

LASER IN DER MATERIALBEARBEITUNG

Forschungsberichte des ... IFSW 

Günter Ambrosy

**Nutzung elektromagnetischer Volumenkräfte  
beim Laserstrahlschweißen**

Herbert Utz Verlag 

Laser in der Materialbearbeitung  
Forschungsberichte des IFSW

G. Ambrosy  
Nutzung elektromagnetischer  
Volumenkräfte beim Laserstrahl-  
schweißen

# **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.

# **Nutzung elektromagnetischer Volumenkräfte beim Laserstrahlschweißen**

von Dr.-Ing. Günter Ambrosy  
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. habil. Hartmut Zohm

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., 2009

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 978-3-8316-0925-3

Printed in Germany

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

# Kurzfassung

Der Lasertiefschweißprozess ist bereits weit entwickelt. Dennoch muss prozess- und materialabhängig mit Qualitätsminderungen durch Defekte gerechnet werden. Vor allem bei Aluminiumlegierungen stellen Poren und Fehlstellen nach wie vor ein erhebliches Problem dar, das zumeist prozessbedingt mit der Schmelze und ihren Strömungsverhältnissen in direktem Zusammenhang steht. Neben modifizierter Energieeinbringung und geeigneter Zufuhr von Zusatzwerkstoff, kann vor allem durch elektromagnetische Volumenkräfte direkt auf das Strömungsfeld eingewirkt werden.

Die Nutzung dieser elektromagnetischen Kräfte ist hierbei ein vielversprechender Weg, um verfahrens- und qualitätsbedingten Prozessgrenzen beim Laserstrahlschweißen entgegen zu treten.

In der vorliegenden Arbeit wird diesem neuen Ansatz zur direkten Schmelzbadbeeinflussung durch elektromagnetische Volumenkräfte systematisch Folge geleistet. Basierend auf vier klassifizierten EM-Konzepten – gemäß der grundsätzlichen Generierungsmöglichkeiten von Lorentzkräften –, erfolgt eine grundlegende Charakterisierung und Abschätzung der Schmelzbadbeeinflussung bei technisch realisierbar Strom- und magnetischer Flussdichte, anhand von aussagefähigen Kennzahlen und entsprechenden experimentellen Untersuchungen.

Mit den gewonnenen Kenntnissen über aktive Eingriffsmöglichkeiten von Volumenkräften im Schmelzbad werden zwei konkrete Beispiele für die gezielte Nutzung von elektromagnetischen Kräften beim Laserstrahlschweißen vorgestellt: zum einen eine qualitätssteigernde konduktive Methode zur Reduzierung von Prozessporen, zum anderen eine bedeutsame induktive elektromagnetische Technik zur Gestaltung bzw. zur Vermeidung des Nahtdurchhanges; insbesondere bei dicken Blechen.

Neben all diesen anwendungsbezogenen Untersuchungen kann zudem eine Antwort auf die bislang unbeantwortete Frage nach der Herkunft des „intrinsischen“ Stromes beim originären Laserstrahlschweißen gegeben werden: gestützt auf experimentelle Untersuchungen wird das laserinduzierte Plasma für dieses prozessinhärente Phänomen identifiziert, wobei die an den Plasma-Wand-Kontakten hervorgerufene Temperaturdifferenz für den Stromfluss verantwortlich ist.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b> .....	<b>5</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>7</b>
<b>Liste der verwendeten Symbole</b> .....	<b>11</b>
<b>Extended Abstract</b> .....	<b>17</b>
<b>1 Einführung</b> .....	<b>21</b>
1.1 Motivation und Zielsetzung .....	23
1.2 Aufbau der Arbeit .....	24
<b>2 Stand der Technik</b> .....	<b>25</b>
2.1 Energieeinbringung im Schmelzbad.....	25
2.1.1 Laserstrahlschweißen .....	25
2.1.2 Lichtbogenschweißen .....	28
2.1.3 Laser-Hybridschweißen.....	28
2.2 Energieumverteilung im Schmelzbad.....	29
2.2.1 Laserstrahlschweißen .....	29
2.2.2 Lichtbogenschweißen .....	30
2.2.3 Laser-Hybridschweißen.....	32
2.3 Nutzung elektromagnetischer Kräfte.....	33
2.3.1 Im Schmelzbad .....	33
2.3.2 Im Plasma .....	35
<b>3 Elektromagnetische Kräfte im Schmelzbad</b> .....	<b>37</b>
3.1 Erzeugung elektromagnetischer Kräfte .....	37
3.2 Elektromagnetische Systeme und Konzepte .....	38
3.2.1 Strömungsinduziertes Konzept.....	40
3.2.2 Intrinsisches Konzept .....	41
3.2.3 Konduktives Konzept .....	41
3.2.4 Induktives Konzept.....	42

