

Strömungsinduzierte Einflüsse auf die Nahteigenschaften beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen

von Dr.-Ing. Markus Leimser
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

Als Dissertation genehmigt
von der Fakultät für Konstruktions-,
Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. Siegfried Schmauder

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

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2008

D 93

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch
begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung,
des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der
Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem
Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungs-
anlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwen-
dung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2009

ISBN 978-3-8316-0854-6

Printed in Germany

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

Kurzfassung der Arbeit

Mit der stetig steigenden Anzahl von Anwendungen wächst auch der Wunsch nach Laserschweißverbindungen an schlecht oder nur mit geeigneten Zusatzwerkstoffen schweißbaren Materialien. Besonders im Automotive-Bereich spielen in Bezug auf Leichtbau und Emissionsreduktion neben Tailored Blanks aus hochfesten Stählen auch Aluminiumwerkstoffe eine entscheidende Rolle. Die homogene Einmischung des häufig erforderlichen Zusatzwerkstoffes wird insbesondere im Hinblick auf die mit Strahlquellen neuester Generation wie Scheiben- oder Faserlaser erzielbaren Aspektverhältnisse immer problematischer. Die vorliegende Arbeit untersucht daher drei unterschiedliche Methoden, mit denen eine homogenere Verteilung des eingebrachten Zusatzwerkstoffes im Schmelzbad ermöglicht werden soll.

Eine davon stellt die Nutzung geeigneter Prozessgase, mit denen die Marangoni-Strömung im Schmelzbad beeinflusst werden kann, dar. CO_2 hat sich hier bei Vor-schubgeschwindigkeiten bis ca. 2 – 3 m/min und hinreichend großem Schmelzbadvo-lumen als geeignet erwiesen. Ursache für die Steigerung der Durchmischung ist jedoch nicht eine Umkehrung der Marangoniströmung, sondern vielmehr deren Wegfall auf-grund einer vollständig oxidierten Schmelzbadoberfläche.

Eine weitere Möglichkeit ist die Zuführung eines extern angelegten Stromes über den Zusatzdraht. Durch das um den Auftreffpunkt des Drahtes entstehende selbstinduzierte Magnetfeld wird eine in das Werkstück gerichtete, integrale Volumenkraft im Bereich vor und neben der Dampfkapillare generiert. Über die daraus entstehende Strömungs-komponente ist eine Steigerung der Schmelzbadurchmischung bis zu einer Vor-schubgeschwindigkeit von ca. 5 m/min möglich.

Die dritte Möglichkeit stellt die Verwendung mehrerer Fokuspunkte innerhalb eines gemeinsamen Schmelzbades dar. Hierbei kann neben einer weitreichenden Beeinflus-sung der Nahtgeometrie bei einigen Anordnungen auch eine deutliche Steigerung der Schmelzbadurchmischung erzielt werden. Das Potenzial zur Homogenisierung der Schmelzbadurchmischung mit Zusatzwerkstoff ist stark von der Fokusanordnung abhängig und bleibt etwas hinter den Möglichkeiten zur Nahtformung zurück. Mit Strahlquellen neuester Generation wie Scheiben- oder Faserlaser bieten sich hier je-doch noch höchst interessante Perspektiven.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung der Arbeit	5
Inhaltsverzeichnis.....	7
Verzeichnis der Symbole	11
Extended Abstract	15
1 Einleitung.....	19
1.1 Motivation und Aufgabenstellung.....	19
1.2 Aufbau der Arbeit.....	20
2 Grundlagen und allgemeiner Kenntnisstand.....	22
2.1 Laserstrahlschweißen	22
2.1.1 Strahl-Stoff-Wechselwirkung	22
2.1.2 Modellvorstellungen zu Materialtransport und Strömungsfeldern im Schmelzbad.....	25
2.2 Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen.....	28
2.2.1 Thermophysikalische Eigenschaften von Reinaluminium	28
2.2.2 Einflüsse von Legierungselementen	29
2.2.3 Schweißseignung von Aluminiumwerkstoffen	30
2.3 Qualitätsaspekte.....	30
2.3.1 Porenbildung	30
2.3.2 Heißrissbildung	33

2.4	Maßnahmen zur Qualitätssteigerung	36
2.4.1	Einbringen von Zusatzwerkstoffen	36
2.4.2	Multifokustechnik	40
2.4.3	Elektromagnetische Volumenkräfte.....	46
3	Eingesetzte Systemtechnik, Versuchsaufbau	47
3.1	Strahlquellen	47
3.2	Optische Komponenten	47
3.3	Versuchsanlagen	52
3.3.1	Versuchsaufbau für Untersuchungen mit der Fokusmatrix	52
3.3.2	Versuchsaufbau zur Zuführung eines externen Zusatzstromes.....	53
3.4	Zusatzdraht- und Prozessgaszuführung	55
3.5	Stromquellen.....	57
3.6	Analysemethoden	58
3.6.1	Optische Beurteilung.....	58
3.6.2	Elektronenstrahl-Mikroanalyse	61
3.7	Werkstoffe	61
3.8	Prozessgase	62
4	Einflussmöglichkeiten auf die Schmelzbadströmung.....	63
4.1	Einflüsse durch die Prozessgaszufuhr	63
4.1.1	Düsenkonzepte	63
4.1.2	Einfluss auf Oberraupenqualität und Nahtgeometrie.....	68
4.1.3	Einfluss auf die Schmelzbaddurchmischung	79
4.1.4	Modellvorstellungen zur Beeinflussung der Schmelzbaddynamik durch Prozessgase	80
4.1.5	Synopsis	88
4.2	Externe Stromzufuhr.....	90

4.2.1 Externe Stromzufuhr über den Zusatzdraht	90
4.2.1.1 Einfluss auf die Nahtgeometrie	90
4.2.1.2 Einfluss auf die Elementdurchmischung	96
4.2.2 Stromfluss über eine Wolframelektrode	97
4.2.3 Modellvorstellungen zur Beeinflussung der Schmelzbaddynamik durch externe Stromzufuhr	100
4.2.4 Kombination von Stromfluss und Schutzgas	104
4.2.4.1 Einfluss auf die Nahtgeometrie	104
4.2.4.2 Einfluss auf die Schmelzbaddurchmischung	105
4.2.5 Synopsis	107
4.3 Mehrfokustechnik	109
4.3.1 Kapillarausbildung	112
4.3.2 Einfluss auf die Nahtgeometrie	114
4.3.3 Einfluss auf die Schmelzbaddurchmischung	120
4.3.4 Modellvorstellungen zur Beeinflussung der Schmelzbaddynamik durch die Mehrfokustechnik	124
4.3.5 Kombination von Mehrfokustechnik und Schutzgas	128
4.3.5.1 Einfluss auf die Nahtgeometrie	128
4.3.5.2 Einfluss auf die Schmelzbaddurchmischung	134
4.3.6 Synopsis	136
5 Bewertung und weiterführender Ansatz	138
6 Zusammenfassung	140
7 Literaturverzeichnis	143

Extended Abstract

Laser welding has turned into a state of the art joining process throughout the past years. The continuously increasing output power, wall plug efficiency and beam quality is leading to new fields concerning welding depth, welding speed and joint geometry. Regarding the latest developments in transportation industries, laser welded components of high strength steel and aluminium alloys have become a suitable way of reducing weight.

Aluminium is - regarding its weldability - one of the not so easy to handle materials. It is always covered with (an instantly growing) oxide layer. The melting temperature of the oxide layer is almost 4 times higher than the melting temperature of aluminium itself. Also, especially high strength aluminium alloys which are used in aeronautic or spacecraft application, cause a manifold of problems concerning the welding process.

Besides of process instabilities like melt ejection or seam imperfections such as hydrogen or process pores, hot cracking is one of the major problems in the industrial utilisation of laser beam welding. The addition of filler wire is a common solution for reducing hot cracks. Nevertheless, in some cases even the addition of filler wire - in order to adjust the alloy composition in the melt pool - will not be successful.

