

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

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	5
Inhaltsverzeichnis	7
Liste der verwendeten Symbole	11
Extended Abstract	17
1 Einführung	21
1.1 Motivation und Zielsetzung	23
1.2 Aufbau der Arbeit	24
2 Stand der Technik	25
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
3 Elektromagnetische Kräfte im Schmelzbad	37
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

4	Abschätzung der elektromagnetischen Schmelzbadbeeinflussung.....	43
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
5	Versuchseinrichtung, geeignete Werkstoffe und Systemtechnik	73
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
6 Nachweis elektromagnetischer Schmelzbadbeeinflussung	81
6.1 Intrinsisches Konzept	81
6.1.1 CO ₂ - 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 ₂ -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
7 Ausgewählte praxisrelevante Aspekte	105
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
8 Die Herkunft des intrinsischen Stromes	123
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
9	Zusammenfassung	145
	Literaturverzeichnis	149
	Anhang.....	157
	Formeln zur Induktion und Skin-Effekt Theorie	157
	Danksagung	159

Liste der verwendeten Symbole

Lateinische Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
A	[1]	Absorptionsgrad
A	[m ²]	Querschnittsfläche
B	[T]	Magnetische Flussdichte (Induktion)
\hat{B}_0	[T]	Amplitude der magn. Flussdichte (Induktion)
B_{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 ³]	Lorentz-Kraftdichte
\hat{f}_L	[N/m ³]	Amplitude der Lorentz-Kraftdichte
$f_{L_{\text{Strömung}}}$	[N/m ³]	Strömungsinduzierte Lorentzkraftdichte
$f_{L_{\text{Konduktiv}}}$	[N/m ³]	Konduktiv erzeugte Lorentzkraftdichte
$f_{L_{\text{induktiv}}}$	[N/m ³]	Induktiv erzeugte Lorentzkraftdichte
f_T	[N/m ³]	Trägheitskraftdichte
f_D	[N/m ³]	Druckkraftdichte
f_R	[N/m ³]	Reibungskraftdichte
f_G	[N/m ³]	Schwerkraftdichte
f_0	[Hz]	Frequenz
g_σ	[1]	Korrekturfaktor
$H ; h$	[m]	Höhe
I	[A]	Strom
I_K	[A]	Kurzschlussstrom

Symbol	Einheit	Bezeichnung
I_B	[A]	Belastungsstrom
I_{shunt}	[A]	Shunt-Strom
j	[A/m ²]	Stromdichte
j_{MHD}	[A/m ²]	Strömungsinduzierte Stromdichte
$j_{\text{intrinsisch}}$	[A/m ²]	Intrinsische Stromdichte
j_{extern}	[A/m ²]	Extern applizierte Stromdichte
j_{ind}	[A/m ²]	Induzierte Stromdichte
\hat{j}_{ind}	[A/m ²]	Amplitude der induzierten Stromdichte
j_e	[A/m ²]	Elektronenstromdichte
$j_{e,\text{Pl}}$	[A/m ²]	Elektronenstromdichte im Plasma
$j_{e,\text{L}}$	[A/m ²]	Leitungs-Elektronenstromdichte
$j_{e,\text{th}}$	[A/m ²]	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 ⁻³]	Teilchendichte
n_e	[m ⁻³]	Elektronendichte
n_i	[m ⁻³]	Teilchendichte der Ionen
n_0	[m ⁻³]	Teilchendichte der Neutralteilchen
n_Z	[m ⁻³]	Teilchendichte der Z-fach ionisierten Teilchen
n_{Z+1}	[m ⁻³]	Teilchendichte der (Z+1)-fach ionisierten Atome
P	[W]	Leistung
p	[N/m ²]	Druck
p_e	[N/m ²]	Elektronendruck
p_m	[N/m ²]	Magnetischer Druck
$p_{m,K}$	[N/m ²]	Konduktiv erzeugter magnetischer Druck
$p_{m,I}$	[N/m ²]	Induktiv erzeugter magnetischer Druck
p_{surf}	[N/m ²]	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	[Ω]	Widerstand
R_i	[Ω]	Innenwiderstand
R_{shunt}	[Ω]	Shuntwiderstand
s	[m]	Schmelzfilmbreite; Steg
T	[K]	Temperatur
T_e	[K]	Elektronentemperatur
T_g	[K]	Gastemperatur
T_m	[K]	Schmelztemperatur
T_v	[K]	Verdampfungstemperatur
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	[μm]	Strahltaillienradius
X	[1]	Ionisationsgrad
Z_{eff}	[1]	Effektive Ionenladungszahl
Z_i	[1]	Ionenladungszahl

Griechische Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
α	[1/m]	Absorptionskoeffizient
α	[°]	Neigungswinkel
α	[1]	Seebeck-Koeffizient
γ	[N/m]	Oberflächenspannungskoeffizient
δ	[m]	Eindringtiefe „Skin-Effekt“
ε	[1]	Emissionsgrad
η	[N s/m ²]	Dynamische Viskosität
Θ_0	[mrad]	Halber Divergenzwinkel
Φ	[V]	Potential
λ	[m]	Wellenlänge des Laserstrahls
λ_D	[m]	Debye-Länge
λ_{th}	[W/(m · K)]	Wärmeleitfähigkeit
ν_m	[m ² /s]	Magnetische Viskosität
ν_c	[1/s]	Kollisionsfrequenz
ρ	[kg/m ³]	Spezifische Dichte
σ	[$\Omega^{-1}m^{-1}$]	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
ν	[m ² /s]	Kinematische Viskosität
ω_0	[1/s]	Kreisfrequenz
ω_{cc}	[1/s]	Zyklotronfrequenz
ω_{pl}	[1/s]	Plasmafrequenz

Konstanten

Konstante	Wert	Einheit	Bezeichnung
μ_0	$4 \pi \cdot 10^{-7}$	[Vs/Am]	Magnetische Feldkonstante
ε_0	$8,854 \cdot 10^{-12}$	[As/Vm]	Elektrische Feldkonstante
g	9,81	[m/s ²]	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

1 Einführung

Das Laserstrahlschweißen hat aufgrund seiner Zuverlässigkeit, Effizienz und Qualität der produzierten Nähte in vielen metallverarbeitenden Branchen Fuß gefasst und erlebt derzeit eine zunehmende Verbreitung. Im industriellen Einsatz rückt neben der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens zunehmend die erzielbare Qualität der Fügeverbindung in den Vordergrund. Gerade beim Schweißen von Aluminiumlegierungen führt der hochdynamische Schweißprozess oft zu Instabilitäten und Nahtdefekten wie *Prozessporen*, *Auswürfen* und *Rissbildung*, deren Ursachen in direktem Zusammenhang mit der Wechselwirkung der Kapillare mit dem Schmelzbad stehen [1]. Abgesehen von diesen prozessbedingten Problemen können sowohl der Bauteilverzug als auch die geometrischen Eigenschaften der Naht wie *Nahteinfall* mit *Wurzelüberhöhung* (Nahtdurchhang), *Nahtüberhöhung* und *Randkerben* den Einsatz des Verfahrens begrenzen. Somit besteht Bedarf an systematischen Untersuchungen zur Steigerung der Nahtqualität und Stabilität unter dem Aspekt der Erweiterung der Prozessgrenzen.

Neben der geeigneten Wahl von Prozess- und Laserparameter können diese Probleme durch die Modifikation des Schweißprozesses deutlich herabgesetzt werden. Eine drastische Veränderung des Prozessgeschehens erreicht man hierbei durch zwei Eingriffsmöglichkeiten, zum einen durch die *Modifikation der Einbringung von Energie* und deren Umverteilung im Schmelzbad oder aber durch die *Modifikation des Kräftegleichgewichts* in bzw. auf die Schmelze. Das Energie- und Kräftegleichgewicht an der Kapillarwandung und das durch die Kapillarumströmung induzierte Strömungsfeld bilden die „physikalische Kopplung“ die erlaubt, diese Wege zu gehen, siehe Abbildung 1.

