

Laser in der Materialbearbeitung  
Forschungsberichte des IFSW

D. Lindenau  
Magnetisch beeinflusstes Laserstrahlschweißen

# **Laser in der Materialbearbeitung**

## **Forschungsberichte des IFSW**

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. habil. Thomas Graf, Universität Stuttgart  
Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW)

Das Strahlwerkzeug Laser gewinnt zunehmende Bedeutung für die industrielle Fertigung. Einhergehend mit seiner Akzeptanz und Verbreitung wachsen die Anforderungen bezüglich Effizienz und Qualität an die Geräte selbst wie auch an die Bearbeitungsprozesse. Gleichzeitig werden immer neue Anwendungsfelder erschlossen. In diesem Zusammenhang auftretende wissenschaftliche und technische Problemstellungen können nur in partnerschaftlicher Zusammenarbeit zwischen Industrie und Forschungsinstituten bewältigt werden.

Das 1986 gegründete Institut für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart (IFSW) beschäftigt sich unter verschiedenen Aspekten und in vielfältiger Form mit dem Laser als einem Werkzeug. Wesentliche Schwerpunkte bilden die Weiterentwicklung von Strahlquellen, optischen Elementen zur Strahlführung und Strahlformung, Komponenten zur Prozessdurchführung und die Optimierung der Bearbeitungsverfahren. Die Arbeiten umfassen den Bereich von physikalischen Grundlagen über anwendungsorientierte Aufgabenstellungen bis hin zu praxisnaher Auftragsforschung.

Die Buchreihe „Laser in der Materialbearbeitung – Forschungsberichte des IFSW“ soll einen in der Industrie wie in Forschungsinstituten tätigen Interessentenkreis über abgeschlossene Forschungsarbeiten, Themenschwerpunkte und Dissertationen informieren. Studenten soll die Möglichkeit der Wissensvertiefung gegeben werden.

# **Magnetisch beeinflusstes Laserstrahlschweißen**

von Dr.-Ing. Dirk Lindenau  
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft  
München

Als Dissertation genehmigt  
von der Fakultät für Maschinenbau  
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel  
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. habil. Uwe Schumacher

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

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2006

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 2007

ISBN 978-3-8316-0687-0

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München  
Tel.: 089-277791-00 · [www.utz.de](http://www.utz.de)

# Kurzfassung der Arbeit

Für das Laserstrahltiefschweißen ist die Prozessstabilität eine wesentliche Voraussetzung, damit das Verfahren in der Serienfertigung eingesetzt werden kann. Während beim Schweißen von Stahlblechen hauptsächlich die Beschichtungen für den Korrosionsschutz die Nahtqualität beeinträchtigen können, sind beim Schweißen von Aluminium besonders die Form und das Verhalten der Dampfkapillare für das Ergebnis verantwortlich. Ausgehend von Berichten in der Literatur wird in dieser Arbeit bestätigt, dass der Laserschweißprozess durch elektromagnetische Kräfte beeinflusst werden kann. Es ist das Ziel dieser Arbeit, diese neuen Prozessansätze zu verstehen und auf Anwendungsmöglichkeiten in der Produktion zu untersuchen.

Aufgrund der hohen Schweißtemperaturen ist die beobachtete Wirkung weder bei Stahl noch bei Aluminium auf einen ferromagnetischen Effekt zurückzuführen. Es ist vielmehr eine Lorentz-Kraft im Schmelzbad, bedingt durch einen elektrischen Strom und ein Magnetfeld. Bei der theoretischen und experimentellen Untersuchung zeigt sich, dass im Schweißprozess aufgrund mehrerer Ursachen Ströme fließen und verschiedene Effekte aus dem Bereich der Elektrodynamik, Plasmaphysik, Magnetohydrodynamik und Thermophysik auftreten. Es wird ferner erkennbar, dass der Hauptgrund für das deutliche Auftreten der magnetischen Beeinflussung beim CO<sub>2</sub>-Laser durch die Eigenschaften des Plasmas bedingt ist und dort ein Strom fließen muss.

Beim Dauerstrich-Festkörperlaser kann durch Zufuhr eines externen Stroms bei angelegtem Magnetfeld der Schweißprozess ebenfalls beeinflusst werden. Die vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten von Magnetfeldausrichtung, Polung und Stromzufuhr werden in einem großen Rasterversuch für Aluminium auf nützliche Fälle untersucht. Über die Lenkung der Strömung im Schmelzbad kann sowohl die Prozessstabilität erhöht, als auch der Nahtquerschnitt seitlich verschoben werden. Letzteres kann z.B. beim Schweißen von Kehlnähten den Anbindungsquerschnitt erhöhen. Als nicht sinnvoll erweist sich, den Prozess über eine periodische Anregung mit Wechselstrom in Schwingung zu versetzen.