With the steady increase of material thickness and the utilisation of complex joining-geometries, the homogeneous distribution of the added filler wire material throughout the whole melt pool and, especially in the bottom line of the weld seam, can not be assured. The transport of the silicon, added via the filler material to the areas where it is needed, is obviously the main problem. The transportation of the material can only be realised via melt flow in the pool. So the flow field and its driving forces move into the focus of interest. In the following, resulting flow fields are considered and their potential of silicon transportation from the tip of the filler wire homogeneously throughout the melt pool and especially into the bottom line of a weld seam is discussed. Also the potential of altering the flow field by addition of external electromagnetic forces or the utilisation of multiple foci is regarded.

As driving force for the fluid motion the surface tension at the free surface of the melt pool has been investigated as a cause for melt flow in deep penetration welding. The gradient of the surface tension coefficient generates, depending on its temperature de-

pendence, either a flow from the hot towards the cold areas (negative coefficient of surface tension) or the other way round (positive coefficient of surface tension). In both cases, the flow field is deflected either on the boundaries of the melt pool (negative coefficient of surface tension) or on the capillary (positive coefficient of surface tension) thus producing eddies. This latter effect (Marangoni-effect) can be achieved either by a defined amount of suitable elements in the melt pool, like sulfur in steel or the ambient atmosphere or particular process gas.

By using CO₂ instead of Argon as process gas the basic means to influence and in particular to homogenise the silicon content in a weld seam can be demonstrated. The influence on the flow field can also be recognized in the resulting seam geometry. The V- like shape respectively the nail head is shifted into more parallel and cylindrical one.

The quantity of the effect is strongly dependent on the quality of the coverage of the melt pool with the process gas. Using a simple pipe without any nozzle elements in trailing position, directed towards the open melt pool surface behind the capillary, provides the best results. A surface active process gas might be the easiest way to influence the melt flow, but the effects are limited to low travel speeds of about 2 up to 3 m/min. The reversal of the Marangoni-effect by utilising CO₂ as surface active component does not exist since the requirement for it to act - the open melt pool surface - does not exist.

A further mean to alter the flow field is the application of an external current via the added filler wire. The current has to be in the range of 100 to 300 A with a voltage loss of approximately 0,1 V - due to the state of short circuit. For this reason an addition of electrical energy into the melt pool can be neglected. Adding the current via the filler wire in a leading position in front of the capillary, an increase of the welding depth can be achieved by increasing the current. For a trailing position in the melt pool behind the capillary the effect can be turned over. In that position an increase of the current leads to a decrease of the welding depth.

The utilising of an external current to produce electro-magnetic forces in front of the capillary leads - according to its influence on the melt flow - to a homogenising effect on the distribution of the added filler wire throughout the whole melt pool. The effect is proved up to 6 m/min travel speed. This is - regarding the maximum output power of currently available solid state laser sources and the corresponding welding depth at such speed values - a satisfying result.

The application of multiple laser beams in order to achieve an increase of the homogenisation is the third investigated means in altering the melt flow. By arranging the foci in a suitable way it is possible to increase the distribution of the Si-content throughout the melt pool. The assumed increase of a mixing effect by adding multiple capillaries as obstacles for the melt flow, leading to a homogenisation of the Si-content can not be shown (yet).

Despite that, even if a separation of the keyholes does not occur, a distinct influence on the Si-distribution and on the seam geometry can be found. The strongest homogenisation effect does exist with an arrangement of two leading and one trailing beam at a distance of $a = 0,75$ mm between the spots. Due to the limitations of laser power and spot size, leading to a drastic decrease of the welding depth, the effect of multiple separated keyholes was not clarified, yet. Increasing the laser power or focusability using a disk- or fibre-laser is supposed to yield results of more practical relevance.

Regarding the economical relevance of the introduced means, the situation is turning over. The application of multiple laser beams as the most effective way for influencing the seam geometry as well as the Si-distribution, is also the most expensive one. The cost of the needed laser power (one high power or several low power beam sources) is a large disadvantage. On the other hand, the utilisation of a suiting process gas as the cheapest way of influencing the melt flow, is limited to low travel speed. So the addition of an external current is the most interesting compromise.

Neglecting the economical issues, a combination of all investigated means might not increase the effects drastically, yet the “stirring and mixing” effect should be slightly enhanced in such a way that the accessible regime of process parameters is slightly enlarged, too.

1 Einleitung

1.1 Motivation und Aufgabenstellung

Mit der rasant voranschreitenden Entwicklung im Bereich der Strahlquellen, die sich in den Scheiben- und Faserlasern neuester Generation manifestiert, treten kontinuierlich neue Anwendungsgebiete für das Laserstrahlschweißen in den Vordergrund. Die mit diesen Geräten erzielbare Ausgangsleistung bei zugleich ausgezeichneter Strahlqualität ermöglicht Aspektverhältnisse, die bislang mit Festkörperlasern als unerreichbar galten. So bietet sich nun die Möglichkeit, Bauteile mit Wandstärken, die typischerweise nur mittels einer konventionellen Mehrlagenschweißung zu verbinden waren, in einem Durchgang mit dem Laser zu schweißen.

Diesen verlockenden ökonomischen Perspektiven sind jedoch klare Grenzen gesetzt. Besonders die aus den steigenden Bauteilanforderungen resultierende kontinuierliche Evolution der Werkstoffe hin zu „shaped materials“, den maßgeschneiderten Werkstoffen für die jeweilige Anwendung, birgt eine Vielzahl an Problemen für thermische Fügeverfahren. Viele dieser Werkstoffe sind ohne zusätzliche Maßnahmen nicht schweißbar.

Abhilfe bietet oftmals eine lokale Änderung der Legierungszusammensetzung, wie sie durch Einbringen eines Zusatzwerkstoffes in das Schmelzbad realisiert werden kann. Dies erfordert jedoch eine möglichst homogene Durchmischung des Schmelzbades mit dem zugeführten Werkstoff. Konnte das Laserstrahlschweißen als hochdynamischer Prozess diese Durchmischung bislang in den meisten Fällen ohne weitere Maßnahmen gewährleisten, zeichnet sich mit den steigenden Einschweiß-tiefen und Aspektverhältnissen hier ein Handlungsbedarf ab.

Die zunächst einzige Möglichkeit, Einfluss auf die Verteilung des eingebrachten Zusatzwerkstoffes innerhalb des Schmelzbades zu nehmen, stellt die im Laserschweißprozess selbst generierte Schmelzbadströmung dar. Dazu ist es nötig, die einzelnen Strömungskomponenten möglichst gezielt zu verstärken oder zu verringern. Unglücklicherweise sind Ausprägung und Verlauf dieser einzelnen Strömungskomponenten noch nicht vollständig erfasst, geschweige denn die Einflussgrößen eindeutig identifiziert.

ziert. Daher ist es trotz der Vielzahl an Simulationsrechnungen noch nicht gelungen, ein vollständiges numerisches Modell der Schmelzbadströmung zu erstellen. Dies bedeutet, dass die Einflussgrößen auf die Schmelzbadströmung und deren Relevanz derzeit nur empirisch ermittelt werden können.

Neben der Durchmischung des Schmelzbades mit Zusatzwerkstoff ist natürlich auch der mit den Strömungen innerhalb des Schmelzbades stattfindende Energietransport ein weiterer interessanter Aspekt. So schlägt sich der Verlauf der Schmelzbadströmung nicht nur in der Verteilung des Zusatzwerkstoffes, sondern selbstverständlich auch in der Gestalt des Nahtquerschnittes nieder. Eine gezielte Beeinflussung der Schmelzbadströmung ermöglicht somit auch in gewissem Umfang eine Formung des Nahtquerschnittes. Die Beobachtung, dass in Abhängigkeit des eingesetzten Schutzgases eine Änderung von Nahtbreite und Einschweißtiefe bei sonst gleichen Prozessparametern möglich ist, illustriert das diesbezügliche Potenzial.

In dieser Arbeit wird am Beispiel von Aluminiumlegierungen gezeigt, welche Auswirkungen eine Variation unterschiedlicher Prozessgrößen auf die Schmelzbadströmung und damit auf die Nahtgeometrie und die Verteilung des eingebrachten Zusatzwerkstoffes hat. Da die derzeit für Simulationsrechnungen verfügbaren Modelle zur Fluidodynamik innerhalb des Schmelzbades jeweils nur Teilaspekte abbilden können, werden die im Zuge dieser Arbeit gemachten Beobachtungen nur auf mit derzeit als plausibel erscheinenden Einzelaspekte theoretischer Beschreibungen in Einklang gebracht. Diese Arbeit soll damit das Potenzial der Einflussnahme auf die Schmelzbadströmung aufzeigen, sowie erste Ansätze zur effizienten Nutzung der sich bietenden Perspektiven vorschlagen.