Aktuelle Forschungsvorhaben bedienen sich daher dem nahe liegenden Ansatz, durch die *Modifikation der Energieeinbringung*, d.h. durch eine räumliche/zeitliche Veränderung der Intensitätsverteilung *indirekt* Einfluss auf die Schmelzbadkonvektion zu nehmen, um so die oben genannten Probleme bezüglich Nahtqualität und Prozessstabilität mit mehr oder weniger Erfolg zu beseitigen. Indirekte Einflussnahme deshalb, weil die Energieeinbringung bekanntlich über Wärmeleitung in Verbindung mit prozessbedingten Mechanismen, wie Verdampfung, Ausbildung der Kapillarform und der durch den Vorschub verursachten Zwangsumströmung der Kapillare, ein

Wärme- und Stofftransport (Konvektion) erzeugt, welcher letztendlich für die Nahtgestaltung und Nahtqualität verantwortlich ist.

Die räumliche Gestaltung der Intensitätsverteilung kann im Allgemeinen durch eine Veränderung des Modes (Ring, Gauß, ...) und der Fokussierung erreicht werden, insbesondere aber durch den Einsatz geeigneter Verfahren wie die der Zwei- bzw. Mehrstrahltechnik oder durch die Kombination zweier verschiedener Wärmequellen (Hybrid). Hervorzuheben sind hierbei die Doppelfokustechnik [2, 3], deren prozessstabilisierende Wirkung sich bereits in industriellen Anwendungen bewährt hat sowie das Laser-Hybrid-Verfahren [4, 5], welches sich die Vorteile eines konzentriert wirkenden Laserstrahls in Kombination mit einem eher oberflächennah wirkenden Plasma- bzw. Lichtbogenschweißverfahren zu Nutze macht. Eine zeitliche Gestaltung bzw. Modifikation der Energieeinbringung kann zudem durch harmonische Laserleistungsmodulation [6] oder durch Rühren bzw. Strahlpendeln [7] erreicht werden.

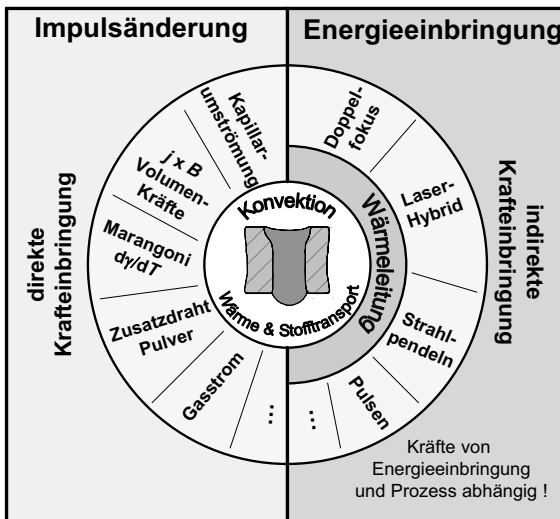


Abb. 1.1: Veränderung des Laserschweißprozesses insbesondere der Nahtgeometrie durch Modifikation der Energieeinbringung bzw. durch Modifikation des Kräftegleichgewichtes.

Ein weiterer Ansatz ist der *unmittelbare Eingriff in das Kräftegleichgewicht* des Schmelzbades durch Impulswirkung, wie sie bei der Zuführung prozessbedingter Drähte, Pulver oder Gasen auftritt. Weniger offensichtlich, aber nicht minder

1.2 Aufbau der Arbeit

Neben grundlegenden phänomenologischen Beschreibungen der Wechselwirkungsmechanismen beim Laserstrahlschweißen werden im Stand der Technik auch die Energieeinbringung und -umverteilung sowohl beim konventionellen Lichtbogenschweißen als auch beim Laser-Hybridschweißen betrachtet, da bekanntlich prinzipbedingt bei allen Lichtbogenschweißverfahren elektromagnetische (EM) Kräfte auf das Schmelzbad ausgeübt werden.

Die Komplexität in der Erzeugung von elektromagnetischen Kräften im Schmelzbad erfordert die in Kapitel 3 eingeführte Klassifizierung in unterschiedliche EM-Konzepte, anhand derer in Kapitel 4 grundlegende theoretische Abschätzungen in Form von Kennzahlen und theoretisch erzielbaren Lorentzkraftdichten durchgeführt werden. Aufbauend auf den klassifizierten Konzepten werden diese in Kapitel 5 zu technisch anwendbaren elektromagnetischen Systemen für das Laserstrahlschweißen weiterentwickelt, mit deren Hilfe in Kapitel 6 der experimentelle Nachweis für die direkte elektromagnetische Schmelzbadbeeinflussung durch die jeweiligen Konzepte erfolgt. Anhand zweier ausgewählter praxisrelevanter Aspekte beim Laserstrahlschweißen wird die gezielte Nutzung von elektromagnetischen Kräften in Kapitel 7 vorgestellt.

Abschließend wird Kapitel 8 dem Phänomen des so genannten intrinsischen Stromes beim Laserstrahlschweißen gewidmet. Hier wird der bislang unbeantworteten Frage nach Herkunft und Ursache der treibenden Kräfte für diesen elektrischen Strom nachgegangen und eine Erklärung präsentiert, weshalb beim Schweißen mit CO₂-Lasern in Gegenwart eines externen Magnetfeldes Kraftwirkungen zu beobachten sind, nicht jedoch bei Nd:YAG Lasern.

2 Stand der Technik

Eine gezielte Optimierung des Schweißprozesses erfordert neben Kenntnis der Energieeinbringung in das Werkstück ein ebenso hohes Maß an Prozessverständnis bezüglich der Energieumverteilung im entstehenden Schmelzbad. So verändert die Schmelzbadkonvektion maßgeblich den Energie- und Stofftransport in der Schmelze und beeinflusst damit die Temperaturverteilung, die Abkühlzeiten bei der Erstarrung und damit letzten Endes die Gefügeumwandlung in der Schweißnaht.

Eine Fülle von mittelbaren und unmittelbaren Eingriffsmöglichkeiten auf das Kräftegleichgewicht im Schmelzbad und somit auf die Antriebsmechanismen der Schmelzbadkonvektion haben Auswirkungen auf die technologischen Eigenschaften der Schweißnaht und spielen bezüglich Nahtstabilität und Nahtqualität eine immer größere Rolle. Die Energieeinbringung und Energieumverteilung sind somit die zentralen, prozessbestimmenden Aspekte beim Schweißen.

2.1 Energieeinbringung im Schmelzbad

Je nach Schweißverfahren bzw. je nach eingesetzter Wärmequelle ergeben sich unterschiedlich ausgeprägte Schmelzbäder, welche auf die unterschiedliche Energieeinbringung zurückzuführen ist.

2.1.1 Laserstrahlschweißen

Beim Laserstrahlschweißen wird durch die Absorption des fokussierten Laserstrahls in der Werkstückoberfläche eine so hohe Leistungsdichte erreicht, dass das Werkstück lokal zu schmelzen beginnt und sich ein flaches Schmelzbad ausbilden kann. Man spricht hierbei von „*Wärmeleitungsschweißen*“. Steigert man die Leistungsdichte des fokussierten Laserstrahls, so kommt es zum Prozess des „*Tiefschweißens*“ [8, 12]. Hierbei bildet sich in der aufgeschmolzenen Wechselwirkungszone durch Verdampfung eine Dampfkapillare aus, welche auch „*keyhole*“ genannt wird. Durch diese Dampfkapillare kann die Laserstrahlung über Mehrfachreflexion entsprechend tief in das Werkstück eindringen. Der Energietransport von der Werkstückoberfläche in die Tiefe erfolgt hierbei durch Absorption der reflektierenden Laserstrahlung an der Kapillarwand. Ein Schließen der Dampfkapillaren wird aufgrund des erzeugten Verdampfungsdruckes im Innern der Kapillare verhindert. Typische Durchmesser der