Um einen positiven Einfluss gezielt in der Produktion zu nutzen, ist die prozesssichere Bereitstellung eines Magnetfeldes nötig. Wegen der Nähe zum heißen Schweißprozess müssen die Magnete besonders ausgelegt werden.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung der Arbeit .....</b>	<b>5</b>
<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>7</b>
<b>Verzeichnis der Symbole .....</b>	<b>11</b>
<b>Extended Abstract.....</b>	<b>15</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>21</b>
1.1 Laserschweißen und Prozessstabilität .....	21
1.2 Stabilisierung des Prozesses durch elektromagnetische Kräfte .....	30
1.3 Aufbau der Arbeit.....	34
<b>2 Klärung des physikalischen Hintergrundes .....</b>	<b>35</b>
2.1 Beeinflussen des Laserstrahlschweißens durch magnetische Felder .....	35
2.2 Mögliche Effekte auf das Plasma.....	37
2.2.1 Erzeugung und Eigenschaften von Plasma .....	37
2.2.2 Beeinflussung eines Plasmas durch Magnetfelder.....	41
2.2.2.1 Betrachtung von Einzelteilchen .....	42
2.2.2.2 Integrale Betrachtung .....	45
2.2.3 Thermionische Emission und Photoeffekt.....	50
2.2.4 Modellvorstellung zum Stromfluss im Plasma.....	51
2.3 Mögliche Effekte auf die Schmelze .....	53
2.3.1 Grundlagen der Magnetohydrodynamik .....	53
2.3.2 Beeinflussungen der Schmelze .....	55
2.3.2.1 Hartmannströmung.....	55
2.3.2.2 MHD-Turbulenz.....	57
2.3.2.3 Induktionspumpen.....	58
2.3.2.4 Elektrowirbelströmung.....	59
2.3.2.5 Pincheffekt .....	60
2.3.2.6 Oberflächenstabilität .....	60
2.3.2.7 Kraftwirkung eines plasmainduzierten Stroms .....	61
2.3.3 Beeinflussung der Erstarrung.....	62

---

2.4	Ursprung eines thermoelektrischen Stroms.....	64
<b>3</b>	<b>Fragestellung und Zielsetzung der Arbeit .....</b>	<b>67</b>
<b>4</b>	<b>Untersuchung der auftretenden Phänomene .....</b>	<b>69</b>
4.1	Versuchsaufbau und technische Erzeugung des Magnetfeldes .....	69
4.1.1	Entwurf und Bau eines Permanentmagneten .....	70
4.1.2	Entwurf und Bau eines Elektromagneten.....	73
4.2	Beeinflussen der Schweißung durch ein Magnetfeld .....	75
4.2.1	Versuche mit dem CO <sub>2</sub> -Laser .....	75
4.2.2	Versuche mit dem Festkörperlaser.....	78
4.3	Messen des prozesseigenen Stroms ohne zusätzliches Magnetfeld .....	81
4.3.1	Versuchsaufbau .....	81
4.3.2	Versuche mit dem Nd:YAG-Laser.....	83
4.3.3	Versuche mit dem CO <sub>2</sub> -Laser .....	87
4.4	Messen eines aus der Kapillare austretenden Stroms.....	90
4.5	Messen eines induzierten Stroms bei einem zusätzlichen Magnetfeld .....	92
4.6	Zusammenfassung der untersuchten Phänomene .....	95
<b>5</b>	<b>Einfluss von Magnetfeldern und externem Strom .....</b>	<b>97</b>
5.1	Varianten der elektromagnetischen Beeinflussung .....	97
5.2	Versuchsaufbau und Referenzprozesse .....	99
5.3	Konstantes Magnetfeld und Gleichstrom bei schleppender Drahtzufuhr ....	104
5.3.1	Kraftwirkung in Schweißrichtung.....	107
5.3.2	Kraftwirkung entgegen der Schweißrichtung .....	110
5.3.3	Kraftwirkung zur Seite.....	112
5.4	Konstantes Magnetfeld und Gleichstrom bei stechender Drahtzufuhr.....	115
5.4.1	Kraftwirkung in Schweißrichtung.....	116
5.4.2	Kraftwirkung entgegen der Schweißrichtung .....	117
5.4.3	Kraftwirkung zur Seite .....	120
5.5	Konstantes Magnetfeld und Wechselstrom bei schleppender Drahtzufuhr ..	125
5.5.1	Versuchsaufbau mit zusätzlichem Wechselstrom.....	125
5.5.2	Pendelnde Kraftwirkung entlang der Schweißrichtung .....	126
5.5.3	Pendelnde Kraftwirkung zur Seite .....	128
5.6	Konstantes Magnetfeld und Wechselstrom bei stechender Drahtzufuhr ....	131