1.2 Aufbau der Arbeit

Ausgehend von den grundlegenden Mechanismen des Laserstrahlschweißens sowie der Vorstellung der fundamentalen Strömungskomponenten innerhalb des Schmelzbades, wird im nachfolgenden Kapitel explizit auf die Besonderheiten der Aluminiumwerkstoffe und deren Schweißbeignung eingegangen. Die Qualitätsaspekte, insbesondere die Möglichkeiten zur Steigerung der Schweißnahtqualität, stehen dabei im Vordergrund.

Nach einer kurzen Erläuterung zur eingesetzten Systemtechnik in Kapitel 3 werden in Kapitel 4, dem Hauptteil der Arbeit, die unterschiedlichen Möglichkeiten zur Beeinflussung der Schmelzbadströmung vorgestellt und analysiert. Zunächst wird auf den

Einfluss der das Schmelzbad umgebenden Schutzgasatmosphäre eingegangen. Diese stellt sicherlich den am einfachsten zu beeinflussenden Prozessparameter dar. Nach der phänomenologischen Beschreibung der Auswirkungen unterschiedlicher Atmosphären auf die Oberraupenqualität, die Nahtgeometrie sowie die Siliziumverteilung als Indikator für die Beeinflussung der Schmelzbadströmung wird anschließend versucht, die gemachten Beobachtungen mittels einer Modellvorstellung mit dem Stand der Kenntnis in Einklang zu bringen.

Dieses Vorgehen wird bei der Untersuchung einer externen Stromquelle als „prozess-externe“ Einflussgröße beibehalten. Weiterhin wird die Möglichkeit der synergetischen Kopplung von externer Stromzuführung und geeigneter Schutzgasatmosphäre betrachtet.

Zum Abschluss der betrachteten Einflussgrößen wird auf die Anordnung dreier einzelner Teilstrahlen innerhalb eines gemeinsamen Schmelzbades eingegangen. Die sogenannte Mehrfokustechnik bietet nach den bisherigen Erkenntnissen die größtmögliche Flexibilität im Hinblick auf eine Formung der Schmelzbad- oder Nahtquerschnittsgeometrie. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei allerdings auf der Betrachtung der Einflüsse unterschiedlicher Kapillargeometrien und -anordnungen auf die Schmelzbad-dynamik.

Die gewonnenen Erkenntnisse werden in Kapitel 5 nochmals vergleichend zusammengefasst und auf ihr ökonomisches Potenzial hin bewertet. Nach einer kurzen Vorstellung weiterführender Überlegungen und Perspektiven schließt die Arbeit mit einer Zusammenfassung in Kapitel 6.

2 Grundlagen und allgemeiner Kenntnisstand

2.1 Laserstrahlschweißen

Das Laserstrahlschweißen ist als thermisches Fügeverfahren nach DIN 8593 [1] den Schmelzschweißverfahren zugeordnet. Gegenüber den anderen Verfahren dieser Gruppe zeichnet sich das Laserstrahlschweißen besonders durch seine konzentrierte, genau dosierbare und kraftfreie Energieeinbringung aus. Die daraus resultierende gute Automatisierbarkeit sowie - anders als beim Elektronenstrahlschweißen - die Möglichkeit einer Prozessführung an Atmosphäre oder unter geeignetem Prozessgas, eröffnen ein weites Anwendungsfeld. Diese Eigenschaften des Strahlwerkzeuges Laser haben in den letzten Jahren zu einer rasanten Verbreitung unterschiedlichster Laserfügeprozesse in der industriellen Fertigung, insbesondere im Automobilbau und dessen Zulieferbetrieben geführt.

2.1.1 Strahl-Stoff-Wechselwirkung

Die auf das Werkstück auftreffende Laserenergie wird zu einem großen Teil an dessen Oberfläche über Fesnelabsorption in das Bauteil eingebracht. Die Menge der auf diese Weise eingebrachten Energie hängt dabei im Wesentlichen von der Wellenlänge und der Polarisation des Laserlichts, als auch von den Stoffeigenschaften des Werkstücks ab.

Die zugeführte Energie erwärmt das Bauteil und führt bei ausreichend hoher Intensität zum Aufschmelzen des bestrahlten Werkstückbereichs. Die Überlagerung einer Vorschubbewegung führt zur Ausbildung einer Schweißbraupe.

Kennzeichnende Größe für die auftretenden Phänomene ist dabei die Intensität der Laserstrahlung. Diese ergibt sich aus Laserleistung und Strahlqualität der Strahlquelle, sowie der Fokussierung des Laserstrahls. In Abhängigkeit von der Intensität lassen sich dabei mehrere Bereiche unterschiedlicher Bearbeitungsprozesse definieren (Bild 2.1).

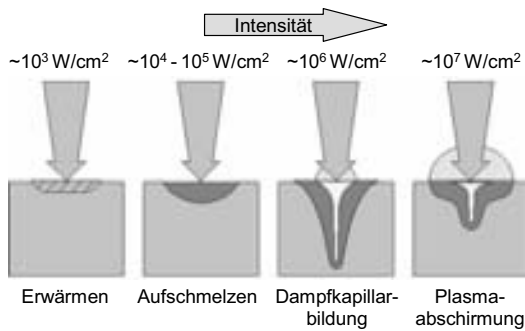


Bild 2.1: Wechselwirkungsprozesse zwischen Laserstrahl und Werkstück in Abhängigkeit von der Intensität des Laserstrahls [2]; die Zahlenwerte gelten für $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$.

Eine Besonderheit des Laserstrahlschweißens ist der Tiefschweißeffekt. Dieser tritt beim Überschreiten der „Schwellintensität“, je nach Werkstoff im Bereich oberhalb 10^6 bis 10^7 W/cm^2 , auf. Beim Tiefschweißeffekt wird im Brennfleck des Laserstrahls Verdampfungstemperatur erreicht. Der nach oben abströmende Metalldampf erzeugt eine Gegenkraft, die zur Ausbildung einer Dampfkapillare im Schmelzbad führt.

Der in der Dampfkapillare herrschende Dampfdruck hält der Oberflächenspannung, dem hydrostatischen und dynamischen Druck der Schmelze die Waage, so dass auch bei einer überlagerten Relativgeschwindigkeit eine stabile Dampfkapillare erhalten bleibt. Diese wiederum ermöglicht ein tieferes Eindringen der Laserstrahlung in das Werkstück, was schließlich zu den typischen schlanken Laserstrahlnähten führt.

Eine einfache Abschätzung, ob ein Tiefschweißprozess zustande kommt, bietet die spezifische Leistung P/d_f . Diese aus Wärmeleitungsrechnungen stammende Größe ist nach [3] und [8] in [4] definiert als

$$\frac{P_L}{d_f} = \sqrt{\pi} \cdot \frac{T_v \cdot \lambda_{rh}}{A} \cdot \sqrt{\frac{Pe}{2} + 1.1} = B \cdot M \cdot V. \quad (2.1)$$

wobei der Faktor B (Beam) von der Intensitätsverteilung im Strahl, der Faktor M (Material) vom Werkstoff und der Faktor V (Velocity) von der Vorschubgeschwindigkeit abhängt.

Basierend auf Überlegungen in [8] und [5] konnte in [6] der experimentelle Nachweis der Eignung von Gleichung (2.1) als Korrelationsgröße für die Schwelle zum Tiefschweißen erbracht werden (Bild 2.2). Hier ist der Übergang vom Wärmeleitungs-

zum Tiefschweißen als Sprung in der Einschweißtiefe zu erkennen. Nur bei einer Auftragung der Einschweißtiefe über der spezifischen Leistung ist der Schwellwert unabhängig vom Fokussdurchmesser.