3 Elektromagnetische Kräfte im Schmelzbad

3.1 Erzeugung elektromagnetischer Kräfte

Voraussetzung für die Erzeugung von Lorentzkräften \vec{F}_L im Schmelzbad ist die Existenz einer Stromdichte, welche mit einem Magnetfeld wechselwirkt. Die elektromagnetische Volumenkraft \vec{f}_L resultiert aus dem Vektorprodukt der Stromdichte \vec{j} mit der magnetischen Flussdichte \vec{B} :

$$\vec{f}_L = \frac{d\vec{F}_L}{dV} = \vec{j} \times \vec{B} . \quad (3.1)$$

Grundlage für die Existenz einer Stromdichte im Schmelzbad liefert das vereinfachte ohmsche Gesetz

$$\vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B}), \quad (3.2)$$

worin \vec{E} das elektrische Feld, \vec{u} die Geschwindigkeit der leitfähigen Schmelze und σ deren elektrische Leitfähigkeit darstellt. In Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit kann ein äußeres Magnetfeld ausreichen, um Einflüsse auf das Schmelzbad auszuüben. Hierbei wechselwirkt die durch die zwangsumströmte Kapillare hervorgerufene hohe Strömungsgeschwindigkeit der Schmelze mit dem angelegten Magnetfeld und erzeugt eine „strömungsinduzierte“ Stromdichte $\vec{j}_{\text{MHD}} = \sigma(\vec{u} \times \vec{B})$. Durch erneute Wechselwirkung dieser strömungsinduzierten Stromdichte mit dem angelegten Magnetfeld gemäß Gleichung 3.1 wird eine Lorentzkraftdichte generiert, die im Vergleich zu den anderen Antriebsmechanismen in der Schmelze nur dann Wirkung zeigt, sofern σ , u und B groß genug sind.

Durch das Einwirken von elektrischen Feldern \vec{E} kann die Stromdichte in der Schmelze erhöht werden. So lassen sich basierend auf der Herkunft des jeweiligen elektrischen Feldes neben einer strömungsinduzierten \vec{j}_{MHD} und einer intrinsischen Stromdichte $\vec{j}_{\text{intrinsisch}}$ auch eine externe Stromdichte \vec{j}_{extern} sowie eine induzierte Stromdichte $\vec{j}_{\text{ind}} (\partial B / \partial t)$ identifizieren, die im folgenden Kapitel genauer erläutert werden. Außerdem ist anzumerken, dass das zur Erzeugung von Lorentzkräften notwendige Magnetfeld nicht nur externer Natur (\vec{B}_{extern}) sein kann sondern auch

induziert (\vec{B}_{ind}) werden kann. Unter Einbeziehung dieser zusätzlichen Möglichkeiten erweitert sich die Komplexität in der Erzeugung von Lorentzkräften im Schmelzbad auf die in Gleichungen 3.3 zusammengefassten Terme von Stromdichten unterschiedlicher „Herkunft“.

$$\vec{f}_L = \vec{j} \times \vec{B} = \left(\vec{j}_{\text{intrinsisch}} + \vec{j}_{\text{extern}} + \vec{j}_{\text{ind}} + \vec{j}_{\text{MHD}} \right) \times \left(\vec{B}_{\text{extern}} + \vec{B}_{\text{ind}} \right) \quad (3.3)$$

3.2 Elektromagnetische Systeme und Konzepte

Einen systematischen Überblick zur Erzeugung elektromagnetischer Volumenkräfte im Schmelzbad entsprechend der Klassifizierung von elektrischen und magnetischen Feldern zeigt Abbildung 3.1. Demnach können Lorentzkräfte nicht nur durch bloßes Anlegen eines *stationären Magnetfeldes* erzeugt werden, sondern auch durch *Kombination zweier unabhängiger \vec{E} - bzw. \vec{B} -Felder* sowie durch die Verknüpfung eines *selbstinduzierten Feldes* infolge eines angelegten äußeren Feldes mit diesem.

Wird lediglich ein *stationäres Magnetfeld* angelegt, so muss die für die Erzeugung von Lorentzkräften notwendige Stromdichte entweder abhängig vom Magnetfeld strömungsinduziert werden (bewegte Ladungsträger im Magnetfeld), oder die Stromdichte ist bereits prozessbedingt intrinsisch vorhanden. Da sich diese beiden Arten von Stromdichten unter Einwirkung eines äußeren Magnetfeldes nicht „ausschalten“ lassen, sind auch die daraus hervorgehenden Lorentzkräfte immer vorhanden.

Eine Erweiterung der Erzeugungsmöglichkeiten stellt die *Kombination zweier unabhängiger Felder* durch Nutzung eines externen elektrischen Stromflusses in Verbindung mit einem externen Magnetfeld dar. Damit können Richtung und Größe der zu generierenden Lorentzkräfte in weiten Bereichen frei gewählt werden.

Bei der Nutzung *selbstinduzierter Felder* bedingen sich j und B gegenseitig, wobei durch Wechselwirkung zwischen erzeugendem Feld und dem daraus induzierten Feld Lorentzkräfte erzeugt werden. Zum Beispiel durch die Wechselwirkung eines Stromflusses mit seinem selbstinduzierten Magnetfeld (*rot \vec{B}*), oder aber durch die Wechselwirkung eines sich zeitlich ändernden Magnetfeldes ($\partial B / \partial t$) mit seiner selbstinduzierten Wirbelstromdichte ($\sigma \text{ rot } \vec{E}$).

4 Abschätzung der elektromagnetischen Schmelzbadbeeinflussung

4.1 Bewegungsgleichung

Entsprechend dem d'Alembert'schen Prinzip für das dynamische Gleichgewicht eines Massepunktes ($m \cdot \vec{a} = \sum_i \vec{F}_i$) beschreibt die Navier-Stokes-Gleichung die Bewegung eines inkompressiblen, reibungsbehafteten Flüssigkeitsvolumens der Dichte ρ :

$$\underbrace{\vec{f}_T}_{\rho \left[\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \vec{u} \right]} = \underbrace{\vec{f}_D}_{-\vec{\nabla} p} + \underbrace{\vec{f}_R}_{\eta \Delta \vec{u}} + \underbrace{\vec{f}_G}_{\rho \vec{g}} + \underbrace{\vec{f}_L}_{\vec{j} \times \vec{B}} \quad (4.1)$$

Auf der linken Seite der Gleichung steht die substantielle Ableitung der Geschwindigkeit, also die Trägheitskraftdichte \vec{f}_T , und rechts die Summe der auftretenden Kraftdichten, die da sind:

$$\text{Druckkraftdichte,} \quad \vec{f}_D = -\vec{\nabla} p \approx \Delta p / L_c \quad (4.2)$$

$$\text{Reibungskraftdicht,} \quad \vec{f}_R = \eta \Delta \vec{u} \approx \eta \cdot u / L_c^2 \quad (4.3)$$

$$\text{Schwerkraftdichte,} \quad \vec{f}_G = \rho \vec{g} \quad (4.4)$$

$$\text{und Lorentzkraftdichte,} \quad \vec{f}_L = \vec{j} \times \vec{B} \quad (4.5)$$

Zur Erläuterung der hierbei verwendeten Formelzeichen sei auf die Liste der verwendeten Symbole auf Seite 11 verwiesen.

Im stationären Fall gilt $\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = 0$, wodurch sich die Trägheitskraftdichte auf der linken Seite der Gleichung (4.1) vereinfacht zu

$$\vec{f}_T = \rho (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \vec{u} \approx \frac{\rho \cdot \vec{u}^2}{L_c}, \quad (4.6)$$

worin die rechte Seite der Gleichung insbesondere (4.2) und (4.3) eine Abschätzung mittels einer charakteristischen Länge L_c wiedergibt.