5.6.1	Pendelnde Kraftwirkung entlang der Schweißrichtung .....	131
5.6.2	Pendelnde Kraftwirkung zur Seite .....	135
5.7	Zusammenfassung des Einflusses externen Stroms .....	138
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>141</b>
<b>A</b>	<b>Anhang Magnettechnik</b> .....	<b>145</b>
A.1	Grundlagen der Magnettechnik .....	145
A.2	Randbedingungen für den Einsatz von Magneten in der Schweißtechnik...	149
A.3	Einsatz von Elektromagneten.....	150
A.3.1	Berechnung eines Magnetkreises nach der Netzwerkmethode .....	151
A.3.2	Auswahl eines weichmagnetischen Werkstoffes .....	159
A.4	Einsatz von Dauermagneten.....	162
A.4.1	Grundlagen hartmagnetischer Werkstoffe .....	162
A.4.2	Auswahl eines hartmagnetischen Werkstoffes .....	163
	<b>Literatur- und Quellenverzeichnis</b> .....	<b>165</b>



# 1 Einleitung

## 1.1 Laserschweißen und Prozessstabilität

Das Laserstrahlschweißen von Stahl und Aluminium hat im Automobilbau und in der Luftfahrt eine breite Akzeptanz als Fertigungsverfahren gefunden [Rapp96, Schin02, Gau04, Böhm04, Bern03, Muehu01]. Vorteilhaft im Vergleich zu anderen Schweißverfahren ist die tiefe, schmale Naht und ein geringer Wärmeeintrag bei hoher Schweißgeschwindigkeit. Bei entsprechender Prozessführung sind sehr gute Nahtqualitäten erreichbar. Hierzu kann zwar ein Schutzgas notwendig sein, es wird aber kein Vakuum wie beim Elektronenstrahlschweißen benötigt. Das Laserstrahlschweißen arbeitet berührungslos. Eine einseitige Zugänglichkeit an eine Fügestelle genügt [Dil94]. Obwohl der Lasereinsatz oft Mehrkosten für Laseraggregat-, Schutzeinrichtungen und Spanntechnik erfordert, kann sich dies aufgrund der hohen Schweißgeschwindigkeit oder der guten Nahtqualität lohnen.

Aluminium gilt im Vergleich zu unlegiertem Stahl als schwieriger schweißbar [Dil95, Zuo89]. Als Gründe hierfür werden die größere Wärmeleitfähigkeit, der geringere elektrische Widerstand, die auf der Oberfläche vorhandene Oxidhaut, die stärkere Reflexion und die dünnflüssigere Schmelze genannt. Diese Eigenschaften wirken sich auch auf den Laserschweißprozess ungünstig aus. Dennoch kann mit geeigneter Prozessführung das Schweißergebnis sicher beherrscht werden [Nied02].

Dem Schweißanwender im Karosserie-Rohbau stehen technisch zwei Lasertypen zur Auswahl. Während früher der CO<sub>2</sub>-Laser mit 10.640 nm Wellenlänge zum Einsatz kam, wird heute der Nd:YAG-Festkörperlaser mit der Wellenlänge 1.064 nm wegen seiner Vorteile ausgewählt. Es ist vor allem die Transportfähigkeit über Glasfasern, die flexible robotergeführte 3D-Schweißapplikationen möglich macht. Die kürzere Wellenlänge führt zu einer höheren Absorption der Leistung im metallischen Werkstoff und einer einfacheren Prozessführung bei Aluminium und Stahl.

Voraussetzung für einen Einsatz ist die **Prozessfähigkeit** des Schweißprozesses in Bezug auf die geforderte Nahtqualität. In den letzten Jahren wurde der Laserschweißprozess in zahlreichen Arbeiten untersucht, und mittlerweile können alle bestimmten

den Phänomene und Prozesseigenschaften erklärt werden. Dazu beigetragen haben theoretische Betrachtungen und rechnerische Simulationen [Hueg92, Daus95, Beck96, Bey95, Rad99], die eng verknüpft mit experimentellen Untersuchungen verifiziert wurden [Rapp96, Schin02, Hohen03, Muel02, Schmi94]. Besonders bedeutsam hierzu war die Entwicklung von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen, die es erlauben, sowohl das Geschehen an der Schmelzbadoberfläche im Detail zu verfolgen, als auch von Hochgeschwindigkeits-Röntgenaufnahmen, die Kapillar- und Schmelzbadform in der Tiefe zeigen [Hohen03, Muel02, Mat01, Kata98a, Kat02]. Basierend auf diesen Arbeiten soll nachfolgend der Schweißprozess in seinen wesentlichen Zusammenhängen erläutert werden.