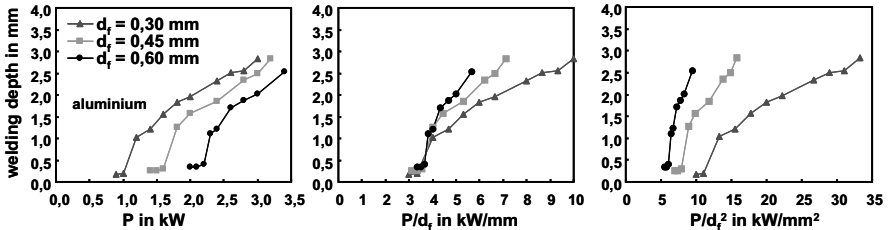


Bild 2.2: Einschweißtiefe in Abhängigkeit von Laserleistung, Strahlparameterquotient und Intensität für unterschiedliche Fokussdurchmesser [6].

Leider kann die Intensität bzw. die spezifische Leistung nicht beliebig gesteigert werden. Von praktischer Relevanz ist dies beim Schweißen mit CO_2 -Lasern: mit steigender Intensität kommt es bei $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ zu einer zunehmenden Ionisation des in und über der Dampfkapillare vorhandenen Metalldampfs. Die sogenannten Plasmaabschirmung (Bild 2.3) äußert sich in einer Defokussierung des Laserstrahls und Leistungsabsorption. Dies kann bis zu einer völligen Absorption des Laserstrahls in der Plasmawolke über dem Werkstück führen, was ein Kollabieren der Dampfkapillare und einen Abbruch des Schweißprozesses zur Folge hat.

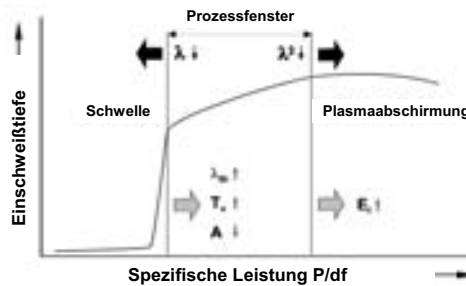


Bild 2.3: Prozessfenster beim Laserstrahlschweißen in Abhängigkeit der Laser- und Werkstoffparameter nach [4].

Der Absorptionskoeffizient α des Metalldampfs ist dabei näherungsweise proportional zum Quadrat der Wellenlänge. Hier bietet eine kürzere Wellenlänge λ der Nd:YAG- ($\lambda = 1,06 \mu\text{m}$) oder Yb:YAG- ($\lambda = 1,03 \mu\text{m}$) Laserstrahlung deutliche Vorteile gegenüber den CO_2 -Lasern ($\lambda = 10,6 \mu\text{m}$).

Entscheidend für die Effizienz eines Laserschweißprozesses ist der Anteil der auftretenden Laserstrahlung, der in Schmelzbadvolumen umgesetzt wird. Ein Maß hierfür ist der sogenannte Prozesswirkungsgrad η_{Pr} , der vom Einkoppelgrad η_A und vom thermischen Wirkungsgrad η_{th} abhängt:

$$\eta_{Pr} = \eta_A \cdot \eta_{th} \quad (2.2)$$

Der Einkoppelgrad beschreibt dabei das Verhältnis der aufgetragenen Laserleistung zur insgesamt im Bauteil absorbierten Laserleistung (im Allgemeinen vernachlässigbare Energieverluste durch den abströmenden Metaldampf, Strahlung und Konvektion sind nicht berücksichtigt). Durch die Mehrfachreflexion beim Tiefschweißen beträgt der Einkoppelgrad ein Vielfaches des Absorptionsgrades A , der die Absorption bei einmaligem Auftreffen der Laserstrahlung auf eine Oberfläche quantifiziert. Der Einkoppelgrad ist damit abhängig von den Werkstoffeigenschaften und der Kapillargeometrie.

Der thermische Wirkungsgrad beschreibt, in welchem Umfang der eingekoppelte Teil der Energie zur Erzeugung des Schmelzbades umgesetzt wird. Auch er ist stark abhängig von den Werkstoffeigenschaften, der Kapillargeometrie sowie der Vorschubgeschwindigkeit. Dabei spielt nicht zuletzt über die Wärmeleitungsverluste aus dem Bereich der Schweißnaht auch die Geometrie des Bauteils eine wesentliche Rolle.

2.1.2 Modellvorstellungen zu Materialtransport und Strömungsfeldern im Schmelzbad

Die Dampfkapillare und das sich um sie herum ausbildende Schmelzbad sind seit je her Gegenstand unzähliger Modelle und Simulationen. Das umfassende Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Metaldampf, Schmelze und Werkstück und die treibenden Kräfte für die sich im Schmelzbad in Abhängigkeit der unterschiedlichsten Prozessparameter ausbildenden Strömungsfelder, ist indes noch nicht vorhanden. Im Folgenden soll daher nur auf die sich im Rahmen dieser Arbeit am plausibelsten erscheinenden Effekte eingegangen werden.

Basierend auf den Veröffentlichungen von [7] und [8] wird daher von einem numerischen Modell einer zylindrischen Dampfkapillare ausgegangen, in dem drei unterschiedliche Antriebskräfte für die Schmelzbadströmung zu finden sind.

Kapillarumströmung

Die Vorschubbewegung führt zu einer Bewegung der Dampfkapillare relativ zum Werkstück. Dabei wird das im Bereich vor der Kapillare aufgeschmolzene Material verdrängt und um die Kapillare herum geleitet (Bild 2.4). In [8] wird die Strömung an

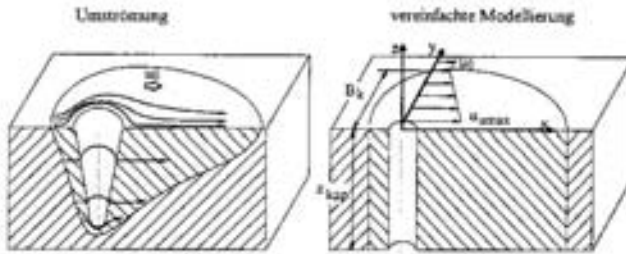


Bild 2.4: Kapillarumströmung und deren vereinfachte Modellierung nach [8], siehe auch Bild 2.7.

der Grenzschicht zur Dampfkapillare als reibungsfrei, am Rand des Schmelzbades hingegen als reibungsbehaftet angenommen. Die lokale Umströmungsgeschwindigkeit der Kapillare $u_0(y)$ entsprechend Bild 2.4 ist abhängig von Vorschubgeschwindigkeit u_0 , Schmelzbadbreite B_k und Kapillarradius r_{kap} .

Strömung durch aus der Kapillare entweichenden Metalldampf

Die Viskosität des aus der Dampfkapillare entweichenden Metalldampfs führt im Bereich der Kapillarwandung zu einer Impulsübertragung auf die umgebende Schmelze. Die dadurch induzierte Schubspannung beschleunigt die Schmelze in Richtung der Kapillaröffnung. An den Begrenzungen des Schmelzbades erfolgt jeweils eine Umlenkung der Strömung, so dass eine rezirkulierende Strömung entsteht.

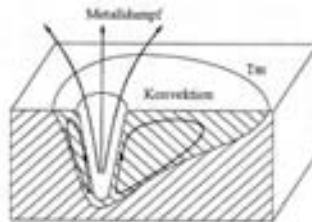


Bild 2.5: Strömung durch aus der Kapillare entweichenden Metalldampf nach [8], siehe auch Bild 2.7.

3 Eingesetzte Systemtechnik, Versuchsaufbau

In diesem Kapitel wird kurz auf die verwendete Systemtechnik eingegangen. Daneben werden der Versuchsaufbau, die Werkstoffe sowie die eingesetzten Analysemethoden vorgestellt.

3.1 Strahlquellen

In allen nachfolgend beschriebenen Schweißversuchen wurden ausschließlich Festkörperlaser eingesetzt, weshalb auf den Aufbau und die Eigenschaften anderer Laserstrahlquellen nicht eingegangen wird.

Eingesetzt wurden während den Versuchen ausschließlich lampengepumpte Nd:YAG-Laser der Firma TRUMPF- Laser. Insgesamt kamen zwei Strahlquellen zum Einsatz: ein HL4006D mit 4,0 kW Ausgangsleistung sowie ein HL3006D mit 3,0 kW Ausgangsleistung. Das Strahlparameterprodukt dieser Laserstrahlquellen wird mit $w_0\Theta_0 \leq 25 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ angegeben [63]. Dieser Wert ermöglicht den Einsatz von Lichtleitkabeln mit einem minimalen Faserkerndurchmesser von 600 μm .

