übergang zwischen Kupfer und Epoxidharz	K
T_{melt}	Schmelztemperatur	K
T_P	Prozesstemperatur	K
T_S	Erstarrungstemperatur	K
T_{Surf}	Temperatur der Oberfläche	K
T_{Surf_max}	Maximale Temperatur der Oberfläche	K
T_{TD}	Zeitdauer bis zur Delamination einer Leiterplatte bei 260°C	min
t	Zeit	s

t_{puls}	Pulslänge	s
t_{heat}	Bestrahlungsdauer	s
$t_{poc,max}$	Maximale Prozessdauer ohne Schädigung	s
τ	Zeitdauer, in welcher erhöhte Temperaturen vorliegen	s
u	Strömungsgeschwindigkeit der Schmelze	$m \cdot s^{-1}$
$\bar{u}(x)$	Über den Strömungsquerschnitt gemittelte Strömungsgeschwindigkeit der Schmelze an einer Position x	$m \cdot s^{-1}$
u_{max}	Maximale Schmelzegeschwindigkeit	$m \cdot s^{-1}$
\bar{u}_{max}	Maximale mittlere Schmelzegeschwindigkeit entlang der Kapillare	$m \cdot s^{-1}$
v	Vorschub, Schweißgeschwindigkeit	$m \cdot s^{-1}$
$v_{undercut}$	Vorschub ab welchem Randkerben auftreten	$m \cdot s^{-1}$
\dot{V}	Nahtvolumen je Zeiteinheit	$m^3 \cdot s^{-1}$
WEZ	Wärmeeinflusszone	-
x, y, z	Stationäres Koordinatensystem	-
y_l	Charakteristische Tiefe	mm
y_c	Charakteristische Tiefe definiert über den Quotient Querschnitt durch benetzten Umfang	mm
y_s	Charakteristische Tiefe definiert über Differenz von Einschweißtiefe und Kapillartiefe	mm
z_f	Fokusposition	mm
z_R	Rayleighlänge	mm

Kurzfassung

Die Bestrebungen der Bundesregierung, die Energieversorgung nachhaltiger zu gestalten, sind durch das Klimaschutzsofortprogramm 2022 deutlich geworden. Ziel des Programms ist es, die Treibhausgase bis zum Jahre 2030 deutlich zu reduzieren. Der Verkehrssektor spielt bei der Reduzierung der Treibhausgase eine große Rolle. Eine Schlüsselrolle bei der Erreichung des Ziels zur Reduzierung der Treibhausgasemission im Verkehrssektor liegt in der Umstellung auf elektrische Antriebe mit Energieträgern wie Batterien und Brennstoffzellen. Bei der Speichersystemherstellung und -montage für die zukünftigen Antriebe gibt es einen Bedarf an fügetechnischem Know-How, das bisher im Fahrzeugbau nur eine untergeordnete Rolle spielte. Dieses reicht von Mikroschweißungen bei der Kontaktierung der Batterien oder dem Fügen von Leistungselektronik auf Leiterplatten bis hin zu langen Schweißnähten, wie sie bei Brennstoffzellen und Wärmetauschern benötigt werden. Diese Fügeaufgaben haben gemein, dass die Schädigung umliegender Bauteile oder Werkstoffe durch die aus der Fügestelle abfließende Wärme vermieden werden muss, unabhängig davon, ob der Fügeprozess ohne Vorschub oder mit hohen Vorschüben ($v > 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) durchgeführt wird. Höchste Vorschübe sind zudem durch das Auftreten von Nahtdefekten wie Randkerben und Humping begrenzt.

Ein Ziel dieser Arbeit war deshalb die Vermeidung von Schädigungen, die sich bei Schweißungen ohne Vorschub (Punktschweißungen) aus Wärme ergeben, die aus der Fügezone in das umliegende Bauteil abfließt. Ein weiteres Ziel war das Vermeiden von Schädigungen durch Nahtdefekte wie Randkerben, welche sich bei Schweißungen mit hohen Vorschüben ergeben.

Bei Schweißungen ohne Vorschub, wie diese beim Schweißen von Komponenten der Leistungselektronik auf Leiterplatten vorkommen, wurde in der Arbeit eine Methode entwickelt, um die dauerabhängige Schädigungsschwelle bei erhöhten Temperaturen einer Epoxidharz-basierten Leiterplatte zu bestimmen. Damit war es möglich, ein Prozessfenster für nahezu defektfreie Schweißungen auf einer Epoxidharz-basierten Leiterplatte zu ermitteln. Das ermittelte Prozessfenster wurde anhand von Schweißungen einer Komponente der Leistungselektronik mit einem 500 μm dicken Kupferbein

auf eine 50 µm bzw. 35 µm dicke Kupfermetallisierung einer Epoxidharz-basierten Leiterplatte verifiziert. Da bei einer Punktschweißung der Anbindungsquerschnitt sehr klein ist, kann eine solche jedoch den Lötprozess nicht einfach direkt ersetzen. Es müssen dabei Strategien zum Erhöhen des Anbindungsquerschnitts angewandt werden, wie zum Beispiel das Schweißen mehrerer Punkte.

Um eine Schädigung angrenzender Komponenten durch abfließende Prozesswärme bei einem Schweißprozess mit Vorschub zu vermeiden, sind hohe Vorschubgeschwindigkeiten erforderlich. Der Einsatz von hohen Vorschüben ist zudem für eine wirtschaftliche Produktion unerlässlich. Mit der zunehmenden Verfügbarkeit von Laserstrahlquellen mit Leistung im Multikilowattbereich werden hohe Vorschübe vermehrt eingesetzt. Jedoch wird der maximal mögliche Vorschub durch das Auftreten von Nahtdefekten wie Randkerben und Humping begrenzt.

In der Literatur wurde den beim Laserstrahlschweißen auftretenden Randkerben bisher wenig Aufmerksamkeit geschenkt. In anderen Schweißverfahren wie dem Lichtbogenschweißen ist das Phänomen der Randkerben durchaus bekannt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde der Einfluss der Prozessparameter auf die Entstehung von Randkerben beim Laserstrahlschweißen eingehend untersucht. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass Randkerben bei geringeren Vorschüben auftreten als Humping und somit die eigentliche Limitierung für eine defektfreie Schweißnaht darstellen.

Mit entsprechenden Untersuchungen ist es gelungen, eine Korrelation zwischen der Geometrie der Dampfkapillare, den Strömungsverhältnissen der Schmelze und damit mit dem Entstehen von Randkerben herzustellen. Um den Einfluss der Strömung bei hohen Vorschüben auf die Geometrie der Kapillare und auf das Entstehen von Randkerben zu untersuchen, wurde eine Methode erarbeitet, welche die Umströmung einer Kapillare charakterisiert. Hierfür wurden in-situ-Röntgenuntersuchungen, 3D-Rekonstruktionen der Kapillare und Schritte verwendet, um die Strömungsgeschwindigkeit entlang der Kapillare zu ermitteln. Die so ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten dienten als Grundlage zur Charakterisierung der Strömung mithilfe der Froude-Zahl. Die Ergebnisse zeigen, dass bei einer keilförmigen Kapillare überwiegend superkritische Strömungsbedingungen vorliegen. Diese superkritischen Strömungsverhältnisse formen die Rückwand der keilförmigen Kapillare bei hohen Vorschüben und korrelieren mit dem Auftreten von Randkerben. Weiterhin konnte nachgewiesen werden, dass durch Strahlformung die Froude-Zahl der Strömung um die Kapillare beeinflusst werden kann. Durch diese gezielte Beeinflussung konnte die Vorschubgeschwindigkeit, bei welcher Randkerben in Zusammenhang mit einer keilförmigen Kapillare auftreten, erhöht werden. Mit diesem Wissen und neuen verfügbaren Laserquellen, welche mit kohärenter

Strahlformung in rascher Abfolge sehr unterschiedliche Strahlformen erzeugen können, kann in Zukunft die Froude-Zahl der Strömung um die Kapillare gezielt beeinflusst werden. Dadurch kann die Entstehung von Nahtdefekten wie Randkerben und Humping zu höheren Vorschüben verschoben und das Prozessfenster vergrößert werden. Die gewonnenen Erkenntnisse der Arbeit tragen daher wesentlich zu einer gesteigerten Wirtschaftlichkeit der Produktion bei.