Besonderes Augenmerk gilt der Lorentzkraftdichte, die sich entsprechend der vorgestellten Konzepte in vier Gruppen aufteilen lässt:

$$\text{Strömungsinduzierte Lorentzkraftdichte:} \quad f_{L_{\text{Strömung}}} = j_{\text{MHD}} \times B \quad (4.7)$$

$$\text{Intrinsische Lorentzkraftdichte:} \quad f_{L_{\text{Intrinsisch}}} = j_{\text{intrinsisch}} \times B \quad (4.8)$$

$$\text{Konduktive Lorentzkraftdichte:} \quad f_{L_{\text{Konduktiv}}} = j_{\text{extern}} \times B \quad (4.9)$$

$$\text{Induktive Lorentzkraftdichte:} \quad f_{L_{\text{Induktiv}}} = j_{\text{ind}} \times B \quad (4.10)$$

Zur Bewertung der jeweiligen Krafterflüsse können nun die einzelnen Kraftdichten hinsichtlich ihrer physikalischen Bedeutung interpretiert und mittels dimensionsloser Kenngrößen gegeneinander abgeschätzt werden. Aufgrund der noch ungeklärten Herkunft des „intrinsischen“ Stromes wird das intrinsische Konzept für die Ermittlung der Kennzahlen nicht herangezogen.

4.2 Kennzahlen

Mit den in Tabelle 1 aufgeführten Materialdaten [56, 57] für Aluminium- und Edstahlschmelze werden die im Folgenden vorgestellten Kennzahlen für das Schmelzbad unter Einwirkung einer technisch realisierbaren magnetischen Flussdichte für die einzelnen elektromagnetischen Konzepte abgeschätzt.

Parameter		Einheit	Aluminium	Edelstahl
Dichte	$\rho_{20^\circ\text{C}}$	kg/m ³	2,70·10 ³	7,87·10 ³
	ρ_{solidus}	kg/m ³	2,38·10 ³	7,30·10 ³
	ρ_{liquidus}	kg/m ³	2,36·10 ³	7,00·10 ³
elektrische Leitfähigkeit	$\sigma_{20^\circ\text{C}}$	Ω ⁻¹ m ⁻¹	31·10 ⁶	1,33·10 ⁶
	σ_{solidus}	Ω ⁻¹ m ⁻¹	10·10 ⁶	0,84·10 ⁶
	σ_{liquid}	Ω ⁻¹ m ⁻¹	4·10 ⁶	0,74·10 ⁶
kin. Viskosität	ν_{liquidus}	m ² /s	0,42·10 ⁻⁶	0,57·10 ⁻⁶
dyn. Viskosität	η_{liquidus}	Ns/m ²	0,001	0,004
Oberflächen- spannung	γ	N/m	0,915	1,65

Tabelle 1: Materialparameter für die Werkstoffe Aluminium und Edstahl.
Quelle: DB-LASIM [56, 57].

4.2.1 Reynoldszahl

Die Reynoldszahl Re vergleicht die Trägheitskraftdichte mit der Reibungskraftdichte in strömenden Fluiden und dient im Allgemeinen als charakteristische Kennzahl zur Bestimmung des Strömungscharakters.

$$Re \equiv \frac{f_T}{f_R} \quad , \quad (4.11)$$

$$Re = \frac{|\rho(u \nabla)u|}{|\eta \Delta u|} = \frac{\rho \cdot u^2 \cdot \frac{du}{dx}}{\eta \cdot \frac{d^2u}{dy^2}} = \frac{|\rho \cdot u^2 / L_{c,T}|}{|\eta \cdot u / L_{c,R}^2|} \quad . \quad (4.12)$$

Gemäß der hydrodynamischen Ähnlichkeitstheorie erhält man unter Annahme gleicher charakteristischen Längen und kinematischer Viskosität $\nu = \rho/\eta$ die Reynoldszahl in ihrer bekanntesten Schreibweise:

$$Re = \frac{u \cdot L_c}{\nu} \quad . \quad (4.13)$$

Diese gilt i.d.R. für geometrisch ähnliche Strömungsfelder zum Beispiel in Rohren mit Kreisquerschnitten, wobei hier als charakteristische Länge der Innendurchmesser anzusehen ist. Als Umschlagskriterium von laminarer in turbulente Strömungsform gilt hierbei nicht $Re=1$, sondern eine empirisch ermittelte kritische Reynoldszahl. In der Literatur ist die kritische Reynoldszahl für inkompressible Strömungen in Rohren mit Kreisquerschnitt mit $Re_{krit} = 2320$ angegeben [58]. Um näherungsweise Strömungen von nichtkreisförmigen Querschnitten auf die einer Rohrströmung mit Kreisquerschnitt zurückzuführen wird der hydraulische Durchmesser d_h herangezogen, der sich aus der Querschnittsfläche A und dem benetzten Umfang U ergibt:

$$d_h = \frac{4A}{U} \quad . \quad (4.14)$$

Für spaltähnliche Querschnittsformen ($s \ll h$) lässt sich der hydraulische Durchmesser gemäß [58] alleine aus der Spaltbreite s bestimmen:

$$d_h = 2s \quad . \quad (4.15)$$

Beim Laserstrahlschweißen treten die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten im Schmelzfilm (Steg) seitlich der umströmten Kapillare an der Kapillarwand auf, und können ein Vielfaches der Vorschubgeschwindigkeit erreichen [31]. Im Gegensatz zur Kanalströmung mit beidseitiger Reibung und entsprechendem parabolischen Strömungsprofil hat die Schmelzbadströmung im Bereich der Kapillare an der flüssig-

dampfförmig Phasengrenze nahezu keine Reibung, was zu einem „halbierten“ parabolischen Strömungsprofil im Schmelzfilm führt. Zur Anpassung dieses veränderten Strömungsprofils auf ein volles Strömungsprofil (ganze Kanalbreite) muss der Faktor 2 bei der Ermittlung der Reynoldszahl für das Schmelzbad bei Vorhandensein einer Kapillare berücksichtigt werden,

$$\text{Re} = 2 \cdot \frac{u \cdot d_h}{\nu} \quad (4.16)$$

Typische Schmelzfilmbreiten liegen zwischen 0,1 mm bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten und ca. 1,5 mm bei niedrigen. Damit ergibt sich für den betrachteten Spaltquerschnitt gemäß Gleichung 4.15 ein äquivalenter hydraulischer Durchmesser zwischen 0,2 mm und 3 mm.

In Abbildung 4.1 ist der Verlauf der Reynoldszahlen für die Schmelzbadströmung von Aluminium und Edelstahl in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit für drei charakteristische hydraulische Durchmesser aufgetragen. Hierbei gilt als Umschlagskriterium der Strömungsform von laminar in turbulent die kritische Reynoldszahl für Rohre mit Kreisquerschnitt. Im Bereich von typischen Vorschubgeschwindigkeiten soll der Pfeil mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit die Tendenz zu kleineren Schmelzfilmbreiten und damit zu kleineren Reynoldszahlen verdeutlichen.

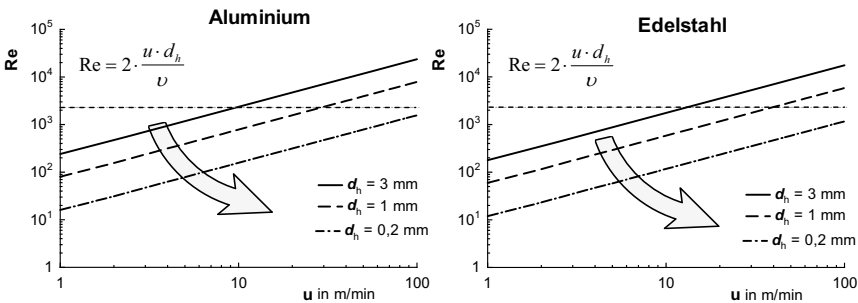


Abb. 4.1: Abschätzung der Reynoldszahl für ein typisches Laser-Schmelzbad im Gebiet der höchsten Strömungsgeschwindigkeit im Bereich der zwangsumströmten Kapillare.

Fazit: Trotz der beim Laserstrahlschweißen auftretenden hohen lokalen Strömungsgeschwindigkeiten kann von einer *laminaren* Strömungsform sowohl beim Schweißen von Aluminium als auch bei Edelstahl ausgegangen werden.