3.2 Optische Komponenten

Lichtleitkabel

Wie bereits im vorigen Kapitel erwähnt, bietet die Wellenlänge der Festkörperlaser die Möglichkeit einer Strahlführung mittels Glasfaser. Basierend auf dem Prinzip der Totalreflexion von Licht an der Grenzfläche zwischen optisch dichteren und optisch weniger dichten Medien, ist eine nahezu verlustfreie Leistungsübertragung möglich. Lediglich bei der Ein- und Auskopplung in die und aus der Glasfaser sind Verluste von jeweils 3-4 % zu verzeichnen. Durch die Vielfachreflexion der Laserstrahlung in der Glasfaser resultiert am Austritt aus der Faser eine homogenisierte Leistungsdichteverteilung.

Bearbeitungsoptik

Nach dem Verlassen der Glasfaser wird der Laserstrahl mit Hilfe einer Bearbeitungsoptik auf das Werkstück fokussiert. Zunächst wird der Strahl kollimiert und anschließend fokussiert, was der Abbildung des Faserendes auf das Werkstück entspricht. Um die für den jeweiligen Prozess gewünschte Brennfleckgröße und Leistungsdichte zu erhalten, werden Optiken mit unterschiedlichen Linsensystemen eingesetzt.

Verwendet wurden Standardbearbeitungsoptiken BEO D70 der Firma TRUMPF-Laser mit Linsendurchmesser von zwei Zoll. Diese besitzen üblicherweise eine Kollimationslinse mit Brennweite $f_K = 200$ mm. Mit Fokussierlinsen der Brennweite $f = 100$ mm, $f = 150$ mm und $f = 200$ mm resultiert für diese Kombination ein Abbildungsmaßstab von 1:2, 1:1,33 und 1:1.

Bifokaloptik zur Strahlteilung

Zur Erzeugung des Doppelfokus gibt es unterschiedliche Möglichkeiten (vgl. Bild 2.19). Eine besteht darin, einen Doppelfokus durch Strahlteilung zu generieren. Hierfür wurden sogenannte Bifokaleinsätze verwendet (Bild 3.1). Diese bestehen aus in einer Fassung eingebauten Keilplatte, welche zwischen Kollimations- und Fokussierlinse montiert wird (vgl. Bild 2.19 a).

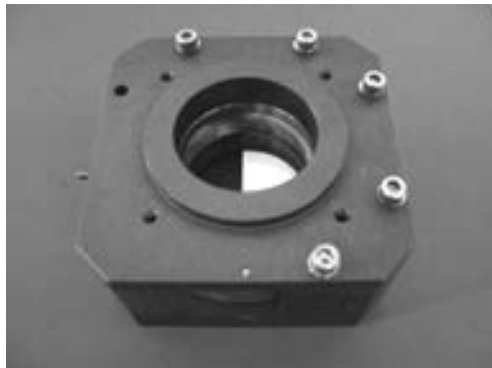


Bild 3.1: Bifokaloptik zur Aufteilung des Laserstrahls in zwei getrennte Fokuspunkte.

Untersucht wurden zwei verschiedene Keilplatten mit einem Keilwinkel von 5 und 10 mrad. Daraus resultieren je nach Fokussierung unterschiedliche Fokusabstände, die in Tabelle 3.1 zusammengefasst sind.

Brennweite	Fokusbrennweite	Fokusabstand Bifokal 0,5	Fokusabstand Bifokal 1,0
$f = 100 \text{ mm}$	0,3 mm	0,5 mm	1,0 mm
$f = 150 \text{ mm}$	0,45 mm	0,75 mm	1,5 mm

Tabelle 3.1: Fokusabstand bei den eingesetzten Bifokalloptiken für unterschiedliche Fokussierungen und der daraus resultierende Fokusbrennweite.

Charakteristisch für diese Art der Doppelfokustechnik ist die resultierende Intensitätsverteilung als Funktion der Fokussierung, siehe Bild 3.2. Im Unterschied zur Doppelfasertechnik ist lediglich im Fokus die Leistungsdichteverteilung rotationssymmetrisch. Oberhalb der Brennebene schneiden sich die Teilstrahlen, es ist eine Überlagerung in den Messungen zu erkennen. Unterhalb der Brennebene zeichnen sich die halbkreisförmigen Teilstrahlen ab [50].

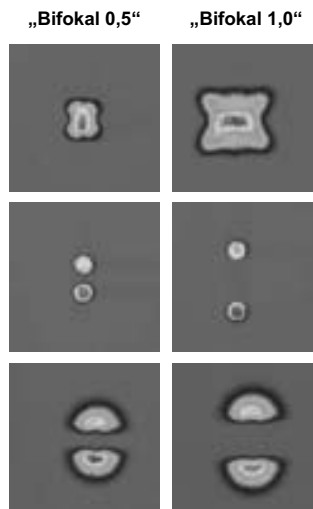


Bild 3.2: Messung der Intensitätsverteilung oberhalb (Reihe oben), in (mittlere Reihe) und unterhalb (Reihe unten) der Brennebene bei den beiden verwendeten Strahlteileroptiken mit festem Fokusabstand [50].

Bei den eingesetzten Bifokalloptiken besteht die Möglichkeit, durch laterales Verschieben der Keilplatten die Leistungsverteilung auf beide Teilstrahlen in gewissem Umfang einzustellen. Leider konnte in keiner Stellung eine völlige Gleichheit beider Teilstrahlen erzielt werden, da die Absorptions- und Beugungseffekte im abgelenkten

Teilstrahl durch eine Verschiebung der Keilplatten nicht vollständig kompensiert werden konnten.

Fokusmatrixoptik

Mit einer Anpassungskonstruktion der am IFSW konstruierten Fokusmatrixoptik [50] können unter Verwendung zweier Bearbeitungsköpfe BEO D70 mit jeweils einer Bifokaloptik bis zu 4 räumlich getrennte Foki auf das Werkstück abgebildet werden. Mit dieser Optik können auf sehr einfache und flexible Art verschiedene Anordnungen der Einzelfoki bei verschiedenen Fokusabständen untersucht werden. Die räumliche Verstellung der Foki erfolgt dabei durch am Grundkörper angebrachte x-y-z- Positioniereinheiten, auf die jeweils eine Fokussieroptik montiert ist. Die Justage kann mit einer Genauigkeit von bis zu $\frac{5}{100}$ mm erfolgen. In Bild 3.3 ist diese Fokusmatrixoptik als 3D- CAD Modell mit zwei Flanschplatten und einer Fokussieroptik der Baureihe BEO D70 mit Bifokaloptik dargestellt.

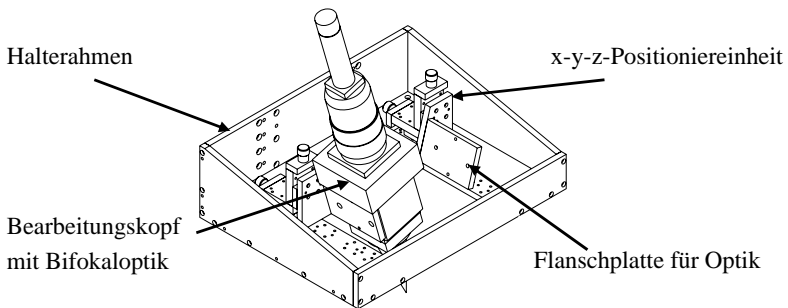


Bild 3.3: Fokusmatrixoptik Halterung für zwei Einzeloptiken des Typs BEO D70. Stufenlos einstellbarer Fokusabstand und Fokusslage mittels x-y-z- Positioniereinheiten.

Auf den Einsatz einer zweiten Strahlteileroptik wurde verzichtet, da die Leistung des zweiten zur Verfügung stehenden Lasers mit 3 KW bei Aufteilung in zwei Einzelstrahlen nicht zu einem prozesssicheren Tiefschweißeffekt in Aluminium ausgereicht hätte (vgl. Kapitel 2.1.1).

Schweißkopf

Als letztes Glied zwischen Optik und dem Werkstück beeinflusst der Bearbeitungskopf im Gegensatz zur Bearbeitungsoptik in keiner Weise die Strahlführung oder -formung. Grundsätzliche Aufgabe des Bearbeitungskopfs ist die Gewährleistung einer reproduzierbaren Zuführung der Prozessmedien, wie Schutzgas und Zusatzwerkstoff.