<b>4</b>	<b>Abschätzung der elektromagnetischen Schmelzbadbeeinflussung.....</b>	<b>43</b>
4.1	Bewegungsgleichung .....	43
4.2	Kennzahlen .....	44
4.2.1	Reynoldszahl.....	45
4.2.2	Hartmannzahl.....	48
4.2.3	Wechselwirkungsparameter.....	49
4.2.3.1	Strömungsinduzierter Wechselwirkungsparameter: $N_S$ .....	49
4.2.3.2	Konduktiver Wechselwirkungsparameter: $N_K$ .....	50
4.2.3.3	Induktiver Wechselwirkungsparameter: $N_I$ .....	51
4.2.4	MHD-Belastungsparameter .....	52
4.2.4.1	Konduktiver Belastungsparameter: $K_K$ .....	53
4.2.4.2	Induktiver Belastungsparameter: $K_I$ .....	54
4.2.5	Schwerkraftbezogene Lorentzkraftdichte.....	55
4.2.5.1	Schwerkraftbezogene, strömungsinduzierte Lorentzkraftdichte: $Z_S$ .....	55
4.2.5.2	Schwerkraftbezogene, konduktive Lorentzkraftdichte: $Z_K$ .....	56
4.2.5.3	Schwerkraftbezogene, induktive Lorentzkraftdichte: $Z_I$ .....	57
4.2.6	Magnetische Weberzahl.....	58
4.2.6.1	Konduktive magnetische Weberzahl: $We_{m,K}$ .....	58
4.2.6.2	Induktive magnetische Weberzahl: $We_{m,I}$ .....	60
4.3	Abschätzung der Stromdichten im Schmelzbad .....	61
4.4	Abschätzung der Lorentzkräfte.....	63
4.4.1	Strömungsinduziertes Konzept.....	63
4.4.2	Intrinsisches Konzept.....	64
4.4.3	Konduktives Konzept .....	65
4.4.4	Induktives System.....	69
4.4.5	Gegenüberstellung der Konzepte.....	71
4.5	Resümee der Abschätzungen.....	72
<b>5</b>	<b>Versuchseinrichtung, geeignete Werkstoffe und Systemtechnik .....</b>	<b>73</b>
5.1	Bearbeitungsstation und Strahlquellen .....	73
5.2	Werkstoffe.....	74
5.3	Systemtechnik.....	74
5.3.1	Spannmittel .....	74
5.3.2	Magnettechnik .....	75
5.3.2.1	DC-Stabmagnet .....	75
5.3.2.2	DC-Hufeisenmagnet.....	76

---

5.3.2.3 AC-Magnet.....	77
5.3.3 Stromquellen.....	79
<b>6 Nachweis elektromagnetischer Schmelzbadbeeinflussung .....</b>	<b>81</b>
6.1 Intrinsisches Konzept .....	81
6.1.1 CO <sub>2</sub> - Schweißversuche.....	81
6.1.2 Nd:YAG - Schweißversuche.....	87
6.1.3 Erkenntnisse zum intrinsischen Konzept .....	88
6.2 Konduktives Konzept .....	89
6.2.1 Kombination zweier unabhängiger Parameter .....	89
6.2.1.1 CO <sub>2</sub> -Schweißversuche .....	90
6.2.1.2 Nd:YAG-Schweißversuche.....	92
6.2.2 Eigenmagnetische Kräfte .....	93
6.2.2.1 Nachweis der Kraftwirkung.....	93
6.2.2.2 Erste Ergebnisse von Modellrechnungen.....	96
6.2.2.3 Visualisierung des Strömungsfeldes .....	97
6.2.3 Erkenntnisse zum konduktiven Konzept.....	98
6.3 Induktives Konzept.....	99
6.3.1 Grundsätzlicher Funktionsnachweis.....	100
6.3.2 Demonstration des Nutzungspotentials.....	102
6.3.3 Erkenntnisse zum induktiven Konzept.....	104
<b>7 Ausgewählte praxisrelevante Aspekte .....</b>	<b>105</b>
7.1 Nutzung elektromagnetischer Kräfte zur Porenreduzierung .....	105
7.2 Nutzung elektromagnetischer Kräfte zur Vermeidung des Nahtdurchhanges ..	110
7.2.1 Konduktive Vermeidung des Nahtdurchhanges.....	111
7.2.1.1 Stromführung „längs“ .....	111
7.2.1.2 Stromführung „quer“ .....	113
7.2.2 Induktive Vermeidung des Nahtdurchhanges .....	117
<b>8 Die Herkunft des intrinsischen Stromes .....</b>	<b>123</b>
8.1 Die Rolle des laserinduzierten Plasmas.....	124
8.2 Hypothese .....	124
8.3 Experimenteller Nachweis des intrinsischen Stromes.....	126
8.4 Charakteristika des laserinduzierten Plasmas.....	132
8.4.1 Elektronendichte.....	132