5 Versuchseinrichtung, geeignete Werkstoffe und Systemtechnik

5.1 Bearbeitungsstation und Strahlquellen

Alle experimentellen Grundlagenuntersuchungen wurden auf einer industrietauglichen 5-Achs-Bearbeitungsstation TLC105 (Fa. TRUMPF) durchgeführt, welche aus Vergleichbarkeitsgründen entweder in Kombination mit einem 5 kW CO₂-Gaslaser (TLF500HQ) oder alternativ dazu mit einem 4 kW Nd:YAG-Festkörperlaser (HL4006D) betrieben werden kann.

Im CO₂-Laserbetrieb wird die Laserstrahlung über Kupferspiegel in einer gekapselten Strahlführung zum Bearbeitungskopf geführt. Als CO₂-Bearbeitungskopf wurde der im Rahmen eines Sonderforschungsprojektes (SFB 349) entwickelte Leichtbaukopf mit einer Brennweite von 140 mm bis 200 mm eingesetzt. Damit lassen sich an der Bearbeitungsstelle Brennfleckdurchmesser von 0,3 mm bzw. 0,4 mm erzielen.

Im Nd:YAG-Laserbetrieb dagegen wird die Laserstrahlung über ein Lichtleitkabel mit einem Faserdurchmesser von 600 µm zur Bearbeitungsoptik innerhalb der Bearbeitungsstation geführt. In der verwendeten Standard-Bearbeitungsoptik BEO 035 (Fa. TRUMPF) wird der Laserstrahl zunächst kollimiert und dann mit einer Brennweite von 150 mm auf das Werkstück fokussiert, was einen Brennfleckdurchmesser von 0,45 mm erzeugt. Zum Schutz der Optik und zur Integration der Prozessgaszufuhr wird der Bearbeitungsoptik ein Prozessadapter nachgeschaltet. Der jeweils verwendete Bearbeitungskopf (bzw. Bearbeitungsoptik mit Prozessadapter) ist in den Abbildungen 5.1 und 5.2 schematisch dargestellt.



Abb. 5.1: SFB-Bearbeitungskopf für CO₂-Schweißversuche.

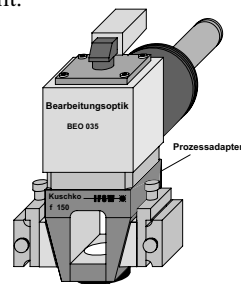


Abb. 5.2: Trumpf Bearbeitungsoptik mit Prozessadapter für Nd:YAG-Schweißversuche.

5.2 Werkstoffe

Entgegen der allgemeinen Vermutung eignen sich gerade *paramagnetische* Werkstoffe wie Aluminium und austenitischer Stahl (Edelstahl) am besten für das magnetisch beeinflusste Laserstrahlschweißen. Das liegt vor allem in den nicht magnetischen Eigenschaften ($\mu_r \sim 1$) begründet, da diese Materialien "nicht" in der Lage sind, ein Magnetfeld zu verändern bzw. maßgeblich zu beeinflussen.

Zwar verliert jeder ferromagnetische Werkstoff ($\mu_r \gg 1$) oberhalb der Curie-Temperatur⁴ seine "magnetischen Eigenschaften", was nur im Schmelzbad selbst und auf ein schmales angrenzendes Gebiet zutrifft. Ein das Schmelzbad umgebender ferromagnetischer Werkstoff ist jedoch in der Lage, die magnetischen Feldlinien derart zu „verzerren“, dass sie um das Schmelzbad herumgeleitet werden und somit in ihm ein „feldfreier“ Raum entstehen würde. Erst beim Anlegen einer stärkeren magnetischen Induktion, genauer gesagt, bei Erreichen der Sättigungsintensität des Werkstoffes, treten die magnetischen Feldlinien wieder ungehindert durch das Werkstück, und eine Beeinflussung des Schmelzbades ist möglich. Die werkstoffspezifische elektrische Leitfähigkeit der Schmelze spielt somit nur die zweitwichtigste Rolle bei der Wahl eines geeigneten Werkstoffes für das magnetisch unterstützte Laserstrahlschweißen.

Unter Berücksichtigung der oben genannten Aspekte werden die experimentellen Untersuchungen zum magnetisch unterstützten Laserstrahlschweißen vornehmlich an Aluminiumlegierungen (AA6xxx) und an Edelstahlwerkstoffen (1.4301) durchgeführt.

5.3 Systemtechnik

5.3.1 Spannmittel

Um einer ungewollten Ablenkung bzw. Verzerrung des magnetischen Feldes durch die Spannvorrichtung vorzubeugen, wird eigens für die Grundlagenuntersuchungen zum magnetisch unterstützten Laserstrahlschweißen ein Spannsystem aus *paramagnetischen* bzw. *diamagnetischen* Werkstoffen wie z.B. Edelstahl und Kupfer hergestellt. Eine weitere Besonderheit der Spannvorrichtung ist die Möglichkeit zur Integration von Elektromagneten unterhalb des zu schweißenden Werkstückes.

⁴ Curie-Temperatur von reinem Eisen beträgt $\sim 744^\circ\text{C}$, von Nickel 372°C

6 Nachweis elektromagnetischer Schmelzbadbeeinflussung

Angesichts der viel versprechenden Hinweisen aus bisherigen Untersuchungen und den hier systematisch vorgenommenen theoretischen Abschätzungen zur magnetischen Schmelzbadbeeinflussung bedarf es der Verifikation dieser Prognosen durch systematische Experimente, um beurteilen zu können, inwiefern und mit welchem zu erwartendem Gewinn diese Effekte beim Laserstrahlschweißen auch industriell nutzbar sind. Zur Demonstration der grundlegenden Zusammenhänge werden die experimentellen Untersuchungen entsprechend der vorgestellten elektromagnetischen Konzepte getrennt voneinander durchgeführt.

6.1 Intrinsisches Konzept

Diese Untersuchungen knüpfen unmittelbar an die im Stand der Technik erwähnten Versuche von *M. Kern* an. Im Unterschied zu jenen (Einschweißungen) werden hier Durchschweißungen sowohl mit CO₂- als auch mit Nd:YAG-Lasern realisiert, wobei das Magnetfeld nicht mit dem Bearbeitungskopf mitgeführt wird, sondern mit dem Werkstück.

6.1.1 CO₂ - Schweißversuche

Der Versuchsaufbau für das intrinsische Konzept mit einem unterhalb des Werkstücks befindlichen DC-Hufeisenmagneten, welcher ein Magnetfeld quer zur Schweißrichtung erzeugt, ist in Abbildung 6.1 schematisch dargestellt. Das Werkstück bildet mit dem Magneten eine Einheit, und beide führen gemeinsam eine Relativbewegung gegenüber dem ortsfesten Laserstrahl aus.

Unter dem Einfluss dieses Magnetfeldes verändert sich die Schweißnahtgeometrie deutlich. Abhängig von der Magnetfeldrichtung ergeben sich die in Abbildung 6.2 gezeigten typischen Schweißergebnisse. Dabei stellen sich die gleichen charakteristischen Auswirkungen der unterschiedlich orientierten Magnetfelder unbeschadet davon ein, ob mit oder ohne Zusatzdraht geschweißt wird [65]. Es ist offenkundig, wie bei sonst gleich bleibenden Prozessparametern die Nahtbreite nur durch Anlegen eines äußeren Magnetfelds verändert wird. Die Magnetfeld-Richtung

ist dabei entscheidend für die Nahtform und –fläche, jedoch oberhalb eines Schwellenwertes von ca. 0,3 T unabhängig von der Magnetfeldstärke. Zudem wird die Reproduzierbarkeit der Schweißergebnisse durch das angelegte Magnetfeld erhöht, siehe Bild 6.3. Die in den dargestellten Querschliffen fließende intrinsische Stromdichte (nach Kern senkrecht aus der Zeichenebene heraus) führt im Schmelzbad hinter der Kapillare im Falle des nach links gerichteten Magnetfeldes (in Vorschubrichtung gesehen) zu einer nach „unten“, im anderen Falle zu einer nach „oben“ gerichteten Kraft.