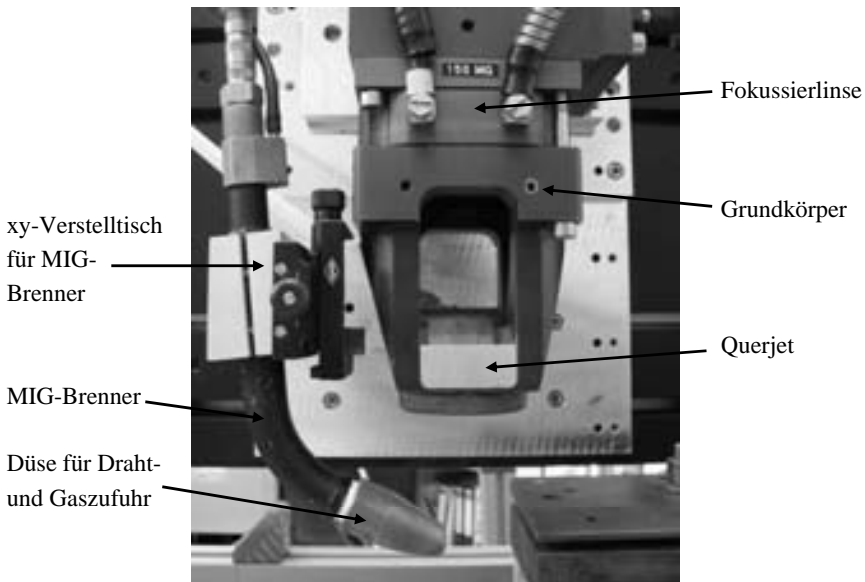


Bild 3.4: Bearbeitungskopf zum Laserstrahlschweißen mit integrierter Schutzglaswechseleinheit, Querjet sowie Draht- und Schutzgaszufuhr, Bezeichnungen siehe Text.

Der am IFSW entwickelte Bearbeitungskopf [64] bietet alle oben genannten Funktionen (Bild 3.4). Der Grundkörper ist direkt unterhalb der Fokussierlinse angebracht. Der Zusatzdraht wird über einen Standard MIG-Brenner an die Bearbeitungsstelle gebracht und kann mit Hilfe des xy-Positioniereinheit exakt positioniert werden. Somit läuft der Draht während des Prozesses stabil und reproduzierbar in das Schmelzbad.

Um das aufgeschmolzene Material vor Oxidation zu schützen wird koaxial zum Zusatzdraht ein Schutzgas an die Schweißstelle geführt. Voraussetzung für gleichbleibende Prozessverhältnisse ist ebenso ein von Schmutz unbeeinflusster Strahlengang. Deshalb muss der Bearbeitungskopf einen effektiven Schutz der Fokussieroptik vor Schweißspritzern und Rauch bieten. Unterhalb der Fokussiereinheit ist deshalb ein sogenannter Querjet eingebaut. Diese quer zur Strahlachse führende Luftströmung sorgt dafür, dass während dem Schweißen entstehende Spritzer sowie Schweißschmrauch effektiv abgelenkt werden.

4 Einflussmöglichkeiten auf die Schmelzbadströmung

Die komplexe Überlagerung der in der Theorie und Simulation identifizierten einzelnen Strömungskomponenten bietet eine Vielzahl an Ansatzpunkten, um die resultierende Nahtgeometrie zu beeinflussen. So kann neben der naheliegenden Variation der Kapillaranzahl und deren Anordnung auch über zunächst untergeordnet erscheinende Parameter wie Art und Zuführung des Prozessgases oder auch die Verwendung von elektromagnetischen Volumenkräften eine signifikante Beeinflussung der Schmelzbadströmung und damit der daraus resultierenden Nahtgeometrie erzielt werden. In diesem Kapitel wird auf die unterschiedlichen Möglichkeiten der Schmelzbadbeeinflussung eingegangen und die zugrundeliegenden Mechanismen diskutiert.

4.1 Einflüsse durch die Prozessgaszufuhr

Ausgehend von dem Wunsch, die Oxidation der Schmelzbadoberfläche während des Schweißprozesses zu verhindern, hat sich die Zuführung von Helium oder Argon als Prozessgas für das Laserstrahlschweißen etabliert. Abgesehen vom eingesetzten Gas oder Gasmisch kann auch durch die Gestaltung und Positionierung der Prozessgasdüse Einfluss auf die Qualität des entstehenden „Prozessgaspolsters“ über dem Schmelzbad genommen werden. Die damit einhergehenden Einflüsse auf die Prozessstabilität und Nahtqualität werden in Abschnitt 4.1.2 erläutert.

4.1.1 Düsenkonzepte

Die einfachste Möglichkeit, eine effiziente Prozessgaszufuhr zu erzielen, bietet der Einsatz eines geraden Rohres ohne weitere strömungsmechanischen Komponenten. Darüber hinaus ermöglicht die Integration von Blenden oder Formstücken am Austrittsende des Rohres einen Eingriff in die räumliche Ausdehnung des entstehenden Prozessgaspolsters über dem Schmelzbad. Dieses Prozessgaspolster sollte in seiner räumlichen Ausdehnung möglichst ohne Einwirbelung von Umgebungsatmosphäre den gesamten schmelzflüssigen Bereich abdecken. Daher ist eine laminare Staupunkt-

strömung, wie sie auch mit Hilfe eines geraden Rohres realisiert werden kann, von besonderem Vorteil (vgl. auch Bild 4.1).

Betrachtet man zunächst das gerade Rohr konstanten Querschnitts ohne weitere Düsen- einbauten als den grundlegendsten aller Fälle, so liegt, eine laminare Rohrströmung vorausgesetzt, am Düsenaustritt ein Bereich laminarer Kernströmung vor, dessen Ausdehnung mit dem Durchmesser der Düsenöffnung skaliert [68]. Auf eine zeitgleiche Applikation von Laserstrahlung musste im vorliegenden Versuchsaufbau verzichtet werden. Die bei einem typischen Laserstrahlschweißprozess entstehenden thermischen Effekte und Metaldampfströmungen aus der Kapillare werden in der folgenden Betrachtung nicht berücksichtigt. Beim Auftreffen der Strömung auf ein Werkstück bildet sich, in Abhängigkeit vom Anstellwinkel der Düse, ein „Prozessgaspolster“ über dem Werkstück aus. Dieses ist gekennzeichnet durch einen Staupunkt und eine deutliche Schichtung der Isobaren über dem Werkstück, wie sie in Schlierenaufnahmen zu erkennen sind (Bild 4.1). Die laterale und axiale Ausdehnung des Prozessgaspolsters korreliert entsprechend den Gesetzmäßigkeiten der laminaren Rohraustrittsströmung mit dem Düsendurchmesser.

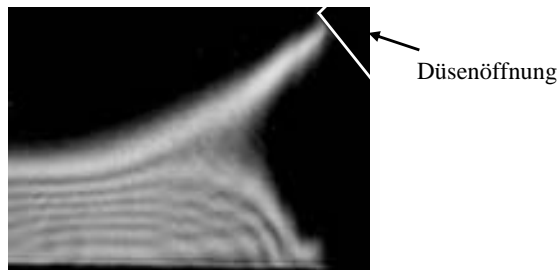


Bild 4.1: Dichteverteilung des Prozessgases beim Auftreffen auf das Werkstück. Austritt aus geradem Rohr, Argon 800NI/h.

Besonders im Hinblick auf eine Erhöhung der Integrationsdichte des Bearbeitungskopfes und der damit verbundenen Verringerung der Störkontur ist auch eine gemeinsame Zuführung von Prozessgas und Zusatzwerkstoff, beispielsweise in Form der koaxial zum Zusatzdraht erfolgenden Gaszuführung, möglich. Pistolenköpfe für das MIG-Schweißen, wie sie häufig auch in Laserschweißanlagen eingesetzt werden, ermöglichen eine zum zugeführten Zusatzdraht koaxiale Prozessgaszuführung. Die hinsichtlich einer geringeren Störkontur entsehenden Vorteile werden allerdings normalerweise durch Beeinträchtigungen der Güte der Schutzgasabdeckung erkauft.