---

8.4.2	Elektronentemperatur .....	132
8.4.3	Debye-Länge.....	133
8.4.4	Plasmafrequenz.....	134
8.4.5	Elektrische Leitfähigkeit.....	135
8.5	Treibende Kräfte .....	136
8.5.1	Modellvorstellung.....	137
8.5.2	Abschätzung der treibenden Kräfte .....	139
8.6	Resümee zum intrinsischen Strom.....	144
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>145</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>149</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>157</b>
	Formeln zur Induktion und Skin-Effekt Theorie .....	157
	<b>Danksagung .....</b>	<b>159</b>

# Liste der verwendeten Symbole

## Lateinische Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$A$	[ 1 ]	Absorptionsgrad
$A$	[ m <sup>2</sup> ]	Querschnittsfläche
$B$	[ T ]	Magnetische Flussdichte (Induktion)
$\hat{B}_0$	[ T ]	Amplitude der magn. Flussdichte (Induktion)
$B_{\text{extern}}$	[ T ]	Extern applizierte magnetische Flussdichte
$B_{\text{induziert}}$	[ T ]	Induzierte magnetische Flussdichte
$b_m$	[ m ]	Polschuh-Breite
$D$	[ m ]	Distanz
$d_f$	[ m ]	Fokusedurchmesser
$d_h$	[ m ]	Hydraulischer Durchmesser
$d_s$	[ m ]	Schmelzbadbreite
$d_m$	[ m ]	Polschuh-Abstand
$E$	[ V/m ]	Elektrische Feldstärke
$F_L$	[ N ]	Lorentzkraft
$f_L$	[ N/m <sup>3</sup> ]	Lorentz-Kraftdichte
$\hat{f}_L$	[ N/m <sup>3</sup> ]	Amplitude der Lorentz-Kraftdichte
$f_{L_{\text{Strömung}}}$	[ N/m <sup>3</sup> ]	Strömungsinduzierte Lorentzkraftdichte
$f_{L_{\text{Konduktiv}}}$	[ N/m <sup>3</sup> ]	Konduktiv erzeugte Lorentzkraftdichte
$f_{L_{\text{Induktiv}}}$	[ N/m <sup>3</sup> ]	Induktiv erzeugte Lorentzkraftdichte
$f_T$	[ N/m <sup>3</sup> ]	Trägheitskraftdichte
$f_D$	[ N/m <sup>3</sup> ]	Druckkraftdichte
$f_R$	[ N/m <sup>3</sup> ]	Reibungskraftdichte
$f_G$	[ N/m <sup>3</sup> ]	Schwerkraftdichte
$f_0$	[ Hz ]	Frequenz
$g_\sigma$	[ 1 ]	Korrekturfaktor
$H ; h$	[ m ]	Höhe
$I$	[ A ]	Strom
$I_K$	[ A ]	Kurzschlussstrom