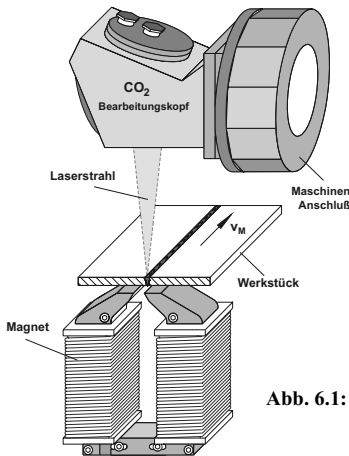


Abb. 6.1: Versuchsaufbau zur Verifikation des intrinsischen Konzeptes.

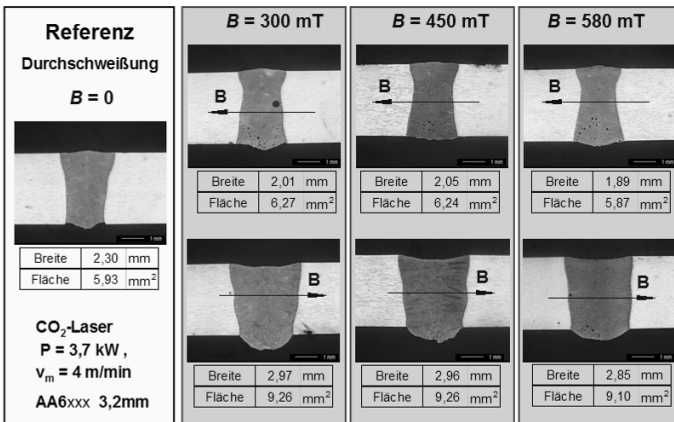


Abb. 6.2: Veränderung des Nahtquerschnitts durch Anlegen eines externen Magnetfeldes beim CO₂-Lasersatrahlschweißen.

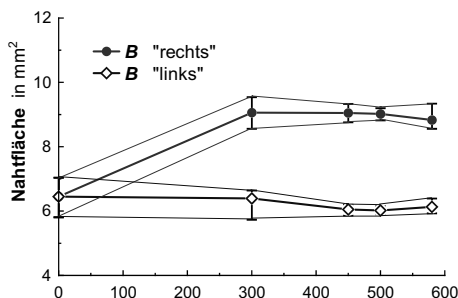


Abb. 6.3: Nahtquerschnittsfläche in Abhängigkeit der magnetischen Flussdichte.

Eine Steigerung der Nahtquerschnittsfläche um ca. 50% zwischen Magnetfeldorientierung nach „links“ bzw. nach „rechts“ lässt sich nur durch einen höheren Energieeintrag infolge veränderter Einkoppelbedingungen der Laserstrahlung in das Werkstück erklären. Einbrandversuche in Plexiglasstreifen, welche unterhalb des Werkstückes angebracht wurden, bestätigen dies: Durchgehende Einbrandmarkierungen mit besonders starker Ausprägung im Bereich der magnetischen Wechselwirkung bei nach „links“ gerichtetem Magnetfeld weisen auf eine nach unten geöffnete Kapillare hin, wodurch Laserleistung für den Prozess verloren geht. Hingegen waren bei Magnetfeldrichtung nach „rechts“ *keine* Verletzungen des Plexiglasprüfstreifens im Bereich des Magnetfeldes zu verzeichnen, was auf eine geschlossene Kapillare zurückzuführen ist und somit zu einer höheren Energieeinbringung in das Werkstück führt.

Je nach Krafrichtung ist also die Kapillare einmal nach unten offen bzw. nach unten geschlossen. Dies kann nur durch Erweiterung des bisherigen Prozessbildes durch Vorgriff eines Ergebnisses aus Kapitel 8 erfolgen. Unter Einbeziehung des laserinduzierten Plasmas kommt man dort zur Erkenntnis, dass die intrinsische Stromdichte beim CO₂-Laserstrahlschweißen im Schmelzbad von der Dampfkapillare aus radial nach allen Seiten zeigt, wie es in Bild 6.4 schematisch dargestellt ist. (Details sind Kapitel 8 zu entnehmen). Mit diesem radialen intrinsischen Stromdichteverlauf im Schmelzbad erzeugt ein quer zur Vorschubrichtung orientiertes Magnetfeld sowohl vor als auch hinter der Kapillare Lorentzkräfte, die in diesen Bereichen entgegengesetzt gerichtet sind.

7 Ausgewählte praxisrelevante Aspekte

In diesem Kapitel werden konkrete Anwendungsmöglichkeiten für zwei ausgewählte qualitätsrelevante Aspekte des Laserstrahlschweißens vorgestellt. Zum einen handelt es sich hierbei um die Vermeidung/Reduzierung qualitätsmindernder Nahtimperfectionen wie Prozess- und Wasserstoffporen, die gerade beim Schweißen von Aluminiumlegierungen häufig anzutreffen sind, und andererseits um die Vermeidung unerwünschter geometrischer Eigenschaften der Naht wie Nahteinfall mit Wurzelüberhöhung (Nahtdurchhang), die den Einsatz des Schweißverfahrens begrenzen.

7.1 Nutzung elektromagnetischer Kräfte zur Porenreduzierung

Zur Qualitätssteigerung, insbesondere zur Reduzierung der Porenhäufigkeit, wurden große Anstrengungen unternommen, um geeignete Prozess- und Laserparameter bzw. geeignete Modifikationen der Energieeinbringung zu finden. Als Beispiele sind hierzu die bereits industriell eingeführte Doppelfokustechnik bzw. die Laser-Hybrid-Technik zu nennen.

Eine weitere, neue Möglichkeit stellt die Nutzung von elektromagnetischen Kräften zur direkten Beeinflussung des Schmelzbades dar. So ist erwiesen, dass durch geschickte Kombination von Magnetfeld und Stromfluss über Zusatzdraht die Porenbildung deutlich reduziert werden kann [79], indem die entgegen der Schweißrichtung wirkenden Lorentzkräfte die Kapillare „offen“ halten und so die Porenbildung verringern.

Ein weiterer Ansatz zur Reduzierung von Poren ist die Nutzung elektromagnetischer Volumenkräfte im Schmelzbad, welche ähnlich den archimedischen Auftriebskräften wirken. Dabei wird versucht, durch umfassende elektromagnetische Kraftbeaufschlagung die Entgasung im Schmelzbad zu erhöhen.

Um diese Vorstellung experimentell zu bestätigen, wurden Untersuchungen an Überlappschweißungen anhand von 2 mal 3 mm dicken Aluminium-Schmalproben (AA6xxx) mit einem 4 kW Nd:YAG-Laser und einem induktiven elektromagnetischen System durchgeführt [80]. In diesem induktiven Schema, siehe

Versuchsaufbau in Abbildung 7.1, wirkt das unterhalb des Werkstücks angebrachte Magnetfeld stets senkrecht zur Schweißrichtung, während ein konstanter elektrischer Strom via Klemmen durch das Werkstück geleitet wird. Um eine definierte und reproduzierbare Stromdichte zu gewährleisten, wurde der Querschnitt jeder Schmalprobe auf 75 mm^2 festgelegt. Anhand von Nahtquerschliffen und Oberflächenphotographien der Schweißnaht wird der Einfluss des Magnetfeldes evaluiert. Die Qualität der Schweißnaht bezüglich Porenhäufigkeit und Porengröße kann dagegen erst aus Röntgenaufnahmen der Schweißnaht bewertet werden.

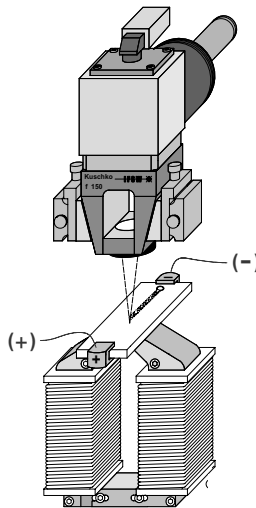


Abbildung 7.1: Konduktiver Versuchsaufbau.