Extended Abstract

The efforts of the German government to make the energy supply more sustainable have become evident through the Climate-Protection-Immediate-Program 2022. The transportation sector plays a significant role in reducing greenhouse gas emissions. A key factor in achieving the goal of reducing greenhouse gas emissions lies in the transition to electrical drives with energy storages such as batteries and fuel cells. The manufacturing of storage systems for climate-friendly drives requires expertise in joining technology, which has only played a minor role in vehicle construction until now. The corresponding tasks comprise micro-welding for battery contacting, joining components of power electronics on circuit boards, and long weld seams needed for fuel cells and heat exchangers. These joining tasks have in common the need to avoid damage to surrounding components or materials by the heat flowing out of the joining zone, regardless of whether the joining process is performed without a feed (spot welding) or with high welding speeds ($v > 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$).

One goal of this work was therefore to avoid damages resulting from the heat flowing from the joining zone into the surrounding component when welding without a feed. Another goal was to prevent damages caused by seam defects such as undercuts in welds with high feed rates.

In welds without a feed (spot welds), such as those of the spot welding of power electronics components on circuit boards, a method was developed in this work to determine the duration-dependent damage threshold of an epoxy resin-based circuit board at elevated temperatures. This made it possible to define a process window for welding on an epoxy resin-based circuit board. In practice, it was shown that it is possible to weld a 500 μm thick copper leg of an electronic component onto a 50 μm or 35 μm thick copper layer on an epoxy resin-based circuit board. However, since the spot weld significantly reduces the attachment cross-section compared to soldering, such spot welding cannot simply replace the soldering process. Strategies such as welding multiple points to increase the joining cross-section and the tensile strength of the weld must be applied.

High welding speeds are required to prevent damage to surrounding components due to process heat escaping the interaction zone during the welding process. The use of high welding speeds is also essential for an economical production. With the increasing availability of high-performance lasers and their increasing power, high welding speeds are

increasingly used. However, the maximum possible welding speed is limited by the occurrence of seam defects such as undercuts and humping.

While little attention was paid in the past to undercuts in laser welding, in other welding processes, such as arc welding, undercuts are a well-known phenomenon. In the framework of the present work, the influence of process parameters on the formation of undercuts in laser welding was thoroughly investigated. It was demonstrated that undercuts occur at lower welding speeds than humping and thus represent the actual limit for a defect-free weld with high feed rates.

The correlation between the geometry of the capillary, the flow conditions, and the formation of undercuts was determined with dedicated investigations. To examine the influence of the melt flow on the geometry of the capillary and the occurrence of undercuts, a method was elaborated to characterize the flow around a capillary. X-ray examinations, 3D reconstructions of the capillary, and cross-sections of the weld seam were used to determine the flow velocity of the melt along the capillary. The flow velocities thus determined served as a basis for characterizing the flow using the Froude number. The results showed that a wedge-shaped capillary is associated with supercritical flow conditions. These supercritical flow conditions shape the rear wall of the wedge-shaped capillary at high welding speeds and correlate with the occurrence of undercuts. Furthermore, it was demonstrated that the Froude number of the melt flow around the capillary can be influenced by beam shaping. This targeted influencing made it possible to increase the feed rate at which undercuts occur.

With this knowledge, the Froude number of the flow around the capillary can specifically be influenced in future using new laser systems that can generate very different beam shapes in rapid succession by coherent beam shaping. Additionally, the occurrence of seam defects such as undercuts and humping can thus be shifted to higher feed rates. The knowledge gained from this work therefore makes a significant contribution to increase the production efficiency.

1 Einleitung

Die Bestrebung der Bundesregierung, die Energieversorgung nachhaltiger zu gestalten, sind mit dem Klimaschutzsofortprogramm 2022 sehr deutlich geworden. Um diese Ziele zu erreichen, wurde das deutsche Treibhausgasminderungsziel für das Jahr 2030 auf eine Reduzierung um 65 Prozent im Vergleich zu 1990 erhöht [1]. Innerhalb dieser Ambitionen spielt der Verkehrssektor eine entscheidende Rolle, da er nahezu 30 Prozent des nationalen Endenergieverbrauchs und 20 % aller Treibhausgasemissionen ausmacht [2]. Eine Schlüsselrolle bei der Erreichung dieser Ziele liegt in der Umstellung auf elektrische Antriebe mit Energieträgern wie Batterien und Brennstoffzellen [3]. Die Prozesszuverlässigkeit und die wirtschaftliche Produktion von Batterien und Brennstoffzellen sind von entscheidender Bedeutung, insbesondere für eine Fertigung in Deutschland, wo die Arbeitskosten etwa das Sechsfache von jenen in asiatischen Ländern wie China betragen [4]. Es wird erwartet, dass bis zum Jahr 2030 in Deutschland bis zu 10 Millionen [2] und weltweit etwa 150 Millionen Elektrofahrzeuge zugelassen sein werden [5], was einem Bedarf von etwa 1,95 Milliarden Batteriezellen bis 2030 entspricht. Mit den zunehmenden Bestrebungen nach einem klimaneutralen Antrieb gibt es in der Speicher-systemherstellung und -montage Bedarf an fügetechnischem Know-How, das bisher im Fahrzeugbau nur eine untergeordnete Rolle gespielt hat [6]. Zudem hat sich die Verbindungs-technik in den letzten Jahren revolutioniert. Die Art und Weise, wie Komponenten aus verschiedenen Materialien konstruiert und montiert werden, hat sich weiterentwickelt. Dazu gehören auch neue Fügeaufgaben zur Fertigung von E-Motoren, Speicher-systemen und Stromleitsystemen [7, 8]. Dabei steigen nicht nur die Anforderungen an die Elektronikkomponenten, sondern auch die Anforderungen an die Fügeverbindungen. So fordert zum Beispiel das schnelle Laden von Batteriesystemen sehr hohe Strom-dichten ($> 100 \text{ A}$), was wiederum zu größeren geforderten Anbinde-Querschnitten der Fügeverbindungen führt [9]. Weiter sind die Fügestellen von temperatursensiblen Komponenten umgeben, wie beispielsweise beim Kontaktieren von Batterien. Gleichzeitig steigen die wirtschaftlichen Anforderungen an die Fügeprozesse, wodurch das Fügen mit höchster Effizienz gefordert wird.