So führen die eingesetzten Ringspaldüsen der Pistolenköpfe zu einer deutlichen Steigerung des Anteils der eingemischten Umgebungsluft im Prozessgaspolster. Ursache

hierfür ist die drastische Reduzierung der laminaren Kernströmung. In erster Näherung entspricht die Kernströmungslänge eines Spaltes derjenigen eines Rohres mit einem der Spaltbreite entsprechenden Durchmesser. Dies führt besonders bei höheren Durchflussraten und den damit verbundenen höheren Strömungsgeschwindigkeiten schnell zur Turbulenzbildung am Düsenaustritt (Bild 4.2).

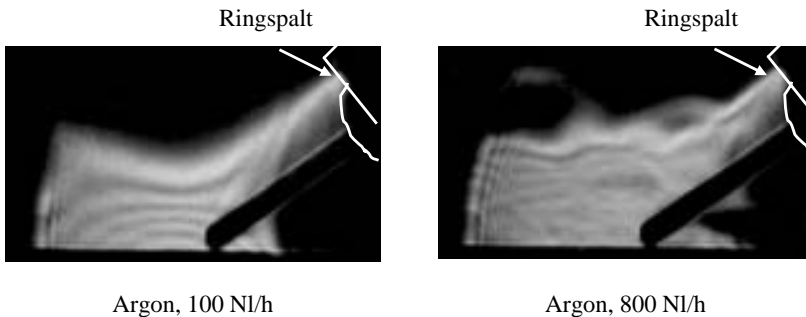


Bild 4.2: Prozessgaspolster über dem Werkstück bei Verwendung einer coaxialen Prozessgaszuführung zum Zusatzdraht mittels einer Ringspaldüse (vgl. Bild 3.11).

Eine weitere Verstärkung der Turbulenzbildung erfolgt bei Verwendung von Stützstegen im Ringspalt zwischen Drahtdüse und Düsenmantel, wie sie bei zylindrischen Düsen mit verringerter Störkontur eingesetzt werden. Die damit einhergehende Verringerung der Ringspaltfläche führt zu einer Erhöhung der Ausströmgeschwindigkeit, was bereits bei geringen Durchflussmengen zu einem starken Abflachen des Prozessgaspolsters führt (Bild 4.3 links). Bei höheren Durchflussmengen erfolgt durch die Vielzahl der zwischen den Stützstegen entstehenden Einzelaustritte mit sehr geringer laminarer Kernströmungslänge eine noch stärkere Verwirbelung des ausströmenden Prozessgases als in allen vorigen Fällen (Bild 4.3 rechts).

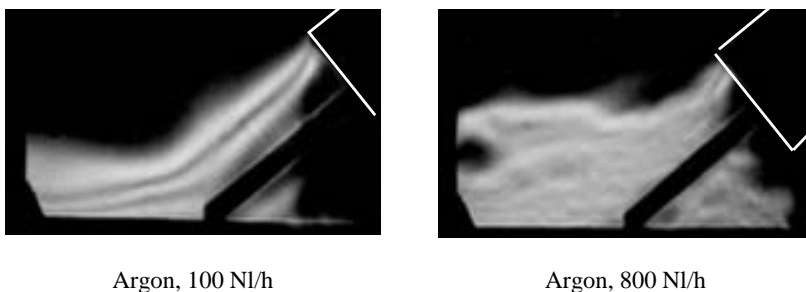


Bild 4.3: Prozessgaspolster über dem Werkstück bei Verwendung einer coaxialen Prozessgaszuführung über Ringspaldüse mit Stützstegen an der Drahtdüse (vgl. Bild 3.12).

Der Umstand, dass eine effiziente Prozessgasabdeckung nur durch ein möglichst weit ausgedehntes, unverwirbeltes Prozessgaspolster realisiert werden kann, erfordert im Falle des Einsatzes einer coaxialen Schutzgaszuführung mit geringer Störkontur die Anzahl der Stützstege von 8 auf 3 zu reduzieren und damit die Ausströmgeschwindigkeit bei konstantem Durchfluss deutlich zu verringern. Zudem wurde an der Unterseite des Düsenmantels eine Hilfsbohrung eingebracht, die den Aufbau eines Prozessgaspolsters unter der Düse ermöglichen soll (Bild 4.4). Dadurch kann der durch die Vorschubgeschwindigkeit (bei schleppender Anordnung) und den Venturi-Effekt des ausströmenden Gases eingeogene Anteil an Umgebungsatmosphäre verringert werden. Das dabei entstehende Prozessgaspolster entspricht nahezu dem einer Ringspaltdüse (Bild 4.5).

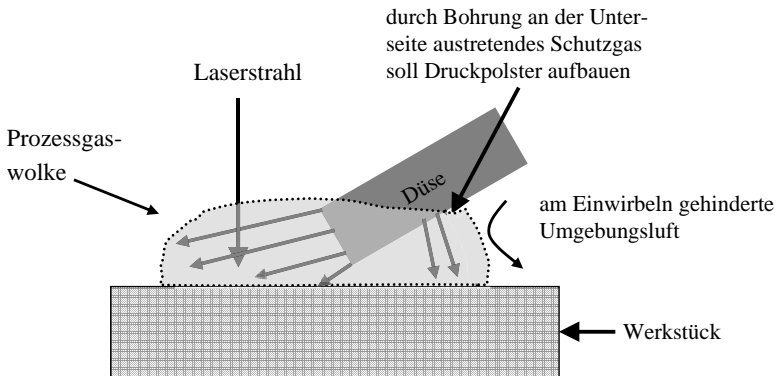
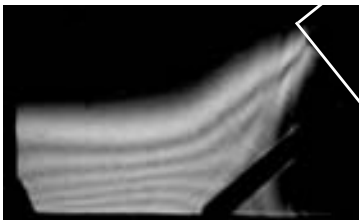
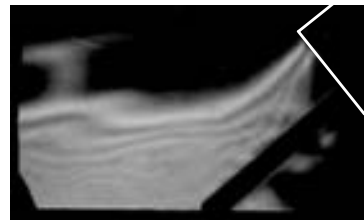


Bild 4.4: Prinzipskizze zur Funktionsweise der Hilfsbohrung am Düsenmantel.



Argon, 100 NI/h



Argon, 800 NI/h

Bild 4.5: Prozessgaspolster über dem Werkstück bei Verwendung einer coaxialen Prozessgaszuführung über Ringspaltdüse mit Stützstegen an der Drahtdüse. Hilfsbohrung an der Unterseite des Düsenmantels.

Die Betrachtung dieses quasi „statischen“ Falles, ohne die während des Laserschweißprozesses entstehenden thermischen und strömungsrelevanten Effekte des Schmelzbades und der Metaldampffackel über der Kapillare zu berücksichtigen, gibt nur einen geringen Aufschluss über die tatsächliche Güte der Prozessgasabdeckung.

Besonders für die aus Gründen der Prozessstabilität bevorzugte Drahtzuführung im Vorlauf zum Laserstrahl (schleppende Zuführung) bildet die Metaldampffackel ein geradezu unüberwindliches Hindernis bezüglich einer Prozessgasabdeckung des nachlaufenden Schmelzbades. Für die nachfolgend diskutierten Effekte des Prozessgases wurde daher eine stechende Gaszuführung durch ein gerades Rohr unmittelbar über dem nachlaufenden Schmelzbad gewählt, die Drahtzuführung erfolgte dagegen schleppend im Vorlauf zum Schmelzbad (Bild 4.6).

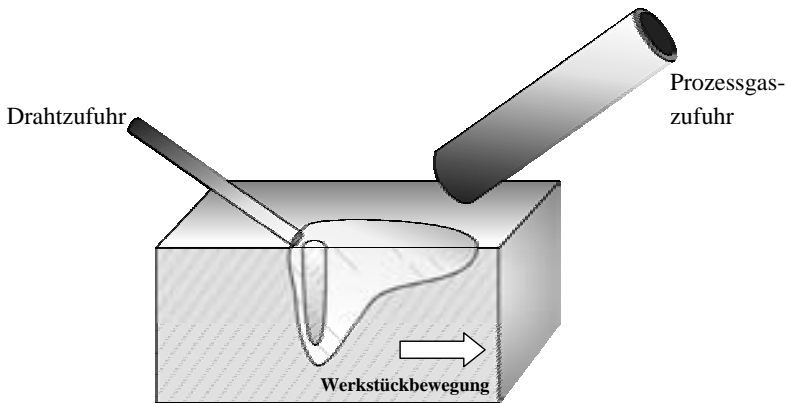


Bild 4.6: Schleppende Drahtzuführung bei stechender Prozessgaszuführung.

