

Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

W. Gref
Laserstrahlschweißen von Aluminium-
werkstoffen mit der Fokusmatrix-
technik

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.

Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen mit der Fokushmatrixtechnik

von Dr.-Ing. Wolfgang Gref
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

Als Dissertation genehmigt
von der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Stuttgart

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

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., 2005

D 93

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

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2005

ISBN 3-8316-0537-8

Printed in Germany

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

Kurzfassung der Arbeit

Das Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen wurde im Rahmen dieser Arbeit anhand von zahlreichen Versuchsreihen und Laserschweißvarianten untersucht. Ziel war es, die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Parametern zu verstehen und daraus neue Strategien abzuleiten, die einen effizienten Schweißprozess bei bester Nahtqualität liefern. Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen darüber hinaus das Prozessverständnis erleichtern und dem Anwender eine präzise Abschätzung der Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahrensvarianten ermöglichen. Vor dem Hintergrund einer potentiellen Anwendung im Automobilbau haben sich die Versuche bezüglich Werkstoff, Einschweißiefen und Bearbeitungsgeschwindigkeiten an den dort gestellten Anforderungen orientiert.

Ausgangspunkt der Untersuchungen war das Schweißen mit der Doppelfokustechnik unter Verwendung lampengepumpter Nd:YAG-Laser. Ein breit angelegtes Versuchsprogramm sollte die Zusammenhänge zwischen Schweißnahtqualität und Prozesswirkungsgrad klären. Der Einfluss von Fokusabstand und -orientierung, Leistungsverteilung sowie Fokussierung wurde hier gleichermaßen untersucht. Dabei hat sich gezeigt, dass eine Steigerung der Schweißnahtqualität immer mit einer reduzierten Effizienz einhergeht. Als Weiterentwicklung wurde das Schweißen mit mehr als nur zwei Laserstrahlen, der sogenannten Fokusmatrix, hinsichtlich ihres Leistungspotentials untersucht.

Im Mittelpunkt der Arbeit stand das Schweißen mit dem diodengepumpten Scheibenlaser. Es konnten dabei die Vorteile und die Besonderheiten beim Schweißen mit hoher Fokussierbarkeit herausgearbeitet werden. Betrachtet wurden unterschiedlichste Verfahrensvarianten, beginnend mit nur einem Laserstrahl bis hin zum Schweißen mit gleichzeitig vier Laserstrahlen. Hierbei wurde das Potential dieser Verfahren ausgelotet und in einem Vergleich zu anderen Laserschweißtechniken, wie z.B. Einzelfokus- und Doppelfokustechnik, geprüft und bewertet. Wie die Ergebnisse beweisen konnten, ist die Fokusmatrixtechnik mit Laserstrahlquellen hoher Fokussierbarkeit ein Schweißverfahren, mit dessen Hilfe höchste Schweißnahtqualität bei gleichzeitig höchster Effizienz umgesetzt werden kann. Weiterhin eröffnet die hohe Flexibilität dieser Technologie dem Laserstrahlschweißen zahlreiche neue Anwendungsgebiete.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung der Arbeit	5
Inhaltsverzeichnis	7
Verzeichnis der Symbole	9
Extended Abstract	13
1 Einleitung	17
1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit	17
1.2 Aufbau der Arbeit.....	18
2 Grundlagen und Stand der Technik	20
2.1 Laserstrahlschweißen	20
2.1.1 Wärmeleitungsschweißen	21
2.1.2 Tiefschweißen	21
2.1.3 Wirkungsgrade beim Tiefschweißen	24
2.2 Schweißbarkeit von Aluminium.....	25
2.2.1 Heißrisse	26
2.2.2 Wasserstoffporen	28
2.2.3 Prozessporen und Schmelzauswürfe.....	30
2.3 Doppelfokustechnik.....	33
3 Systemtechnik, Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	39
3.1 Strahlquellen.....	39
3.1.1 Lampengepumpter Nd:YAG-Laser	39
3.1.2 Diodengepumpter Yb:YAG-Scheibenlaser	41
3.2 Optische Komponenten zur Strahlführung und Strahlformung	43
3.2.1 Lichtleitkabel	43
3.2.2 Standard- Bearbeitungsoptiken.....	44
3.2.3 Doppelfokusoptiken.....	45
3.2.4 Fokusmatrixoptik	50
3.3 Prozessadapter und Bearbeitungsstationen	51