Der Einsatz von Lasern zur Materialbearbeitung hat in den letzten Jahrzehnten erhebliche Fortschritte gemacht. Neue verfügbare Hochleistungslaserquellen, online Prozess-überwachung sowie Nachhaltigkeits- und Umweltaspekte [10] tragen dazu bei, dass der Laser in der Fügetechnologie eine tragende Rolle innehat und für viele Fügeaufgaben das Werkzeug der Wahl ist. Vor allem der Vorteil einer kleinen Wärmeeinflusszone

macht den Laser zu einem beliebten Werkzeug. Der Laser kann dabei vielfältig eingesetzt werden. Über das Laserweich- [11, 12] und Hartlöten [13], das Laserboden [14, 15] und Schweißen reichen die Einsatzgebiete von Mikrofügestellen in der Elektronik bis hin zu Makrofügeaufgaben von Batteriegehäusen.

Dabei sticht das Laserstrahlschweißen als ein Verfahren hervor, welches durch die Verfügbarkeit von neuen Laserstrahlquellen stetig weiter entwickelt wurde und dadurch seit der ersten Maschine zum Laserstrahlschweißen in den 1970-er Jahren [16] auf dem Weltmarkt rasch an Bedeutung gewann. Diese Weiterentwicklung trägt dazu bei, dass das Laserstrahlschweißen in der Industrie von der Automobilwirtschaft über Luft- und Raumfahrt bis hin zur Elektronik ein wichtiger Fügeprozess ist. Das Laserstrahlschweißen bietet zahlreiche Vorteile, wie die einer flexiblen Fertigung [17], einer Regelung des Prozesses aufgrund von OCT-Messungen [18] oder Prozessemissionsmessungen [19] sowie eine hohe Qualität der Fügestelle, hohe Schweißgeschwindigkeiten [20], geringe Wärmeeinflusszonen und die Möglichkeit, verschiedene Materialien wie Metalle [21], Kunststoffe [22] [23] und Keramiken [24], aber auch artfremde Materialkombinationen wie zum Beispiel Aluminium mit Kupfer [25] stoffschlüssig zu verbinden. Für eine effiziente und wirtschaftliche Produktion ist ein zuverlässiger Prozess mit einer reproduzierbaren Temperatur unterhalb der Schädigungsschwelle der zu fügenden und der umliegenden Komponenten nahe der Prozessgrenzen unerlässlich. Um diesen Herausforderungen zu begegnen und Schweißverbindungen mit hoher Qualität bei höchster Effizienz zu ermöglichen, ist ein fundiertes Prozessverständnis über den Laserstrahlschweißprozess, die Prozessgrenzen und die Einflussgrößen auf die Prozessgrenzen erforderlich.

Die Vorschubgeschwindigkeit v bestimmt dabei wesentlich, wie der Schweißprozess durch Wärmeleitung und die Hydrodynamik im Schmelzebad geprägt wird. Wird ohne Vorschub geschweißt, dominiert die Wärmeleitung die Ausprägung der Fügeverbindung. Wird hingegen mit höchsten Vorschüben geschweißt, dominiert die Hydrodynamik im Schmelzebad die Qualität der resultierenden Fügeverbindung und definiert somit die Prozessgrenzen. Die vorliegende Arbeit befasst sich daher mit den beiden Grenzfällen: Schweißen ohne Vorschub (Punktschweißung) und Schweißen mit höchstem Vorschub.

In diesem Kontext ist das Hauptziel dieser Arbeit die Identifizierung der Prozessgrenzen beim Laserstrahlschweißen ohne Vorschub und mit hohem Vorschub. Es soll ein grundlegendes Verständnis für die Einflussfaktoren und Wirkzusammenhänge entwickelt werden, die den Schweißprozess beeinflussen, um die Prozessgrenzen bei den beiden Fällen definieren und erweitern zu können.

2 Stand der Technik

In diesem Kapitel wird nach einer kurzen Einführung in das Laserstrahlschweißen der Stand der Technik für die beiden Fälle, Schweißen ohne Vorschub (Punktschweißung) und das Laserstrahlschweißen mit höchstem Vorschub, beschrieben. Dabei wird aufgezeigt, wie die Leistungseinbringung in die Fügezone erfolgt und durch Wärme- und Schmelzeströme in der Fügezone verteilt wird. Daraus wird der Forschungsbedarf für Schweißungen ohne Vorschub und mit hohem Vorschub abgeleitet. Die daraus abgeleiteten Untersuchungen werden in den Kapiteln 3 bis 5 ausführlich behandelt.

In der vorliegenden Arbeit liegt der Fokus auf Aluminium-, Kupfer- und Stahllegierungen, da diese Werkstoffe in der Fügetechnik von größter Bedeutung sind.

2.1 Laserstrahlschweißen

Der Laser ist das einzige Werkzeug, welches in jeder der 6 Hauptgruppen der DIN8580 mindestens ein Fertigungsverfahren ermöglicht. Am häufigsten wird der Laser in den beiden Fertigungsgruppen „Trennen“ und „Fügen“ eingesetzt. Der wichtigste Prozess der Hauptgruppe Fügen ist derzeit das Schweißen. Der Fügeprozess Schweißen führt zu einer stoffschlüssigen Verbindung zwischen den beiden Fügepartnern.

Beim Schweißen muss die Temperatur in der Füge-Zone oberhalb der Schmelztemperatur der zu fügenden Werkstoffen liegen. Beim Laserstrahlschweißen wird die zum Aufschmelzen der Grundwerkstoffe nötige Energie durch den Laserstrahl eingebracht [26]. Die Absorption der Laserstrahlung führt zur Erwärmung in der Schweißzone [27]. Die Interaktion zwischen dem Laserstrahl und dem Grundwerkstoff hängt von den Eigenschaften des Laserstrahls und den chemischen Eigenschaften des zu fügenden Grundwerkstoffes ab.

Wichtige Parameter des Laserstrahls sind hierbei die Wellenlänge λ_L , die längenbezogene Laserleistung auf den Strahldurchmesser $\frac{P}{d_B}$, wo P die eingestrahlte Laserleistung und d_B der Strahldurchmesser ist, die Polarisation, die Intensitätsverteilung, der Anstell-

winkel α und die Verweilzeit t_{heat} , welche angibt, wie lange eine Flächeneinheit bestrahlt wird. Die Eigenschaften des Grundwerkstoffes werden durch die chemische Zusammensetzung und der Mikrostruktur des Gefüges beeinflusst [28].

Für das Laserstrahlschweißen von Metallen werden aktuell hauptsächlich Laser im infraroten (IR) Spektralbereich mit Wellenlängen um $\lambda_L = 1 \mu\text{m}$ eingesetzt. Dies hat vor allem wirtschaftliche Gründe. Diese Laser sind bis in den hohen Kilowatt-Bereich verhältnismäßig kostengünstig verfügbar und bieten eine hohe Strahlqualität mit einem Strahlparameterprodukt SPP zwischen $2 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ (typisch für Faserlaser) und $10 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ (typisch für Scheibenlaser). Weiter können Laserstrahlen mit Wellenlängen um $1 \mu\text{m}$ über Glasfaser transportiert werden, was vor allem für die Automatisierung von Laserprozessen von Vorteil ist. Laserstrahlen mit Wellenlängen im sichtbaren Bereich, wie zum Beispiel grüne und blaue Laserstrahlen sind bei hohen mittleren Leistungen $> 2 \text{ kW}$ zum einen typischerweise nur mit wesentlich schlechteren Strahlqualitäten (SPP $> 30 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$) und zum anderen aktuell nur im niedrigen kW -Bereich bis maximal 4 kW bei wesentlich höheren Kosten pro kW Laserleistung industriell verfügbar.