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$I_B$	[ A ]	Belastungsstrom
$I_{\text{shunt}}$	[ A ]	Shunt-Strom
$j$	[ A/m <sup>2</sup> ]	Stromdichte
$j_{\text{MHD}}$	[ A/m <sup>2</sup> ]	Strömungsinduzierte Stromdichte
$j_{\text{intrinsisch}}$	[ A/m <sup>2</sup> ]	Intrinsische Stromdichte
$j_{\text{extern}}$	[ A/m <sup>2</sup> ]	Extern applizierte Stromdichte
$j_{\text{ind}}$	[ A/m <sup>2</sup> ]	Induzierte Stromdichte
$\hat{j}_{\text{ind}}$	[ A/m <sup>2</sup> ]	Amplitude der induzierten Stromdichte
$j_e$	[ A/m <sup>2</sup> ]	Elektronenstromdichte
$j_{e,\text{Pl}}$	[ A/m <sup>2</sup> ]	Elektronenstromdichte im Plasma
$j_{e,\text{L}}$	[ A/m <sup>2</sup> ]	Leitungs-Elektronenstromdichte
$j_{e,\text{th}}$	[ A/m <sup>2</sup> ]	Thermische Emissionsstromdichte
$L_c$	[ m ]	Charakteristische Länge
$L_{c,T}$	[ m ]	Charakteristische Länge der Trägheitskraftdichte
$L_{c,R}$	[ m ]	Charakteristische Länge der Reibungskraftdichte
$\ln A$	[ 1 ]	Coulomb-Logarithmus
$m$	[ kg ]	Masse
$m_e$	[ kg ]	Masse Elektron
$m_i$	[ kg ]	Masse Ion
$n$	[ m <sup>-3</sup> ]	Teilchendichte
$n_e$	[ m <sup>-3</sup> ]	Elektronendichte
$n_i$	[ m <sup>-3</sup> ]	Teilchendichte der Ionen
$n_0$	[ m <sup>-3</sup> ]	Teilchendichte der Neutralteilchen
$n_Z$	[ m <sup>-3</sup> ]	Teilchendichte der Z-fach ionisierten Teilchen
$n_{Z+1}$	[ m <sup>-3</sup> ]	Teilchendichte der (Z+1)-fach ionisierten Atome
$P$	[ W ]	Leistung
$p$	[ N/m <sup>2</sup> ]	Druck
$p_e$	[ N/m <sup>2</sup> ]	Elektronendruck
$p_m$	[ N/m <sup>2</sup> ]	Magnetischer Druck
$p_{m,K}$	[ N/m <sup>2</sup> ]	Konduktiv erzeugter magnetischer Druck
$p_{m,I}$	[ N/m <sup>2</sup> ]	Induktiv erzeugter magnetischer Druck
$p_{\text{surf}}$	[ N/m <sup>2</sup> ]	Oberflächenspannung

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$Q_Z$	[ 1 ]	Zustandssumme Z-fach ionisiert
$Q_{Z+1}$	[ 1 ]	Zustandssumme Z+1-fach ionisiert
$r$	[ m ]	Radius , Ausdehnung
$r_1 ; r_2$	[ m ]	Hauptkrümmungsradien der Oberfläche
$r_L$	[ m ]	Gemittelte Stoßparameter (Landau-Länge)
$R$	[ m ]	Radiale Plasma Ausdehnung
$R$	[ $\Omega$ ]	Widerstand
$R_i$	[ $\Omega$ ]	Innenwiderstand
$R_{shunt}$	[ $\Omega$ ]	Shuntwiderstand
$s$	[ m ]	Schmelzfilmbreite; Steg
$T$	[ K ]	Temperatur
$T_e$	[ K ]	Elektronentemperatur
$T_g$	[ K ]	Gastemperatur
$T_m$	[ K ]	Schmelztemperatur
$T_v$	[ K ]	Verdampfungsstemperatur
$T_0$	[ K ]	Temperatur im Zentrum der Plasmawolke
$T_1$	[ K ]	Temperatur am Außenrand der Plasmawolke
$T_2$	[ K ]	Temperatur an der Wand der Dampfkapillaren
$t$	[ s ]	Zeit
$U$	[ m ]	Umfang
$U$	[ V ]	Spannung
$U_{pl}$	[ V ]	Plasma-Spannung
$U_{Ri}$	[ V ]	Spannungsabfall über dem Innenwiderstand
$U_{Rs}$	[ V ]	Spannungsabfall über dem Shuntwiderstand
$u$	[ m/s ]	Strömungsgeschwindigkeit
$v_m$	[ m/s ]	Bearbeitungsgeschwindigkeit
$v_{pl}$	[ m/s ]	Ausströmgeschwindigkeit des Plasmas
$W$	[ eV ]	Austrittsarbeit
$w_0$	[ $\mu\text{m}$ ]	Strahltaillienradius
$X$	[ 1 ]	Ionisationsgrad
$Z_{eff}$	[ 1 ]	Effektive Ionenladungszahl
$Z_i$	[ 1 ]	Ionenladungszahl