Während der Schweißversuche wurden die Stromführung und die Magnetfeldorientierung stets so gewählt, dass die Lorentzkraft entweder nach „unten“ oder „oben“ zeigt. In Abbildung 7.2 sind die damit erzielten Schweißergebnisse in Abhängigkeit der Konfiguration von Magnetfeld und Stromführung dargestellt. Überraschender Weise blieb der erwartete Effekt einer Einschweißtiefensteigerung bei der Konfiguration Lorentzkraft nach „unten“, Bild 7.2b, aus. Jedoch konnte eine breitere Schweißnaht mit einer gleichmäßigeren Nahtoberraupe gegenüber der Referenzschweißung festgestellt werden. Darüber hinaus wird die Porenhäufigkeit verringert. Zeigt die resultierende Lorentzkraft jedoch nach „oben“, siehe Bild 7.2c,

8 Die Herkunft des intrinsischen Stromes

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln mit den unterschiedlichsten elektromagnetischen Konzepten und Systemen zahlreiche technologisch viel versprechende Effekte demonstriert und Anwendungsgebiete dafür aufgezeigt wurden, erscheint es angebracht, zum Ausgangspunkt des magnetisch unterstützten Laserstrahlschweißens, dem Schweißen unter alleiniger Einwirkung eines äußeren Magnetfeldes (intrinsisches Konzept) zurückzukehren und sich der noch offenen Frage bezüglich des intrinsischen Stromes und dessen Ursprungs zu widmen.

Ohne Zweifel existiert ein intrinsischer Strom, welcher in Kombination mit einem äußeren Magnetfeld deutlich Veränderungen der Schweißnaht hervorruft, wie die Ergebnisse in Kapitel 6.1.1 beim CO₂-Laserstrahlschweißen bestätigen. Nach *M. Kern* ist die Herkunft des „intrinsischen“ Stromes auf thermoelektrische Mechanismen, wie sie beispielsweise zwischen Schmelze und Grundgefüge sowie zwischen Schmelze und Schweißgefüge am Schmelzbadende auftreten können, zurückzuführen [41]. Jedoch scheint diese Interpretation nach heutigem Kenntnisstand nicht ausreichend zu sein, da sich die wiederholt beim CO₂-Schweißen beobachteten Phänomene trotz gleicher Werkstoffe und Schweißparameter weder mit einem lampengepumpten Nd:YAG-Laser noch mit einem Scheibenlaser erreichen ließen, siehe dazu die Ergebnisse in Kapitel 6.1.2.

Was verursacht diese Unterschiede, die erkennbar nur mit der Wellenlänge des verwendeten Lasers in einen kausalen Zusammenhang zu bringen sind? Wäre die Ursache für den intrinsischen Strom *ausschließlich* ein thermoelektrischer Mechanismus im Bereich des Schmelzbades, so ließe sich die beobachtete Wellenlängenabhängigkeit nicht erklären. Das Ausbleiben jeglicher Effekte unter Einwirkung eines äußeren Magnetfeldes beim Schweißen mit dem Nd:YAG-Laser bei 1,06 µm Strahlung führt unweigerlich zum Schluss, dass *zusätzlich* zur oben erwähnten Quelle einer thermoelektrischen Stromdichte ein wellenlängenabhängiges Phänomen für die Herkunft des intrinsischen Stromes und damit primär für die Erzeugung von Lorentzkräften im Schmelzbad beim Schweißen mit CO₂-Lasern verantwortlich sein muss.

8.1 Die Rolle des laserinduzierten Plasmas

Führt man sich die Schweißprozesse mit CO₂- und Nd:YAG Lasern vor Augen, so wird offensichtlich, dass der einzige prozessrelevante Unterschied in der charakteristischen Ausprägung eines Plasmas und dessen Auswirkungen begründet sein kann. Die Eigenschaften und Effekte des laserinduzierten Plasmas in der Dampfkapillaren sowie oberhalb des Werkstücks gehören zu den am intensivsten untersuchten Phänomenen des Laserstrahlschweißens, wobei in zahlreichen experimentellen und theoretischen Studien Aspekte der Zusammensetzung, Geometrie sowie Absorption, Brechung und Strahlung von laserinduzierten Plasmen ausgiebig untersucht wurden, ein Überblick ist in [19, 82] geboten. Dabei lag das Hauptinteresse neben der Erlangung eines besseren Prozessverständnisses auf der Modifikation der Energieeinkopplung, der Beeinflussung der Prozessstabilität sowie – in jüngster Zeit – auf seiner möglichen Nutzung zur Prozessüberwachung.

Auf der Suche nach der Herkunft des intrinsischen Stromes jedoch stehen die wellenlängenabhängige Wechselwirkung von Laserstrahl und Plasma und deren Auswirkungen im Vordergrund. Die inverse Bremsstrahlung [83] gilt beim typischen cw-Schweißen als Mechanismus zur Erzeugung des laserinduzierten Plasmas, wobei sein Absorptionskoeffizient α mit dem Quadrat der Wellenlänge $\alpha \sim \lambda^2$ ansteigt [23]. Dies hat zur Folge, dass im Falle der CO₂-Laserstrahlung aufgrund der 10-fach größeren Wellenlänge gegenüber dem Nd:YAG-Laser bei zunächst gleicher Elektronendichte im verdampfenden Material bedeutend mehr Laserleistung absorbiert wird, sich dieser Metaldampf viel stärker aufheizt und so ein Plasma mit höherer Elektronendichte entsteht. In der Tat bestätigen zahlreiche Studien und vor allem die praktische Erfahrung, dass im Gegensatz zum Schweißen mit 10,6 μm keine typischen Plasma-Effekte (Abnahme der Einschweißtiefe bei hohen Intensitäten, Einfluss des Ionisierungspotentials des Schutzgases) beim Schweißen mit einer Wellenlänge um 1 μm auftreten. Angesichts dieser Tatsachen scheint es plausibel, dass der Schlüssel für die Herkunft des intrinsischen Stromes in einer besonderen Wirkung des Plasmas liegt.

8.2 Hypothese

Die Suche nach der Herkunft des intrinsischen Stromes führt demgemäß zur Hypothese: eine noch zu klärenden Wirkung des Plasmas sei verantwortlich für die

9 Zusammenfassung

Motivation für diese Arbeit war eine Erweiterung der Prozessgrenzen beim Laserstrahlschweißen, insbesondere eine Steigerung der Prozessqualität, durch Modifikation des Schweißprozesses mit Hilfe von elektromagnetischen Kräften zu erzielen. Dieser neuartige Ansatz gestattet einen unmittelbaren Eingriff in das Kräftegleichgewicht des Schmelzbades und eröffnet darüber hinaus bisher nicht gekannte Möglichkeiten zur gezielten Schmelzbadbeeinflussung und damit zur Gestaltung von Nahtquerschnitten.

Abhängig von der Herkunft der erzeugten elektromagnetischen Volumenkräfte im Schmelzbad können für das magnetisch unterstützte Laserstrahlschweißen grundsätzlich vier verschiedene elektromagnetische Konzepte klassifiziert werden. Zu und mit diesen Konzepten wurden aufschlussreiche Abschätzungen und systematische experimentelle Untersuchungen bezüglich ihrer Wirksamkeit durchgeführt. Bei der Bewertung technisch realisierbarer Lorentzkraftdichten anhand von aussagefähigen dimensionslosen Kennzahlen zeigte sich, dass vor allem das konduktive sowie insbesondere das *induktive* elektromagnetische Konzept ein enormes Potenzial zur aktiven Schmelzbadbeeinflussung besitzen. Bei diesen Konzepten erlaubt die Vielfältigkeit in der Generierung von elektromagnetischen Volumenkräften eine große Variationsbreite der Lorentzkräfte bezüglich Richtung, Wirkungsbereich und deren zeitlicher- und räumlicher Gestaltung.