Wenn der Laserstrahl mit dem Strahldurchmesser d_B auf einem Werkstück positioniert wird und die während der Bestrahlungsdauer durch Absorption der Strahlung eingebrachte Energiemenge, die zum Aufschmelzen des Werkstoffs erforderliche Energiemenge übersteigt, werden zunächst die Voraussetzungen für das Wärmeleitungsschweißen erfüllt. Beim Wärmeleitungsschweißen erfolgt die Absorption des Laserstrahls nur an der Oberfläche des erzeugten Schmelzebades und der Absorptionsgrad wird durch den zu fügenden Werkstoff, den Einfallswinkel und die Wellenlänge des eingesetzten Lasers bestimmt. Die geometrischen Maße des Schmelzebades ergeben sich durch die Wärmeleitung in das Werkstück, welche im Wesentlichen konduktiv erfolgt. Die Außenkontur des Schmelzebades wird maßgeblich durch die Bestrahltdauer t_{heat} , die längenbezogene Leistung $\frac{P}{d_B}$ und die Temperaturleitfähigkeit $\kappa = \frac{\lambda_{th}}{\rho \cdot c_p}$ des Materials beeinflusst, wobei λ_{th} die Wärmeleitfähigkeit, ρ die Dichte und c_p die spezifische Wärmekapazität des verwendeten Werkstoffes sind. Durch bestimmte Schutzgase kann die Marangonistömung genutzt werden, um die Ausprägung des Schmelzebades mit einem konvektiven Anteil zu beeinflussen [29].

Wird die längenbezogene Leistung $\frac{P}{d_B}$, mit der Leistung P des Laserstrahls erhöht, um die Verdampfungstemperatur im Bereich der bestrahlten Oberfläche zu erreichen, drückt der Rückstoßdruck des verdampfenden Materials eine Mulde in die Oberfläche

der Schmelze. Bei weiterer Erhöhung der Bestrahlungsstärke verstärkt sich dieser Effekt, bis die Mulde so tief ist, dass die am Material reflektierte Laserstrahlung ein zweites Mal innerhalb der Wechselwirkungszone auftritt. Dadurch steigt der Einkoppelgrad sprunghaft an, und der Bereich des Tiefschweißens wird erreicht [26]. Im Bereich des Tiefschweißens können Nahttiefen erzielt werden, die dem bis zu zehnfachen der Nahtbreite entsprechen [30].

Beim Tiefschweißen wird die Laserstrahlung durch Mehrfachreflexion in der Dampfkapillare über die gesamte Tiefe der Dampfkapillare absorbiert, wodurch ein wesentlich höherer Einkoppelgrad im Werkstück erreicht wird [31] [32] [33]. Die Ausprägung einer Dampfkapillare hat zur Folge, dass der konvektive Energie- und Massentransport in der um die Kapillare strömenden Schmelze eine wesentlich größere Rolle einnimmt als beim Wärmeleitungsschweißen. Zudem sind bei zunehmender Vorschubgeschwindigkeit die Energieverluste durch Wärmeleitung deutlich geringer als beim Wärmeleitungsschweißen [34]. Die bessere Energienutzung beim Tiefschweißen hat einen wesentlich höheren Prozesswirkungsgrad zur Folge und ist zudem ein wesentlicher Vorteil gegenüber anderen Schweißverfahren wie dem Lichtbogenschweißen und dem Autogen-schweißen. Ein weiterer Vorteil des Laserstrahl-tiefschweißens gegenüber dem Elektro-nenstrahlschweißen ist, dass für das Laserstrahlschweißen kein Vakuum benötigt wird [35].

Eine wesentliche Einflussgröße auf den Laserstrahlschweißprozess ist dabei die Vorschubgeschwindigkeit v [36]. Die Vorschubgeschwindigkeit beeinflusst dabei maßgeblich den Wärme- und Schmelzefluss während der Schweißung. Bei Wärmeleitungsschweißungen mit geringer Vorschubgeschwindigkeit beziehungsweise im Extremfall ohne Vorschub, wird die geometrische Ausprägung des Schmelzebades vorrangig durch den konduktiven Anteil des Wärmetransports bestimmt. Dabei kann aus der Prozesszone abfließende Wärme umliegende Werkstoffe schädigen.

Bei Laserstrahl-tiefschweißungen mit steigender Vorschubgeschwindigkeit steigt der Einfluss der Hydrodynamik im Schmelzebad. Die Geometrie des Schmelzebades wird bei steigenden Vorschubgeschwindigkeiten vor der Dampfkapillare gestaucht und hinter der Dampfkapillare gestreckt. Steigende Vorschubgeschwindigkeiten führen zu einer Erhöhung des statischen Drucks vor der Kapillare [37] und der Einfluss der Hydrodynamik auf die Strömung im Schmelzebad nimmt zu. Der höchste Vorschub für eine qualitativ hochwertige Schweißnaht ist durch die Entstehung von Nahtdefekten wie Randkerben und Humping begrenzt, die in Verbindung mit hohen Schmelzströmungen gebracht werden [38] [39].

In den beiden Fällen, bei Wärmeleitungsschweißungen ohne Vorschub und bei Laserstrahlieforschweißungen mit höchsten Vorschubgeschwindigkeiten, begrenzen Wärme- und Schmelzeflüsse die Qualität der Fügeverbindung und werden deshalb in dieser Arbeit genauer betrachtet.

Eine schematische Skizze der Prozesszone einer Wärmeleitungsschweißung ohne Vorschub (Punktschweißung) (a) und einer Tiefschweißung mit hoher Vorschubgeschwindigkeit (b) ist in *Abbildung 2-1* in Anlehnung an [26] dargestellt.

Die Skizze verdeutlicht die unterschiedliche Ausprägung des Schmelzebades mit der Schmelzeströmung u und der resultierenden Schweißnaht mit der Einschweißtiefe s für die beiden Grenzfälle. Bei einer Wärmeleitungsschweißung (Punktschweißung) (a) weisen die Nahtquerschnitte typischerweise ein Verhältnis zwischen Tiefe und Breite von bis zu eins auf und werden durch den konduktiven Energietransport geprägt. Die Marangoni-Strömung kann genutzt werden, um die Ausprägung der Schweißnaht durch Strömungen zu beeinflussen [40]. Bei einer Wärmeleitschweißung wird ein aufgeschmolzenes Volumen erreicht, welches vom Strahldurchmesser d_B auf der Oberfläche des Werkstücks, der Bestrahlungsdauer t_{heat} und der Temperaturleitfähigkeit κ des verwendeten Materials abhängt. Im Gegensatz dazu wird bei einer Tiefschweißung (b) ein hohes Aspektverhältnis zwischen Tiefe und Breite der Naht erreicht. Der Querschnitt Q der Schweißnaht wird hier maßgeblich von den Strahleigenschaften, der Laserleistung, der Vorschubgeschwindigkeit v , sowie den Materialeigenschaften und der daraus resultierenden Dampfkapillare beeinflusst. Das pro Zeiteinheit erzeugte Nahtvolumen beträgt $\dot{V} = Q \cdot v$. Durch die Bewegung des Laserstrahls über das Werkstück wird vor der Dampfkapillare stetig neues Material aufgeschmolzen. Dieses strömt mit der Strömungsgeschwindigkeit u um die Kapillare im Schmelzebad nach hinten und erstarrt dort wieder. Der konvektive Anteil des Energietransports beeinflusst die Ausprägung der Schweißnaht beim Tiefschweißen weitaus mehr, als bei einer Wärmeleitschweißung.