3.4	Untersuchte Werkstoffe	54
3.4.1	Aluminium- Knetlegierungen	54
3.4.2	Aluminium- Druckguss	56
4	Laserstrahlschweißen mit dem lampengepumpten Nd:YAG-Laser	58
4.1	Schweißen mit dem Doppelfokus	58
4.1.1	Einfluss des Fokusabstandes	59
4.1.2	Einfluss der Leistungsverteilung	66
4.1.3	Änderung der Leistungsdichte	68
4.1.4	Verbesserungsmöglichkeiten durch Strahlpendeln	70
4.2	Fokusmatrix	73
4.3	Synopsis	75
5	Schweißen mit dem diodengepumpten Yb:YAG- Scheibenlaser	78
5.1	Besonderheiten beim Schweißen mit dem Yb:YAG- Scheibenlaser	78
5.1.1	System- und verfahrenstechnische Vorteile des Scheibenlasers	78
5.1.2	Einfluss der Fokussierbarkeit auf die Schweißnahtqualität	81
5.1.3	Fokusmatrix mit dem Scheibenlaser	87
5.2	Hohe Qualität und Effizienz gleichzeitig – Schweißen mit der Fokusmatrix	94
5.2.1	Schweißen von Aluminium Knetlegierungen	95
5.2.2	Schweißen von Aluminium Druckguss	99
5.3	Modifikation des Schweißens mit der Fokusmatrix	101
5.3.1	Nahtglättung	101
5.3.2	Zentrale Drahtzufuhr	105
5.4	Weiteres Einsatzpotential von Scheibenlaser und Multifokustechnik	109
5.4.1	Die simultane Vielpunkttechnik	110
5.4.2	Schweißen von beschichteten Stahlblechen	111
5.5	Synopsis	116
6	Zusammenfassung	121
7	Literatur- und Quellenverzeichnis	125

Verzeichnis der Symbole

α	m^{-1}	Absorptionskoeffizient
Δp	Pa	Druckdifferenz
Δt	s	Schweißdauer
ΔT	K	Änderung der Temperatur
ΔU	kJ	Änderung der inneren Energie
η_A	-	Einkoppelgrad
η_{Pr}	-	Prozesswirkungsgrad
η_{th}	-	thermischer Wirkungsgrad
κ	m^2/s	Temperaturleitfähigkeit
λ	nm	Wellenlänge
λ_{th}	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
ν	Hz	Pendelfrequenz
ρ	kg/m^3	Dichte
σ	N/m	Oberflächenspannungskoeffizient
a	mm	Fokusabstand
A	-	Absorptionsgrad
AA 5xxx	-	6000- er Aluminiumlegierungsgruppe
AA 6xxx	-	5000- er Aluminiumlegierungsgruppe
Al	-	Aluminium
A_p	mm	Pendelamplitude
Ar	-	Argon
BEO	-	Bearbeitungsoptik
CO_2	-	Kohlendioxid
c_p	kJ/kgK	spezifische Wärmekapazität
cw	-	continuous wave = Dauerstrich(-betrieb)
d	mm	Porendurchmesser
d_d	mm	Durchmesser Zusatzdraht
d_f	μm	Fokusedurchmesser
d_k	μm	Faserkerndurchmesser
D	mm	Strahldurchmesser auf der Fokussierlinse
DF	-	Doppelfokus

DF 1200	-	Doppelfaser mit Faserabstand 1200 μm
DF 2000	-	Doppelfaser mit Faserabstand 2000 μm
DF 720	-	Doppelfaser mit Faserabstand 720 μm
EF	-	Einzelfokus
E_i	eV	Ionisationsenergie des Werkstoffes
f	mm	Brennweite der Fokussierlinse
f_k	mm	Kollimationsbrennweite
f_{pos}	mm	Fokuslage (bezogen auf die Werkstückoberfläche)
F	mm^2	Fläche des Nahtquerschnitts
F	-	Fokussierzahl
Fe	-	Eisen
FM	-	Fokusmatrix
g	m/s^2	Erdbeschleunigung
h_s	J/kg	Schmelzenthalpie
H	kJ/mm^3	spezifischer Wärmebedarf
He	-	Helium
I	W/cm^2	Intensität (Leistungsdichte)
K		Strahlqualitätszahl
LAM	-	Laseraktives Medium
LLK	-	Lichtleitkabel
m_i	kg	beteiligte Massen
M^2		Beugungsmaßzahl (Kennzahl für Strahlqualität)
M_A	-	Abbildungsmaßstab
MAG	-	Metall-Aktiv-Gasschweißen
Mg	-	Magnesium
MIG	-	Metall-Inert-Gasschweißen
n	-	Brechungsindex
n_d	mm	Nachlauf des defokussierten Laserstrahls
Nd:YAG	-	Neodym:Yttrium-Aluminium-Granat ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$)
p_σ	Pa	Druck durch die Oberflächenspannung
p_{abl}	Pa	Ablationsdruck
p_{dy}	Pa	hydrodynamischer Druck
p_g	Pa	hydrostatischer Druck
Pe	-	Péclet-Zahl
P_L	kW	Laserleistung