Bei allen klassifizierten Konzepten konnten in sämtlichen experimentellen Grundlagenuntersuchungen signifikante elektromagnetische Schmelzbadbeeinflussungen nachgewiesen werden. So ergab sich beim magnetisch unterstützten CO₂-Laserstrahlschweißen nach dem intrinsischen Konzept eine von der Magnetfeldorientierung festgelegte Schweißnahtgeometrie (tailliert bzw. u-förmig), wobei die Nahtform und -fläche oberhalb eines Schwellwertes von ca. 0,3 T unabhängig von der Magnetfeldstärke blieb. Die an Durchschweißungen erzielte Steigerung der Nahtquerschnittsfläche kann durch die veränderte Schmelzbadströmung, insbesondere durch eine unterströmte Kapillare, erklärt werden. Die beim CO₂-Laserstrahlschweißen nach dem intrinsischen Konzept erzielten Effekte ließen sich nicht auf das Nd:YAG-Laserstrahlschweißen übertragen, was offensichtlich auf einen zu geringen bzw. ausbleibenden intrinsischen Stromfluss im Schmelzbad zurückzuführen ist.

Literaturverzeichnis

- [1] *HÜGEL, H.; DAUSINGER, F.:* Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen - Probleme, Lösungsansätze und Anwendungspotenziale In 4. Laser-Anwenderforum, Bremen, 12./13.09.2002 BIAS Verlag 2002
- [2] *HOHENBERGER, B.:* Laserstrahlschweißen mit Nd:YAG-Doppelfokustechnik – Steigerung von Prozeßstabilität, Flexibilität und verfügbarer Strahlleistung. Herbert Utz Verlag, München: Laser in der Materialbearbeitung; Forschungsberichte des IFSW; Universität Stuttgart, Dissertation 2003.
- [3] *MÜLLER-HUMMEL, P.; LANG, R.; FERSTEL, S.:* Einsatz der Doppelfokustechnik beim Laserstrahlschweißen von Flugzeugstrukturkomponenten. In SLT 2001, S. 27-32
- [4] *HACKIUS, J.:* Laserstrahl-Hybridenschweißen von Aluminiumlegierungen Technische Universität Dresden, Dissertation 2003
- [5] *BEYER, E.:* Survey of laser hybrid processes. In: Proceedings of the first international WLT-conference on lasers in manufacturing, LIM 2001; Munich 2001, S. 404 - 415
- [6] *OTTO, A.:* Dynamics of laser beam welding. In: Proc. 6th international workshop „From process understanding to process stability in laser beam welding“, Hirschegg, Austria, February 2005
- [7] *BEREND, O.:* Hochfrequentes Strahlpendeln zur Erhöhung der Prozessstabilität beim Laserstrahlschweißen mit hoher Schmelzbaddynamik. In: DVS-Innovationsforum, Schweißen und Schneiden 2005, 12.-14. September 2005 Essen.
- [8] *BECK, M.:* Modellierung des Lasertiefschweißens. Teubner Verlag, Stuttgart: Laser in der Materialbearbeitung; Forschungsberichte des IFSW; Universität Stuttgart, Dissertation 1996.
- [9] *FUHRICH, T.:* Marangoni-Effekt beim Laserstrahl-tiefschweißen von Stahl. Herbert Utz Verlag, München: Laser in der Materialbearbeitung; Forschungsberichte des IFSW, Universität Stuttgart, Dissertation 2005
- [10] *HOYER, P.:* Über die Kompensation der Schwerkraft durch die im Volumen wirksame Lorentzkraft, insbesondere beim Strahlstranggießen. Technische Universität Hannover, Dissertation 1977.
- [11] *N.N.:* Electric stirring in melting ladle refining and continous casting provides metallurgical advantages. Industrial Heating, Vol.59 (1992), No.1, S. 22-25
- [12] *HÜGEL, H.:* Strahlwerkzeug Laser: Eine Einführung. Teubner Verlag, Stuttgart 1992.

Anhang

Formeln zur Induktion und Skin-Effekt Theorie

Das Induktionsgesetz $\operatorname{rot} E = -\frac{\partial B}{\partial t}$ beschreibt die Entstehung einer elektrischen Feldstärke durch ein nichtstationäres Magnetfeld in metallischen Werkstoffen. Angenommen wird ein parallel zur Oberfläche aufgebrachtos oszillierendes Magnetfeld B , mit der Frequenz f_0 und der Amplitude \hat{B}_0 . Werkstoffspezifische Größen wie die elektrische Leitfähigkeit σ und die magnetische Permeabilität μ bestimmen hierbei die magnetische Viskosität

$$\nu_m = \frac{1}{\sigma \mu \mu_0},$$

welche den Diffusionsprozess des magnetischen Feldes in das Werkstück beschreibt.

Die magnetische Induktion ist dabei eine Funktion der Zeit t und der Tiefe z [62]. Wie in der Elektrodynamik üblich, werden hier nichtstationäre Felder in einer komplexen Schreibweise dargestellt, so auch die die magnetische Induktion:

$$B_x(z, t) = \hat{B}_0 e^{-kz - i\omega_0 t}$$

mit

$$k = \sqrt{\frac{-i\omega_0}{\nu_m}} = \frac{1-i}{\delta}.$$

Darin ist ω_0 die Kreisfrequenz ist und

$$\delta = \sqrt{\frac{2\nu_m}{\omega_0}} = \sqrt{\frac{1}{\pi f \sigma \mu \mu_0}}$$

die charakteristische Eindringtiefe (Skin-Tiefe). Kennzeichnend für die Eindringtiefe ist, dass hierbei sowohl das magnetische als auch das elektrische Feld auf $1/e$ abgefallen sind [63, 101].

Gemäß dem Induktionsgesetz werden Wirbelströme im Werkstück parallel zur Oberfläche und senkrecht zum Magnetfeld induziert, deren Stromdichten

$$j_y(z, t) = (i-1) \cdot \hat{j}_0 e^{-kz - i\omega_0 t},$$

mit zunehmender Frequenz an die Oberfläche (Skin) gedrängt werden.

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

Kreputat, 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

Plaß, 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 Molybdän
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 Zerspansung
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 magnetofluidynamische Maßnahmen zur Beeinflussung der Nahtqualität beim Laserstrahlschweißen
1999, 132 Seiten, ISBN 3-519-06247-X

Raiber, Armin

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

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

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

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

Schittenhelm, Henrik

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

Stewen, Christian

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

Schmitz, Christian

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

Karszewski, Martin

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

Chang, Chin-Lung

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

Haag, Matthias

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

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

Mästle, Rüdiger

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

Voß, Andreas

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

Müller, Matthias G.

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

Abeln, Tobias

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

Erhard, Steffen

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

Contag, Karsten

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

Krastel, Klaus

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

Staud, Jürgen

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

Schinzel, Cornelius M.

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

Sebastian, Michael

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

Lücke, Bernd

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

Hohenberger, Bernd

Laserstrahlschweißen mit Nd:YAG-Doppelfokus-
technik – Steigerung von Prozentsicherheit, Flexi-
bilität 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 Foksmatrixtechnik

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 vari-ablem Laserstrahldurchmesser in modularen Fer-tigungssystemen

2006, 132 Seiten, ISBN 3-8316-0572-6

Andreas Ruß

Schweißen mit dem Scheibenlaser-Potentiale der guten Fokussierbarkeit

2006, 142 Seiten, ISBN 3-8316-0580-7

Gabriele Seibold

Absorption technischer Oberflächen in der La-sermaterialbearbeitung

2006, 156 Seiten, ISBN 3-8316-0618-8

Dirk Lindenau

Magnetisch beeinflusstes Laserstrahlschweißen

2007, 180 Seiten, ISBN 978-3-8316-0687-0

Jens Walter

Gesetzmäßigkeiten beim Lasergenerieren als Basis für die Prozesssteuerung und -regelung

2008, 140 Seiten, ISBN 978-3-8316-0770-9

Heiko Ridderbusch

Longitudinal angeregte passiv gütegeschaltete Laserzündkerze

2008, 175 Seiten, ISBN 978-3-8316-0840-9

Markus Leimser

Strömungsinduzierte Einflüsse auf die Naht-eigenschaften beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen

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

Mikhail Larionov

Kontaktierung und Charakterisierung von Kristallen für Scheibenlaser

2009, 186 Seiten, ISBN 978-3-8316-0855-3

Jürgen Müller-Borhanian

Kamerabasierte In-Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen

2009, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-0890-4

Andreas Letsch

Charakterisierung allgemein astigmatischer Laserstrahlung mit der Methode der zweiten Momente

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