

# **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 verzeichnet 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](http://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](http://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 Industrielle Anwendung und daraus resultierender Forschungsbedarf.....	24
2.3 Schweißen mit hoher Vorschubgeschwindigkeit.....	29
2.3.1 Dampfkapillare .....	30
2.3.2 Strömung im Schmelzebad.....	32
2.3.3 Nahtdefekte beim Schweißen mit hohen Vorschüben.....	35
2.3.4 Industrielle Anwendung und daraus resultierender Forschungsbedarf.....	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 Schmelzebad beim Schweißen mit hohen Vorschüben	72

5.1 Bestimmung der superkritischen Strömungs-bedingungen im Schmelzebad 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	—
$\alpha, \beta$	Anstellwinkel der Optiken	°
$\alpha_f$	Volumenanteil schmelzflüssigen Materials	%
$\rho$	Dichte	$kg \cdot m^{-3}$
$\lambda$	Wellenlänge	$\mu m$
$\lambda_{Cu}$	Wärmeleitfähigkeit von Kupfer	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\lambda_{RF4}$	Wärmeleitfähigkeit von FR4- Epoxidharz	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\lambda_L$	Wellenlänge des Laserstrahls	$\mu m$
$\lambda_{th}$	Wärmeleitfähigkeit	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\eta_E$	Wärmewirkungsgrad	%
$\kappa$	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	$\mu m$
$d_c$	Durchmesser des Faserkerns	$\mu m$
$d_f$	Fokusedurchmesser	$\mu m$
$F$	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 $\cdot$ 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	$K$
$T_{Int\_max}(\tau)$	Bestrahlungsdauerabhängige Temperatur am Übergang zwischen Kupfer und Epoxidharz	$K$
$T_{Int\_max}(\tau)$	Bestrahlungsdauerabhängige 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	$s$
$\tau$	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  $\mu\text{m}$  dicken Kupferbein

auf eine 50  $\mu\text{m}$  bzw. 35  $\mu\text{m}$  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 Schiffe verwendet, um die Strömungsgeschwindigkeit entlang der Kapillare zu ermitteln. Die so ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten dienen 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 gewonnen 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  $\mu\text{m}$  thick copper leg of an electronic component onto a 50  $\mu\text{m}$  or 35  $\mu\text{m}$  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 Speichersystemherstellung und -montage Bedarf an fügetechnischem Know-How, das bisher im Fahrzeugbau nur eine untergeordnete Rolle gespielt hat [6]. Zudem hat sich die Verbindungstechnik 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, Speichersystemen 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 Stromdichten ( $> 100 \text{ A}$ ), 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 Prozessüberwachung sowie Nachhaltigkeits- und Umweltaspekte [10] tragen dazu bei, dass der Laser in der Füge-technologie 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 Laserweichen [11, 12] und Hartlöten [13], das Laserbonden [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  $\lambda_L$ , 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  $\alpha$  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  $\lambda_L = 1 \mu m$  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  $2 mm \cdot mrad$  (typisch für Faserlaser) und  $10 mm \cdot mrad$  (typisch für Scheibenlaser). Weiter können Laserstrahlen mit Wellenlängen um  $1 \mu m$  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  $> 2 kW$  zum einen typischerweise nur mit wesentlich schlechteren Strahlqualitäten (SPP  $> 30 mm \cdot mrad$ ) 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 Werkstoffes 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 Bestrahlungsdauer  $t_{heat}$ , die längenbezogene Leistung  $\frac{P}{d_B}$  und die Temperaturleitfähigkeit  $\kappa = \frac{\lambda_{th}}{\rho \cdot c_p}$  des Materials beeinflusst, wobei  $\lambda_{th}$  die Wärmeleitfähigkeit,  $\rho$  die Dichte und  $c_p$  die spezifische Wärmekapazität des verwendeten Werkstoffes sind. Durch bestimmte Schutzgase kann die Marangoniströmung 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 Autogenschweißen. Ein weiterer Vorteil des Laserstrahl-tiefschweißens gegenüber dem Elektronenstrahlschweißen 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 Laserstrahl-tiefschweißungen mit höchsten Vorschubgeschwindigkeiten, begrenzen Wärme- und Schmelzefflüsse 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  $\kappa$  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

### **Gorritz, Michael**

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

### **Mohr, Ursula**

Geschwindigkeitsbestimmende Strahleigenschaften und Einkoppelmechanismen beim CO<sub>2</sub>-Laserschneiden von Metallen  
1993, 130 Seiten, ISBN 3-519-06207-0

### **Rudlaff, Thomas**

Arbeiten zur Optimierung des Umwandlungshärstens 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 CO<sub>2</sub>-Laser  
1994, 149 Seiten, ISBN 3-519-06210-8

### **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

### **Grünewald, Karin M.**

Modellierung der Energietransferprozesse in längsgeströmten CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>- 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**

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

**Wittig, Klaus**

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

**Grünenwald, Bernd**

Verfahrensoptimierung und Schichtcharakterisierung beim einstufigen Cermet-Beschichten mittels CO<sub>2</sub>-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 Entwicklungen zur Komplettbearbeitung in Drehzentren mit integrierten Laserverfahren  
1997, 129 Seiten, ISBN 3-519-06228-3