**Griechische Symbole**

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$\alpha$	[ 1/m ]	Absorptionskoeffizient
$\alpha$	[ ° ]	Neigungswinkel
$\alpha$	[ 1 ]	Seebeck-Koeffizient
$\gamma$	[ N/m ]	Oberflächenspannungskoeffizient
$\delta$	[ m ]	Eindringtiefe „Skin-Effekt“
$\varepsilon$	[ 1 ]	Emissionsgrad
$\eta$	[ N s/m <sup>2</sup> ]	Dynamische Viskosität
$\Theta_0$	[ mrad ]	Halber Divergenzwinkel
$\Phi$	[ V ]	Potential
$\lambda$	[ m ]	Wellenlänge des Laserstrahls
$\lambda_D$	[ m ]	Debye-Länge
$\lambda_{th}$	[ W/(m · K) ]	Wärmeleitfähigkeit
$\nu_m$	[ m <sup>2</sup> /s ]	Magnetische Viskosität
$\nu_c$	[ 1/s ]	Kollisionsfrequenz
$\rho$	[ kg/m <sup>3</sup> ]	Spezifische Dichte
$\sigma$	[ $\Omega^{-1}m^{-1}$ ]	Elektrische Leitfähigkeit
$\sigma_{fest\ 20^\circ C}$	[ $\Omega^{-1}m^{-1}$ ]	Elektrische Leitfähigkeit Raumtemperatur
$\sigma_{flüssig}$	[ $\Omega^{-1}m^{-1}$ ]	Elektrische Leitfähigkeit in der Schmelze
$\nu$	[ m <sup>2</sup> /s ]	Kinematische Viskosität
$\omega_0$	[ 1/s ]	Kreisfrequenz
$\omega_{cc}$	[ 1/s ]	Zyklotronfrequenz
$\omega_{pl}$	[ 1/s ]	Plasmafrequenz

**Konstanten**

Konstante	Wert	Einheit	Bezeichnung
$\mu_0$	$4\pi \cdot 10^{-7}$	[ Vs/Am ]	Magnetische Feldkonstante
$\varepsilon_0$	$8,854 \cdot 10^{-12}$	[ As/Vm ]	Elektrische Feldkonstante
$g$	9,81	[ m/s <sup>2</sup> ]	Erdbeschleunigung (Normwert)
$k$	$1,38 \cdot 10^{-23}$	[ J/K ]	Boltzmann-Konstante
$h$	$6,626 \cdot 10^{-34}$	[ J/s ]	Plancksches-Wirkungsquantum
$e$	$1,602 \cdot 10^{-19}$	[ C ]	Elementarladung
$m_e$	$9,109 \cdot 10^{-31}$	[ kg ]	Masse des Elektrons

**Kennzahlen**

Kennzahl	Name	Bedeutung
Re	Reynoldszahl	Verhältnis von Trägheitskraft zur Reibungskraft
$Ha^2$	Quadrat der Hartmannzahl	Verhältnis von Lorentzkraft zur Reibungskraft
N	Wechselwirkungsparameter bzw. Stuart-Zahl	Verhältnis von Lorentzkraft zur Trägheitskraft
Z	Schwerkraftbezogene Lorentzkraftdichte	Verhältnis von Lorentzkraft zur Schwerkraft
$We_m$	Magnetische Weberzahl	Verhältnis von Magnetischem Druck zur Oberflächenspannung
K	MHD Belastungsparameter	Verhältnis von Lorentzkraft zur MHD-Kraft

**Abkürzungen**

Abkürzung	Bedeutung
EM	Elektromagnetisch
$M^2$	Beugungsmaßzahl
MHD	Magneto-Hydro-Dynamik
MFD	Magneto-Fluid-Dynamik
MSG	Metall-Schutzgas-Schweißverfahren
MIG	Metall-Inertgas-Schweißverfahren
MAG	Metall-Aktivgas-Schweißverfahren
WIG	Wolfram-Inertgas-Schweißverfahren
Nd:YAG	Neodym dotierter Yttrium-Aluminium Granat
SPP	Strahlparameterprodukt
WIG	Wolfram-Inertgas-Schweißverfahren