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW von 1992 bis 1999 erschienen im Teubner Verlag, Stuttgart

Zoske, Uwe

Modell zur rechnerischen Simulation von Laserresonatoren und Strahlführungssystemen
1992, 186 Seiten, ISBN 3-519-06205-4

Gorri, Michael

Adaptive Optik und Sensorik im Strahlführungssystem von Laserbearbeitungsanlagen
1992, vergriffen, ISBN 3-519-06206-2

Mohr, Ursula

Geschwindigkeitsbestimmende Strahleigenschaften und Einkoppelmechanismen beim CO₂-Laserschneiden von Metallen
1993, 130 Seiten, ISBN 3-519-06207-0

Rudlaff, Thomas

Arbeiten zur Optimierung des Umwandlungshärterns mit Laserstrahlen
1993, 152 Seiten, ISBN 3-519-06208-9

Borik, Stefan

Einfluß optischer Komponenten auf die Strahlqualität von Hochleistungslasern
1993, 200 Seiten, ISBN 3-519-06209-7

Paul, Rüdiger

Optimierung von HF-Gasentladungen für schnell längsgeströmte CO₂-Laser
1994, 149 Seiten, ISBN 3-519-06210-0

Wahl, Roland

Robotergeführtes Laserstrahlschweißen mit Steuerung der Polarisationsrichtung
1994, 150 Seiten, ISBN 3-519-06211-9

Frederking, Klaus-Dieter

Laserlöten kleiner Kupferbauteile mit geregelter Lotdrahtzufuhr
1994, 139 Seiten, ISBN 3-519-06212-7

Grünwald, Karin M.

Modellierung der Energietransferprozesse in längsgeströmten CO₂-Lasern
1994, 158 Seiten, ISBN 3-519-06213-5

Shen, Jialin

Optimierung von Verfahren der Laseroberflächenbehandlung mit gleichzeitiger Pulverzufuhr
1994, 160 Seiten, ISBN 3-519-06214-3

Arnold, Johannes M.

Abtragen metallischer und keramischer Werkstoffe mit Excimerlasern
1994, 192 Seiten, ISBN 3-519-06215-1

Holzwarth, Achim

Ausbreitung und Dämpfung von Stoßwellen in Excimerlasern
1994, 153 Seiten, ISBN 3-519-06216-X

Dausinger, Friedrich

Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und Prozeßeffektivität
1995, 143 Seiten, ISBN 3-519-06217-8

Meiners, Eckhard

Abtragende Bearbeitung von Keramiken und Metallen mit gepulstem Nd:YAG-Laser als zweistufiger Prozeß
1995, 120 Seiten, ISBN 3-519-06222-4

Beck, Markus

Modellierung des Lasertiefschweißens
1996, 160 Seiten, ISBN 3-519-06218-6

Breining, Klaus

Auslegung und Vermessung von Gasentladungsstrecken für CO₂-Hochleistungslaser
1996, 131 Seiten, ISBN 3-519-06219-4

Griebsch, Jürgen

Grundlagenuntersuchungen zur Qualitätssicherung beim gepulsten Lasertiefschweißen
1996, 133 Seiten, ISBN 3-519-06220-8

Krepulat, Walter

Aerodynamische Fenster für industrielle Hochleistungslaser
1996, 144 Seiten, ISBN 3-519-06221-6

Xiao, Min

Vergleichende Untersuchungen zum Schneiden dünner Bleche mit CO₂- und Nd:YAG-Lasern
1996, 118 Seiten, ISBN 3-519-06223-2

Glumann, Christiane

Verbesserte Prozeßsicherheit und Qualität durch Strahlkombination beim Laserschweißen
1996, 143 Seiten, ISBN 3-519-06224-0

Gross, Herbert

Propagation höhermodiger Laserstrahlung und deren Wechselwirkung mit optischen Systemen
1996, 191 Seiten, ISBN 3-519-06225-9

Rapp, Jürgen

Laserschweißeignung von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Leichtbau
1996, 202 Seiten, ISBN 3-519-06226-7

Wittig, Klaus

Theoretische Methoden und experimentelle Verfahren zur Charakterisierung von Hochleistungs-laserstrahlung
1996, 198 Seiten, ISBN 3-519-06227-5

Grünenwald, Bernd

Verfahrensoptimierung und Schichtcharakterisierung beim einstufigen Cermet-Beschichten mit-tels CO₂-Hochleistungslaser
1996, 160 Seiten, ISBN 3-519-06229-1

Lee, Jae-Hoon

Laserverfahren zur strukturierten Metallisierung
1996, 154 Seiten, ISBN 3-519-06232-1

Albinus, Uwe N. W.

Metallisches Beschichten mittels PLD-Verfahren
1996, 144 Seiten, ISBN 3-519-06233-X

Wiedmaier, Matthias

Konstruktive und verfahrenstechnische Entwick-lungen zur Komplettbearbeitung in Drehzentren mit integrierten Laserverfahren
1997, 129 Seiten, ISBN 3-519-06228-3

Bloehs, Wolfgang

Laserstrahlhärten mit angepaßten Strahlfor-mungssystemen
1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06230-5

Bea, Martin

Adaptive Optik für die Materialbearbeitung mit CO₂-Laserstrahlung
1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06231-3

Stöhr, Michael

Beeinflussung der Lichtheission bei mikrokanal-gekühlten Laserdioden
1997, 147 Seiten, ISBN 3-519-06234-8

Plaß, Wilfried

Zerstörschwellen und Degradation von CO₂-Laseroptiken
1998, 158 Seiten, ISBN 3-519-06235-6

Schaller, Markus K. R.

Lasergestützte Abscheidung dünner Edelmetall-schichten zum Heißgaskorrosionsschutz für Mo-lybdän
1998, 163 Seiten, ISBN 3-519-06236-4

Hack, Rüdiger

System- und verfahrenstechnischer Vergleich von Nd:YAG- und CO₂-Lasern im Leistungsbereich bis 5 kW
1998, 165 Seiten, ISBN 3-519-06237-2

Krupka, René

Photothermische Charakterisierung optischer Komponenten für Hochleistungslaser
1998, 139 Seiten, ISBN 3-519-06238-0

Pfeiffer, Wolfgang

Fluidynamische und elektrophysikalisch opti-mierte Entladungsstrecken für CO₂-Hochleistungslaser
1998, 152 Seiten, ISBN 3-519-06239-9

Volz, Robert

Optimierte Beschichten von Gußeisen-, Alumi-nium- und Kupfergrundwerkstoffen mit Lasern
1998, 133 Seiten, ISBN 3-519-06240-2

Bartelt-Berger, Lars

Lasersystem aus kohärent gekoppelten Grund-mode-Diodenlasern
1999, 135 Seiten, ISBN 3-519-06241-0

Müller-Hummel, Peter

Entwicklung einer Inprozeßtemperaturmeßvor-richtung zur Optimierung der laserunterstützten Zerspanung
1999, 139 Seiten, ISBN 3-519-06242-9

Rohde, Hansjörg

Qualitätsbestimmende Prozeßparameter beim Einzelpulsohren mit einem Nd:YAG-Slablaser
1999, 171 Seiten, ISBN 3-519-06243-7

Huonker, Martin

Strahlführung in CO₂-Hochleistungslasersystemen zur Materialbearbei-tung
1999, 121 Seiten, ISBN 3-519-06244-5

Callies, Gert

Modellierung von qualitäts- und effektivitätsbe-stimmenden Mechanismen beim Laserabtragen
1999, 119 Seiten, ISBN 3-519-06245-3

Schubert, Michael E.