5 Bewertung und weiterführender Ansatz

Die im vorigen Kapitel vorgestellten Möglichkeiten zur Einflussnahme auf Schmelzbaddurchmischung und Nahtgeometrie zeigen, wie empfindlich die Dynamik des Schmelzbades auf die Variation einzelner Prozessgrößen reagiert – oder positiv formuliert: mit welchem vergleichsweise geringen Aufwand zum Teil beträchtliche Auswirkungen erzielt werden können.

Neben der unterschiedlichen Effizienz in Bezug auf Homogenisierung der Schmelzbaddurchmischung mit Silizium bei möglichst hohem Prozesswirkungsgrad gilt es natürlich auch die unterschiedliche Investkosten im Blick zu behalten. Im Folgenden soll daher ein qualitativer Überblick über die entsprechenden Potenziale gegeben werden. In Tabelle 5 sind die qualitativen Größen gegenübergestellt. Der Funktionalitätsindex wird durch die Summation der Bewertungen der Einflussmöglichkeiten gebildet, der Kosten/Nutzen-Index erweitert den Funktionalitätsindex um die Investkosten.

	Beeinflussung Nahtgeometrie	Beeinflussung Schmelzbaddurchmischung	Funktionalitätsindex	Investkosten	Kosten/Nutzen-Index
Oberflächenaktives Prozessgas	+	+	2	++	4
Externe Stromzuführung	+	++	3	+	3
Multifokus	++	++	4	--	2

Tabelle 5: Funktionalitäts- und Kosten/Nutzen-Indizierung der einzelnen Verfahren (++ gut geeignet/kostengünstig; + geeignet/geringer Invest; 0 neutral; - wenig geeignet/hohes Invest; -- ungeeignet/sehr hoher Invest). Auf eine Bewertung der Kombination der einzelnen Verfahren wurde verzichtet, im Falle der zusätzlichen Zuführung eines aktiven Schutzgases konnten die auftretenden Effekte nicht signifikant gesteigert werden, weshalb sie nicht in der Tabelle aufgeführt werden.

6 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit hat sich zum Ziel gesetzt, die Möglichkeiten einer Einflussnahme auf die Schmelzbadströmung und einen damit zu erzielenden homogenisierenden Effekt auf die Verteilung des eingebrachten Zusatzwerkstoffes zu beleuchten. Neben den prozessimmanenten Parametern wie Prozessgas und Vorschubgeschwindigkeit wurden auch eine externe Stromzufuhr sowie die Anwendung mehrerer Teilstrahlen innerhalb eines Schmelzbades untersucht.

Dabei hat sich die Verwendung eines geeigneten Prozessgases bzw. der Verzicht auf ein inertes Schutzgas als interessante Möglichkeit zur Steigerung der Siliziumeinmischung und Reduzierung des sogenannten Nagelkopfes erwiesen. Der zugrundeliegende Effekt ist im hier vorliegenden Fall allerdings nicht eine Umkehrung der Marangoni-Strömung aufgrund der oberflächenaktiven Gaskomponenten, sondern vielmehr eine Unterdrückung der nach außen gerichteten Marangoni-Strömung durch eine Oxidabdeckung der Schmelzbadoberfläche. Die damit einhergehende Verschlechterung der Nahtoberraupenqualität sowie der drastische Rückgang dieses Einflusses mit steigender Vorschubgeschwindigkeit beschränken allerdings die Nutzung des Effektes. Ab einer Vorschubgeschwindigkeit von ca. 3 m/min konnten keine signifikanten Einflüsse auf die Nahtgeometrie und Schmelzbadmischung mehr festgestellt werden. Über die Wirksamkeit oberflächenaktiver Legierungselemente, wie dies für Schwefel in Stahllegierungen bekannt ist, kann an dieser Stelle keine Aussage getroffen werden.

Weiterhin konnte festgestellt werden, dass die oben beschriebenen Effekte eine deutliche Abhängigkeit von der Qualität der Prozessgaszuführung zeigen. Die aus Gründen der Zugänglichkeit häufig eingesetzte, zum Zusatzdraht konzentrisch ausgeführte Prozessgaszuführung kann hier nicht als zielführend bewertet werden. Eine stechende Gaszuführung, die auch den Bereich des nachlaufenden Schmelzbades abdeckt, ohne die Metaldampffackel über der Kapillare umströmen zu müssen, hat hier klare Vorteile.

Der Einsatz einer externen Stromquelle bietet die Möglichkeit, über die im Schmelzbad erzeugten und mit der Stromstärke steigenden elektromagnetischen Volumenkräfte

7 Literaturverzeichnis

- [1] DIN 8593: *Fertigungsverfahren Fügen. Fügen durch Schweißen - Einordnung / Unterteilung*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [2] HÜGEL, H.: *Strahlwerkzeug Laser: Eine Einführung*. Teubner Verlag, Stuttgart, 1992.
- [3] ARATA, Y.: *Fundamental characteristics of high energy density beams in material processing*. In: Proc. of the Materials Processing Conference ICALEO 86.: Laser Institute of America (LIA), 1986, S. 73.
- [4] DAUSINGER, F.: *Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und Prozesseffektivität*. Universität Stuttgart, Habilitationsschrift 1995. Stuttgart: Teubner Verlag, 1995.
- [5] HÜGEL, H.; DAUSINGER, F.: *Fundamentals of laser-induced processes*. In: Landolt-Börnstein - Group VIII Advanced Materials and Technologies, Volume 1C, Springer Berlin Heidelberg, 2004, S. 25 ff
- [6] DAUSINGER, F.; GREF, W.: *Braucht man zum Schweißen starke Fokussierbarkeit?* Tagungsband der Stuttgarter Lasertage (SLT'01), Stuttgart, 2001, S. 203.
- [7] HÜGEL, H. ET AL.: *Investigations on fundamental phenomena as basis for high quality laser welding*. In: Proc. 5th ECLAT, ed G. Sepold, Düsseldorf 1994, S. 63.
- [8] BECK, M.: *Modellierung des Tiefschweißens*. Universität Stuttgart, Dissertation, Teubner, Stuttgart 1996, (Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW).
- [9] FUHRICH, T; BERGER, P.; HÜGEL, H.: *Marangoni effect in deep penetration welding of steel*. Proc. ICALEO 1999, ed. LIA, San Diego, CA 1999, S. E-166.

- [70] LEIMSER, M.; DAUSINGER, F.; HÜGEL, H.: *Melt pool dynamics and element distribution in laser welding of aluminium alloys with filler wire*. In: Proc 3rd Int. WLT-Conf. On Lasers in Manufacturing, ed. WLT, München, 2005, S.61.
- [71] „Laserschweißen unter Stromfluß“ Offenlegungsschrift DE 101 28 793 A 1
- [72] KILLING, U.: *Kompendium der Schweißtechnik*, Bd.1, Verfahren der Schweißtechnik, 2. Auflage, DVS-Verlag 2002.
- [73] DVS-Merkblatt 3218: *Strahlformung für das Schweißen metallischer Werkstoffe mit dem Laser*. DVS- Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V., 2005.

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 CO₂-Laserschneiden von Metallen
1993, 130 Seiten, ISBN 3-519-06207-0

Rudlaff, Thomas

Arbeiten zur Optimierung des Umwandlungshärtens 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-Lasern
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

Grünewald, 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

Griebisch, 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

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 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 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 CO₂-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

Pläß, Wilfried

Zerstörschwellen und Degradation von CO₂-Laseroptiken

1998, 158 Seiten, ISBN 3-519-06235-6

Schaller, Markus K. R.

Lasergestützte Abscheidung dünner Edelmetallschichten 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

Fluiddynamische und elektrophysikalisch optimierte Entladungsstrecken für CO₂-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 Zerspaltung

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 CO₂-

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 magnetofluiddynamische 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 Laser gasentladungen
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

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 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 Weichlötlens 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 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 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 3-8316-0460-8

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. habil. 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 Fokusmatrixtechnik

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