Der Prozess unterteilt sich in mehrere **Teilvorgänge** (Bild 1). Dies sind vor allem die Bildung der Kapillare und des Schmelzbades, die Absorption und Brechung des Laserstrahls in und über der Kapillaren, die Wärmeverteilung und -ableitung im Werkstück, die Strömung des Gases in der Kapillaren und über dem Schmelzbad, die Strömung der Schmelze, das Aufschmelzen und Erstarren des Materials, Deformation und chemische Reaktionen an der Oberfläche der Schmelze und mechanische Spannungen und Verzug im Werkstück. Bild 1 zeigt im Schnitt einen typischen Schweißprozess mit der optionalen Zufuhr von Schutzgas und Zusatzdraht. Die Teilespekte sind in vielfältiger Weise miteinander gekoppelt und beeinflussen sich gegenseitig [Rad99].

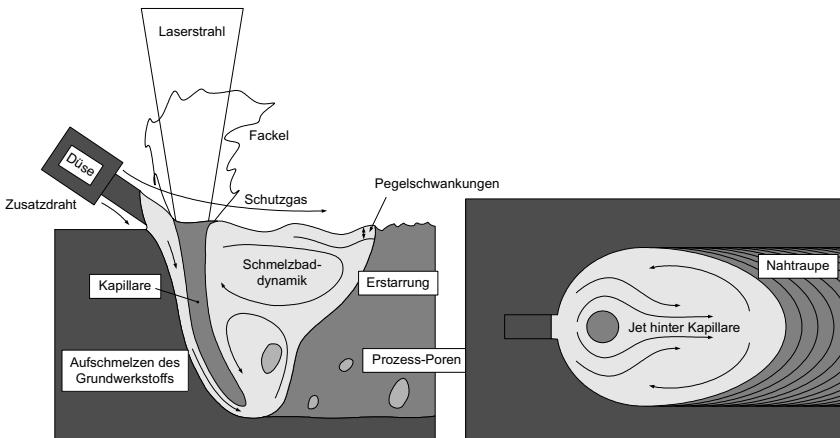


Bild 1: Laserschweißprozess mit einigen Teilvorgängen

Von der Laserstrahlung, die auf das Werkstück trifft, wird nur ein Teil absorbiert. Die **Energieabsorption** hängt generell ab von der Wellenlänge, dem Absorptionsgrad des

Materials für diese Wellenlänge, dem Auftreffwinkel, der Polarisation des Lichtes sowie der Rauhigkeit und Temperatur der Oberfläche. Bei geringer Intensität des Laserlichts wird nur wenig absorbiert und der größte Teil reflektiert (Bild 2). Bei genügender Intensität erwärmt sich die Oberfläche, und es bildet sich ein Schmelzbad. Übersteigt die Intensität eine bestimmte Schwelle (Einkoppelschwelle), führt der Verdampfungsdruck an der Auftreffstelle zu einem Verdrängen der Schmelze, und es bildet sich eine Dampfkapillare als Stichloch (Keyhole) aus. Diese ist charakteristisch für den Übergang vom Wärmeleitungs- zum Tiefschweißeffekt. Sie ermöglicht die schlanken und tiefen Nahtquerschnitte. Für den Laserstrahl wirkt sie wie eine Strahlfalle, da nun durch Mehrfachreflexion an den Wänden ein Großteil der Laserleistung absorbiert wird [Daus88, Daus95].

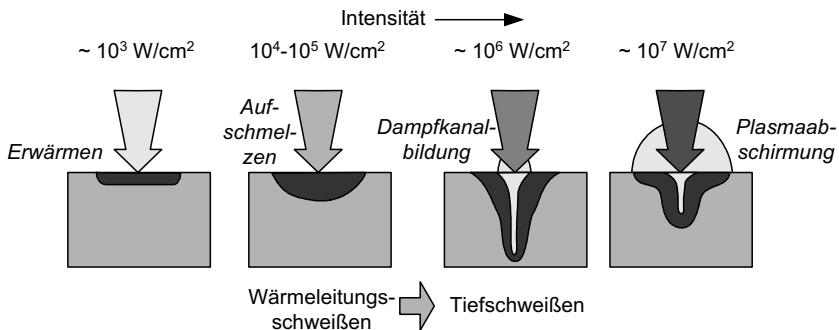


Bild 2: Übergang vom Wärmeleitungs- zum Tiefschweißen [Daus88]