Leistungsskalierbares Lasersystem aus faserge-koppelten Singlemode-Diodenlasern
1999, 105 Seiten, ISBN 3-519-06246-1

Kern, Markus

Gas- und magnetofluidynamische Maßnahmen zur Beeinflussung der Nahtqualität beim Laser-strahlschweißen
1999, 132 Seiten, ISBN 3-519-06247-X

Raiber, Armin

Grundlagen und Prozeßtechnik für das Lasermik-robohren technischer Keramiken
1999, 135 Seiten, ISBN 3-519-06248-8

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW ab 2000 erschienen im Herbert Utz Verlag, München

Schittenhelm, Henrik

Diagnostik des laserinduzierten Plasmas
beim Abtragen und Schweißen
2000, 141 Seiten, ISBN 3-89675-712-1

Stewen, Christian

Scheibenlaser mit Kilowatt-Dauerstrichleistung
2000, 145 Seiten, ISBN 3-89675-763-6

Schmitz, Christian

Gaselektronische Analysemethoden zur Optimierung von Lasergasentladungen
2000, 107 Seiten, ISBN 3-89675-773-3

Karszewski, Martin

Scheibenlaser höchster Strahlqualität
2000, 132 Seiten, ISBN 3-89675-785-7

Chang, Chin-Lung

Berechnung der Schmelzbadgeometrie beim
Laserstrahlschweißen mit Mehrfokustechnik
2000, 141 Seiten, ISBN 3-89675-825-X

Haag, Matthias

Systemtechnische Optimierungen der Strahlqualität von Hochleistungsdiodenlasern
2000, 166 Seiten, ISBN 3-89675-840-3

Bahnmüller, Jochen

Charakterisierung gepulster Laserstrahlung zur
Qualitätssteigerung beim Laserbohren
2000, 138 Seiten, ISBN 3-89675-851-9

Scheilhorn, Martin Carl Johannes

CO-Hochleistungslaser: Charakteristika und Einsatzmöglichkeiten beim Schweißen
2000, 142 Seiten, ISBN 3-89675-849-7

Angstenberger, Birgit

Fliehkraftunterstütztes Laserbeschichten
2000, 153 Seiten, ISBN 3-89675-861-6

Bachhofer, Andreas

Schneiden und Schweißen von Aluminiumwerkstoffen mit Festkörperlasern für den Karosseriebau
2001, 194 Seiten, ISBN 3-89675-881-0

Breitschwerdt, Sven

Qualitätssicherung beim Laserstrahlschweißen
2001, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0032-5

Mochmann, Gunter

Laserkristallisation von Siliziumschichten auf
Glas- und Kunststoffsubstraten für die Herstellung
verbesserter Dünnschichttransistoren
2001, 170 Seiten, ISBN 3-89675-811-X

Herrmann, Andreas

Fertigungsorientierte Verfahrensentwicklung
des Weichlötens mit Diodenlasern
2002, 133 Seiten, ISBN 3-8316-0086-4

Mästle, Rüdiger

Bestimmung der Propagationseigenschaften
von Laserstrahlung
2002, 147 Seiten, ISBN 3-8316-0113-5

Voß, Andreas

Der Scheibenlaser: Theoretische Grundlagen des
Dauerstrichbetriebs und erste experimentelle
Ergebnisse anhand von Yb:YAG
2002, 195 Seiten, ISBN 3-8316-0121-6

Müller, Matthias G.

Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen
durch Auswertung der reflektierten Leistung
2002, 122 Seiten, ISBN 3-8316-0144-5

Abeln, Tobias

Grundlagen und Verfahrenstechnik des reaktiven
Laserpräzisionsabtragens von Stahl
2002, 138 Seiten, ISBN 3-8316-0137-2

Erhard, Steffen

Pumpoptiken und Resonatoren für den
Scheibenlaser
2002, 184 Seiten, ISBN 3-8316-0173-9

Contag, Karsten

Modellierung und numerische Auslegung des
Yb:YAG-Scheibenlasers
2002, 155 Seiten, ISBN 3-8316-0172-0

Krastel, Klaus

Konzepte und Konstruktionen zur laserintegrierten
Komplettbearbeitung in Werkzeugmaschinen
2002, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0176-3

Staud, Jürgen

Sensitive Werkzeuge für ein neues Montagekonzept
in der Mikrosystemtechnik
2002, 122 Seiten, ISBN 3-8316-0175-5

Schinzel, Cornelius M.

Nd:YAG-Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Automobilbau
2002, 177 Seiten, ISBN 3-8316-0201-8

Sebastian, Michael

Grundlagenuntersuchungen zur Laser-Plasma-CVD Synthese von Diamant und amorphen Kohlenstoffen
2002, 153 Seiten, ISBN 3-8316-0200-X

Lücke, Bernd

Kohärente Kopplung von Vertikalemitter-Arrays
2003, 120 Seiten, ISBN 3-8316-0224-7

Hohenberger, Bernd

Laserstrahlschweißen mit Nd:YAG-Doppelfokus-
technik – Steigerung von Prozeßsicherheit, Fle-
xibilität und verfügbarer Strahleistung
2003, 128 Seiten, ISBN 3-8316-0223-9

Jasper, Knut

Neue Konzepte der Laserstrahlformung und
-föhrung für die Mikrotechnik
2003, 152 Seiten, ISBN 3-8316-0205-0

Heimerdinger, Christoph

Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen
für die Luftfahrt
2003, 112 Seiten, ISBN 3-8316-0256-5

Christoph Fleig

Evaluierung eines Messverfahrens zur genauen
Bestimmung des Reflexionsgrades optischer
Komponenten
2003, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0274-3

Joachim Radtke

Herstellung von Präzisionsdurchbrüchen in ke-
ramischen Werkstoffen mittels repetierender
Laserbearbeitung
2003, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0285-9

Michael Brandner

Steigerung der Prozesseffizienz beim Löten und
Kleben mit Hochleistungsdiodenlasern
2003, 195 Seiten, ISBN 3-8316-0288-3

Reinhard Winkler

Porenbildung beim Laserstrahlschweißen von
Aluminium-Druckguss
2004, 153 Seiten, ISBN 3-8316-0313-8

Helmut Kindler

Optische und gerätetechnische Entwicklungen
zum Laserstrahlspritzen
2004, 117 Seiten, ISBN 3-8316-0315-4

Andreas Ruf

Modellierung des Perkussionsbohrens von Metal-
len mit kurz- und ultrakurz gepulsten Lasern
2004, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0372-3

Guido Hergenhan

Kohärente Kopplung von Vertikalemittern – Sys-
temkonzept und experimentelle Verifizierung
2004, 115 Seiten, ISBN 3-8316-0376-6

Klaus Goth

Schweißen von Mischverbindungen aus Alumini-
umguß- und Knetlegierungen mit CO₂-Laser
unter besonderer Berücksichtigung der Nahtart
2004, 143 Seiten, ISBN 3-8316-0427-4

Armin Strauch

Effiziente Lösung des inversen Problems beim
Laserstrahlschweißen durch Simulation und
Experiment
2004, 169 Seiten, ISBN 3-8316-0425-8