**Bloehs, Wolfgang**

Laserstrahlhärten mit angepassten Strahlformungssystemen  
1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06230-5

**Bea, Martin**

Adaptive Optik für die Materialbearbeitung mit CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung  
1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06231-3

**Stöhr, Michael**

Beeinflussung der Lichtemission bei mikrokanalgekühlten Laserdioden  
1997, 147 Seiten, ISBN 3-519-06234-8

**Plaß, Wilfried**

Zerstörschwellen und Degradation von CO<sub>2</sub>-Laseroptiken  
1998, 158 Seiten, ISBN 3-519-06235-6

**Schaller, Markus K. R.**

Lasergestützte Abscheidung dünner Edelmetallschichten zum Heißgaskorrosionsschutz für Molybdän  
1998, 163 Seiten, ISBN 3-519-06236-4

**Hack, Rüdiger**

System- und verfahrenstechnischer Vergleich von Nd:YAG- und CO<sub>2</sub>-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**

Fluidodynamische und elektrophysikalisch optimierte Entladungsstrecken für CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaser  
1998, 152 Seiten, ISBN 3-519-06239-9

**Volz, Robert**

Optimiertes Beschichten von Gußeisen-, Aluminium- und Kupfergrundwerkstoffen mit Lasern  
1998, 133 Seiten, ISBN 3-519-06240-2

**Bartelt-Berger, Lars**

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

**Müller-Hummel, Peter**

Entwicklung einer Inprozeßtemperaturmeßvorrichtung zur Optimierung der laserunterstützten Zerspänung  
1999, 139 Seiten, ISBN 3-519-06242-9

**Rohde, Hansjörg**

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

**Huonker, Martin**

Strahlführung in CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasersystemen zur Materialbearbeitung  
1999, 121 Seiten, ISBN 3-519-06244-5

**Callies, Gert**

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

**Schubert, Michael E.**

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

**Kern, Markus**

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

**Raiber, Armin**

Grundlagen und Prozeßtechnik für das Lasermikrobohren 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

### **Bahn Müller, Jochen**

Charakterisierung gepulster Laserstrahlung zur Qualitätssteigerung beim Laserbohren  
2000, 138 Seiten, ISBN 3-89675-831-9

### **Schellhorn, 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 Festkörperlaser 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 Laserpräzisionsabtrags 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, 177 Seiten, ISBN 3-8316-0175-5

### **Schinzler, 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 Strahlleistung  
2003, 128 Seiten, ISBN 3-8316-0223-9

**Jasper, Knut**

Neue Konzepte der Laserstrahlformung und  
-führung 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 ultrakurzgepulsten 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 Alumi-  
numguß- und Knetlegierungen mit CO<sub>2</sub>-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  
Turbinschaufeln  
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-Scheiben-  
laser: Hohe Ausgangsleistung und Frequenzver-  
dopplung

2005, 148 Seiten, ISBN 3-8316-0521-1

### Wolfgang Gref

Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen  
mit der Fokussmatrixtechnik

2005, 136 Seiten, ISBN 3-8316-0537-8

### Michael Weikert

Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laser-  
pulsen

2005, 116 Seiten, ISBN 3-8316-0573-4

### Julian Sigel

Lasergenerieren metallischer Bauteile mit variab-  
lem Laserstrahldurchmesser in modularen Ferti-  
gungssystemen

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 La-  
sermaterialbearbeitung

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 Nahteig-  
enschaften beim Laserstrahlschweißen von  
Aluminiumwerkstoffen

2009, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-0854-6

### Mikhail Larionov

Kontaktierung und Charakterisierung von Kristal-  
len 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 La-  
serstrahlung mit der Methode der zweiten Mo-  
mente

2009, 176 Seiten, ISBN 978-3-8316-0896-6

### Thomas Kübler

Modellierung und Simulation des Halbleiterschei-  
benlasers

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 Aluminiumlegierun-  
gen 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 Beyertt

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 Beyertt**

Quantenfilm-Pumpen zur Leistungsskalierung von Halbleiter-Scheibenlasern  
2011, 162 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 Getriebekonstruktion – 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 belastungsangepasster 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 Stöppler**

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**

Fluiddynamische Effekte beim Remote-Laserstrahlschweißen von Blechen mit Fügspalt  
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 Brillanz  
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 Einschweißstiefen zwischen 1 mm und 10 mm  
2018, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-4738-5

**Marcel Schäfer**

Energetische Beeinflussung von Schmelzeffluss 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 Stübenvoll**

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 Fetzer**

Analyse der Geometrie und Stabilität der Kapillare beim Laserstrahl-tiefschweißen 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 Weichelt**

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-Laserstrahlfügen 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 Beirrow**

Leistungsskalierung 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**

Energieeinkopplung 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**

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

**Jannik Lind**

Einfluss von Strahlformung auf Absorption, Fugenquerschnitt und Produktivität beim Laserschneiden  
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 AlGaInP 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