Neben der Absorption an der Schmelzbadoberfläche wird ein Teil der Energie auch von dem sich bildenden **Plasma** in und über der Kapillare absorbiert („Inverse Bremsstrahlung“) und teilweise an die Schmelze übertragen. Von der absorbierten Energie fließt ein Großteil in den Grundwerkstoff ab. Ausgehend von der Laserkapillaren fällt die Temperatur nach außen durch das Schmelzbad in den Grundwerkstoff immer mehr ab. Im Schmelzbad selbst kann durch Wärmekonvektion eine ungleichmäßige Temperaturverteilung herrschen. An den Grenzlinien von Schmelz- und Verdampfungstemperatur erfolgt die Phasenumwandlung des Materials, bei der Energie aufgenommen bzw. freigesetzt wird. Ein geringer Teil der Gesamtenergie geht durch Wärmestrahlung oder abströmendes Plasma verloren. Wenn ein Zusatzdraht verwendet wird, muss auch dieser aufgeschmolzen werden.

Durch den Schweißvorschub bildet sich die **Kapillare** nach hinten geneigt aus. An ihrer Vorderseite fließt die Energie von der Kapillarwand durch den dünnen Schmelz-

film in den Grundwerkstoff. Es hat sich gezeigt, dass besonders der Quotient aus Leistung pro Fokusdurchmesser  $P_L/d_f$  für das Erreichen der Einkoppelschwellen bestimend ist [Gref01].

Auf die Kapillarwand selbst wirken unterschiedliche Kräfte. Der statische Druck im Inneren ist am Kapillargrund am größten und nimmt zur Kapillaröffnung hin ab. Dafür steigt mit der zunehmenden Ausströmgeschwindigkeit der dynamische Druck. Zudem werden hierbei Schubspannungen in der Kapillarwand induziert, die eine antreibende Wirkung auf die Schmelze haben [Rapp96]. Durch Verdampfung des Werkstoffes und den dadurch erzeugten Impuls entsteht ein Rückstoß auf die Wand. Die umgebende Schmelze wirkt sich auf die Kapillare mit verschiedenen Kräften aus. Die **Oberflächenspannung** wächst mit kleinerem Krümmungsradius und ist am Kapillargrund am größten. Weiterhin wirken der hydrostatische und der -dynamische Druck durch die Schmelzbadströmung auf die Kapillare [Beck96].

Die Zufuhr von Schutzgas, wie Helium oder Argon, hat die Abschirmung der Schmelze vor Sauerstoff und Stickstoff zum Zweck. Nach dem Austritt aus der Düse mischt sich das Gas am Rand der Strömung mit der Umgebungsluft. Daher sollte der unvermengte Kern der Gasströmung das Schmelzbad laminar abdecken [Kern99]. Beim CO<sub>2</sub>-Laser dient das Gas auch zur Unterdrückung der Plasmabildung über dem Keyhole, was beim Nd:YAG-Laser nicht notwendig ist. Bei dessen Wellenlänge findet keine Absorption in der Fackel durch inverse Bremsstrahlung statt. Daher kann Stahl mit dem Nd:YAG-Laser auch sehr gut ohne Schutzgas geschweißt werden. Beim CO<sub>2</sub>-Laser führt die Absorption innerhalb des Plasmas zu deutlich höheren Temperaturen in der Fackel und der Kapillare als beim Nd:YAG-Laser. Da sich mit der Temperatur auch der Brechungsindex verändert, kommt es zu einem thermischen Linseneffekt der Schweißfackel. Die Fokuslage des CO<sub>2</sub>-Laserstrahls fluktuiert daher innerhalb des Keyholes [Beck96].

Die Anwesenheit von Wasserstoff, Stickstoff und Öl in der Gasumgebung kann zu Wasserstoffporen und Nitrid-Nadeln in der Schweißnaht führen [Mat95, Kata97, Mat97, Taka01, Mat03]. Dabei spielt auch die Temperatur des Plasmas eine Rolle. Beim Schweißen mit dem CO<sub>2</sub>-Laser wird von der Oberfläche der Schmelze mehr Stickstoff absorbiert, weil dieser in dem heißeren Plasma zum Teil als freies Radikal vorliegt [Dong04].

Die **Schmelzbadodynamik** wird wesentlich durch das Impuls- und Kontinuitätsgesetz der Strömungen bestimmt. Das aufgeschmolzene Material des Grundwerkstoffes und eines eventuellen Zusatzdrahtes vor der Kapillare muss unterhalb und an der Seite