Thomas Wawra

Verfahrensstrategien für Bohrungen hoher Präzi-
sion mittels Laserstrahlung
2004, 162 Seiten, ISBN 3-8316-0453-3

Michael Honer

Prozesssicherungsmaßnahmen beim Bohren
metallischer Werkstoffe mittels Laserstrahlung
2004, 113 Seiten, ISBN 3-8316-0441-x

Thomas Herzinger

Prozessüberwachung beim Laserbohren von
Turbinenschaufeln
2004, 143 Seiten, ISBN 3-8316-0443-6

Reiner Heigl

Herstellung von Randschichten auf Aluminium-
gusslegierungen mittels Laserstrahlung
2004, 173 Seiten, ISBN 3-8316-0460-6

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW ab 2005 erschienen im Herbert Utz Verlag, München

Thomas Fuhrich

Marangoni-effekt beim Laserstrahl-tiefschweißen von Stahl
2005, 163 Seiten, ISBN 3-8316-0493-2

Daniel Müller

Pulsenergiestabilität bei regenerativen Kurzpuls-verstärkern im Scheibenlaserdesign
2005, 172 Seiten, ISBN 3-8316-0508-4

Jiancun Gao

Neodym-dotierte Quasi-Drei-Niveau-Scheibenlaser: Hohe Ausgangsleistung und Frequenzverdopplung
2005, 148 Seiten, ISBN 3-8316-0521-1

Wolfgang Gref

Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen mit der Fokusmatrixtechnik
2005, 136 Seiten, ISBN 3-8316-0537-8

Michael Weikert

Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laserpulsen
2005, 116 Seiten, ISBN 3-8316-0573-4

Julian Sigel

Lasergenerieren metallischer Bauteile mit variablen Laserstrahldurchmesser in modularen Fertigungssystemen
2006, 132 Seiten, ISBN 3-8316-0572-6

Andreas Ruß

Schweißen mit dem Scheibenlaser-Potentiale der guten Fokussierbarkeit
2006, 142 Seiten, ISBN 3-8316-0580-7

Gabriele Seibold

Absorption technischer Oberflächen in der Lasermaterialbearbeitung
2006, 156 Seiten, ISBN 3-8316-0618-8

Dirk Lindenau

Magnetisch beeinflusstes Laserstrahlschweißen
2007, 180 Seiten, ISBN 978-3-8316-0687-0

Jens Walter

Gesetzmäßigkeiten beim Lasergenerieren als Basis für die Prozesssteuerung und -regelung
2008, 140 Seiten, ISBN 978-3-8316-0770-9

Heiko Ridderbusch

Longitudinal angeregte passiv gütegeschaltete Laserzündkerze
2008, 175 Seiten, ISBN 978-3-8316-0840-9

Markus Leimser

Strömungsinduzierte Einflüsse auf die Naht-eigenschaften beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen
2009, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-0854-6

Mikhail Larionov

Kontaktierung und Charakterisierung von Kristallen für Scheibenlaser
2009, 186 Seiten, ISBN 978-3-8316-0855-3

Jürgen Müller-Borhanian

Kamerabasierte In-Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen
2009, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-0890-4

Andreas Letsch

Charakterisierung allgemein astigmatischer Laserstrahlung mit der Methode der zweiten Momente
2009, 176 Seiten, ISBN 978-3-8316-0896-6

Thomas Kübler

Modellierung und Simulation des Halbleiterscheibenlasers
2009, 152 Seiten, ISBN 978-3-8316-0918-5

Günter Ambrosy

Nutzung elektromagnetischer Volumenkräfte beim Laserstrahlschweißen
2009, 170 Seiten, ISBN 978-3-8316-0925-3

Agnes Ott

Oberflächenmodifikation von Aluminiumlegierungen mit Laserstrahlung: Prozessverständnis und Schichtcharakterisierung
2010, 226 Seiten, ISBN 978-3-8316-0959-8

Detlef Breitling

Gasphaseneinflüsse beim Abtragen und Bohren mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung
2010, 200 Seiten, ISBN 978-3-8316-0960-4

Dmitrij Walter

Online-Qualitätssicherung beim Bohren mittels ultrakurz gepulster Laserstrahlung
2010, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-0968-0

Jan-Philipp Weberpals

Nutzen und Grenzen guter Fokussierbarkeit beim Laserstrahlschweißen
2010, 154 Seiten, ISBN 978-3-8316-0995-6

Angelika Beyert

Yb:KYW regenerativer Verstärker für ultrakurze Pulse
2010, 166 Seiten, ISBN 978-3-8316-4002-7

Christian Stolzenburg

Hochrepetierende Kurzpuls-Scheibenlaser im infraroten und grünen Spektralbereich
2011, 184 Seiten, ISBN 978-3-8316-4041-6

Svent-Simon Beyert

Quantenfilm-Pumpen zur Leistungsskalierung von Halbleiter-Scheibenlasern
2011, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4051-5

Sonja Kittel

Verzugsarmes Laserstrahlschweißen an axial-symmetrischen Bauteilen
2011, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-4088-1

Andrey Andreev

Schweißen mit dem Scheibenlaser im Getriebbau – Prozessmerkmale und Anlagenkonzepte
2011, 140 Seiten, ISBN 978-3-8316-4103-1

Christian Föhl

Einsatz ultrakurz gepulster Laserstrahlung zum Präzisionsbohren von Metallen
2011, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-4120-8

Andreas Josef Birnesser

Prozessregelung beim Laserstrahlschweißen
2011, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4133-8

Christoph Neugebauer

Thermisch aktive optische Bauelemente für den resonatorinternen Einsatz beim Scheibenlaser
2012, 220 Seiten, ISBN 978-3-8316-4178-9

Andreas Dauner

Fluidmechanische Maßnahmen zur Reduzierung von Schmelzablagerungen beim Hochgeschwindigkeitslaserbohren
2012, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4194-9

Axel Heß

Vorteile und Herausforderungen beim Laserstrahlschweißen mit Strahlquellen höchster Fokussierbarkeit
2012, 164 Seiten, ISBN 978-3-8316-4198-7

Christian Gehrke

Überwachung der Struktureigenschaften beim Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laserpulsen
2013, 164 Seiten, ISBN 978-3-8316-4271-7

David Schindhelm

In-Prozess Qualitätssicherung für das Laserstrahlschneiden von Metallen
2013, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4345-5

Tilman Froschmeier-Hanss

Festigkeitsverhalten laserstrahlgeschweißter belastungsgangepasster Stahlwerkstoffverbindungen
2014, 200 Seiten, ISBN 978-3-8316-4347-9

Moritz Vogel

Speciality Fibers for High Brightness Laser Beam Delivery
2014, 187 Seiten, ISBN 978-3-8316-4382-0

Andreas Michalowski

Untersuchungen zur Mikrobearbeitung von Stahl mit ultrakurzen Laserpulsen
2014, 176 Seiten, ISBN 978-3-8316-4424-7

Georg Stöpler

Untersuchung eines OPOs im mittleren Infrarot im Hinblick auf Anwendungen für minimalinvasive Chirurgie
2015, 144 Seiten, ISBN 978-3-8316-4437-7

Patrick Mucha

Qualitäts- und produktivitätsbeeinflussende Mechanismen beim Laserschneiden von CF und CFK
2015, 120 Seiten, ISBN 978-3-8316-4516-9

Claus-Dieter Reiniger

Fluiddynamiche Effekte beim Remote-Laserstrahlschweißen von Blechen mit Fügespalt
2015, 188 Seiten, ISBN 978-3-8316-4528-2

Andreas Leitz

Laserstrahlschweißen von Kupfer- und Aluminiumwerkstoffen in Mischverbindung
2016, 172 Seiten, ISBN 978-3-8316-4549-7

Peter Stritt

Prozessstrategien zur Vermeidung von HeißrisSEN beim Remote-Laserstrahlschweißen von AlMgSi 6016
2016, 194 Seiten, ISBN 978-3-8316-4555-8

Katrin Sarah Wentsch

Analyse Ytterbium-dotierter Materialien für den Einsatz in ultrakurz-gepulsten Scheibenlasersystemen
2016, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-4578-7

Jan-Philipp NegeL

Scheibenlaser-Multipassverstärker für ultrakurze Laserpulse mit Ausgangsleistungen im kW-Bereich
2017, 142 Seiten, ISBN 978-3-8316-4632-6

Christian Freitag

Energietransportmechanismen bei der gepulsten Laserbearbeitung Carbonfaser verstärkter Kunststoffe
2017, 152 Seiten, ISBN 978-3-8316-4638-8

Andreas Popp

Faserlaser und Faserlaserverstärker als Brillanzkonverter für Scheibenlaserstrahlen
2017, 242 Seiten, ISBN 978-3-8316-4643-2

Karin Heller

Analytische Temperaturfeldbeschreibung beim Laserstrahlschweißen für thermographische Prozessbeobachtung
2017, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4654-8

Stefan Piehler

Resonatorinterne Kompensation thermisch induzierter Wellenfrontstörungen in hochbrillanten Scheibenlasern
2017, 148 Seiten, ISBN 978-3-8316-4690-6

Felix Abt

Bildbasierte Charakterisierung und Regelung von Laserschweißprozessen
2017, 232 Seiten, ISBN 978-3-8316-4691-3

Volker Rominger

Untersuchungen der Prozessvorgänge bei Einschweißungen in Baustahl mit Lasern hoher Brilanz
2017, 186 Seiten, ISBN 978-3-8316-4692-0

Thomas Rataj

Hochleistungstaugliche faserintegrierte Strahlweichen
2018, 142 Seiten, ISBN 978-3-8316-4733-0

Michael Diez

Pulsformung zur schädigungsarmen Laserbearbeitung von Silizium
2018, 194 Seiten, ISBN 978-3-8316-4737-8

Andreas Heider

Erweitern der Prozessgrenzen beim Laserstrahlschweißen von Kupfer mit Einschweißtiefen zwischen 1 mm und 10 mm
2018, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-4738-5

Marcel Schäfer

Energetische Beeinflussung von Schmelzeffuss und Heißrissbildung beim Laserstrahlschweißen von Vergütungsstahl
2018, 146 Seiten, ISBN 978-3-8316-4742-2

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW ab 2019 erschienen im utzverlag, München

Tom Dietrich

Gitterwellenleiterstrukturen zur Strahlformung in Hochleistungsscheibenlasern
2019, 154 Seiten, ISBN 978-3-8316-4785-9

Martin Rumpel

Applications of Grating Waveguide Structures in Solid-State Lasers
2019, 112 Seiten, ISBN 978-3-8316-4801-6

Michael Eckerle

Generation and amplification of ultrashort pulsed high-power cylindrical vector beams
2019, 112 Seiten, ISBN 978-3-8316-4804-7

Martin Stubenvoll

Messung und Kompensation thermisch induzierter Wellenfrontdeformationen in optischen Elementen
2019, 118 Seiten, ISBN 978-3-8316-4819-1

Christian Hagenlocher

Die Kornstruktur und der Heißrisswiderstand von Laserstrahlschweißnähten in Aluminiumlegierungen
2020, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4864-1

Florian Fetzner

Analyse der Geometrie und Stabilität der Kapillare beim Laserstrahlquetschschweißen mittels reduzierter Modelle.
2020, 180 Seiten, ISBN 978-3-8316-4874-0

Michael Jarwitz

Laserstrahlschweißen von Metallen mit unterschiedlichen thermophysikalischen Eigenschaften.
2020, 154 Seiten, ISBN 978-3-8316-4882-5

Christian Röhrer

Flexible Führung hochbrillanter Laserstrahlen mit optischen Fasern
2020, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4888-7

Martin Sommer

Laserstrahlschweißen der Aluminiumlegierung AlMgSi mittels Strahloszillation
2021, 110 Seiten, ISBN 978-3-8316-4898-6

Birgit Weichert

Experimental Investigations on Power Scaling of High-Brightness cw Ytterbium-Doped Thin-Disk Lasers.
2021, 166 Seiten, ISBN 978-3-8316-4914-3

Sebastian Faas

Oberflächenfunktionalisierung von Stahl mit UKP-Lasern mit mehreren Hundert Watt mittlerer Laserleistung.
2021, 96 Seiten, ISBN 978-3-8316-4935-8

Daniel Weller

Erhöhung der Prozesssicherheit beim Remote-Laserstrahlschneiden von Aluminiumwerkstoffen.
2021, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4940-2

Sebastian Hecker

Verfahren zur Inline-Prozessüberwachung für das Schweißen von Glas mit Ultrakurzpulslasern
2022, 132 Seiten, ISBN 978-3-8316-4955-6

Frieder Beirow

Leistungskalierung ultrakurz gepulster radial polarisierter Laserstrahlung.
2022, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4970-9

Meiko Boley

Bestimmung und Regelung der Kapillar- und Nahttiefe beim Laserstrahlschweißen.
2022, 154 Seiten, ISBN 978-3-8316-4986-0

Christoph Röcker

Flexible Verstärkung und Frequenzkonversion ultrakurzer Laserpulse mit Ausgangsleistungen im kW-Bereich
2022, 182 Seiten, ISBN 978-3-8316-4987-7

Oliver Bocksrocker

Mechanismen der Entstehung von Schnittunregelmäßigkeiten beim Laserschneiden mit 1 µm Wellenlänge
2023, 128 Seiten, ISBN 978-3-8316-4999-0

Daniel Förster

Energieinkopplung und Energieumwandlungsprozesse bei der Bearbeitung von Metallen mit ultrakurzen Laserpulsen
2023, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-5009-5

Daniel Holder

Laser micromachining with target depth
2023, 194 Seiten, ISBN 978-3-8316-5010-1

Florian Bienert

Periodenchipr optischer Gitter
2024, 222 Seiten, ISBN 978-3-8316-5061-3

Jannik Lind

Einfluss von Strahlformung auf Absorption, Frequenzquerschnitt und Produktivität beim Laserstrahlschneiden
2024, 146 Seiten, ISBN 978-3-8316-5062-0

Jan-Hinnerk Wolter

Scheibenlaser mit beidseitiger Kühlung des Laserkristalls
2025, 194 Seiten, ISBN 978-3-38316-5067-5

Benjamin Dannecker

Untersuchung von Scheibenlasern zur Erzeugung von Pulsen mit einer Dauer von weniger als 500 fs
2025, 146 Seiten, ISBN 978-3-8316-5080-4

Cherry May Dannecker

Multi-Pass and Quantum-Well Pumped AlGaNp Disk Lasers
2025, 140 Seiten, ISBN 978-3-8316-5082-8

Eveline Reinheimer

Wärme- und Schmelzeströme beim Fügen mittels Laser
2025, 120 Seiten, ISBN 978-3-8316-5087-3