QF	-	Quattrofaser
r_{kap}	mm	Kapillarradius
s	mm	Blechdicke
S	-	Schachtverhältnis (Aspektverhältnis)
SL	-	Scheibenlaser
SPP	mm*mrad	Strahlparameterprodukt
t	mm	Einschweißtiefe
t_{kap}	mm	Kapillartiefe
T	K	Raumtemperatur
T45	-	Strahlteileroptik mit variablem Fokusabstand
T_{max}	K	maximale Temperatur
T_{S}	K	Schmelztemperatur
T_{v}	K	Verdampfungstemperatur
v	m/min	Vorschubgeschwindigkeit (Schweißgeschwindigkeit)
$w_0 \Theta_0$	mm*mrad	Strahlparameterprodukt
WIG	-	Wolfram-Inert-Gasschweißen
Yb:YAG	-	Ytterbium:Yttrium-Aluminium-Granat ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$)
z_{rf}	mm	Rayleighlänge

Extended Abstract

Laser beam welding of aluminium alloys is becoming of increasing interest with respect to lightweight structures. In comparison to steel, aluminium alloys show a more complex influence of material properties on the laser welding process, which is mainly due to their lower melting temperature, lower absorptivity and higher thermal conductivity. In conjunction with other properties these are often leading to defects, which are typical for welding of aluminium and aluminium alloys.

The most common defects appearing in the weld seam of aluminium and its alloys are hydrogen pores, process pores and melt ejections. Hydrogen porosity is a defect which is common to all welding procedures. These pores usually are small and spherical. In any case, they are caused by the hydrogen content in the base material and in the oxide layer on the work piece or filler wire. Therefore, hydrogen pores can be prevented by an appropriate material selection and joint preparation. On the other hand, process pores and melt ejection are caused by an unstable vapour capillary and, hence, are typical for laser beam welding. A constriction of the capillary for example can lead to the formation of cavities, which are remaining as process pores after the solidification of the weld pool. If the outflow of the metal vapour is obstructed, the complete melting pool can be ejected. Although the causes are not completely clarified yet, a large number of experiments and the results of some theoretical investigations have shown a clear correlation between the number of defects and the size of the keyhole opening.

Taking into consideration these aspects, the emphasis of this thesis is laid on the investigation of the laser welding process of aluminium alloys in order to understand the correlations between the parameters of different welding strategies such as single-, double-, and multi focus technique with the welding result. The main goal of this thesis is to develop a welding process which enables high efficiency and high seam quality at the same time.

Welding with the lamp pumped Nd:YAG-Laser

Double focus technique has proven to be a particularly well-suited means for improving the stability of the welding process and, consequently, the quality of the resulting seam. This is a result of a more stable keyhole geometry. The improvement of the welding result is, however, connected with certain losses regarding the process efficiency and performance (such as achievable depth) of the welding process. With one spot, or with a small distance between the two laser spots, the weld bead is irregular

and a high number of process pores can be observed. Nevertheless, the resulting penetration depth is high. With larger spot separation the bead is becoming stable and the porosity is reduced dramatically. Unfortunately, the welding depth is decreasing.

The attempt to obtain high penetration depth and to reduce the porosity at the same time by double focus technique failed. The increase of the penetration depth by placing the focus inside the work piece is only minor, while the quality of the weld seam is strongly reduced; the porosity is much higher in that case. Varying the power distribution between the two focal spots the welding depth can be increased, but the porosity is increasing simultaneously. The highest quality of the weld seam resulted at symmetric power distribution.

When welding with a single, defocused laser beam no advantages could be observed: the welding process remains unstable. Furthermore, the process efficiency decreasing with increasing defocusing. Only with very high defocusing the quality of the weld bead becomes good, admittedly at very low welding speed.

Analogical to electron beam welding the attempt was undertaken to improve the quality of the welding result by oscillating the laser beam. However, the result shows no kind of improvement, independently of the oscillating frequency.

Results obtained with the multi- focus technique (three spots) using lamp- pumped Nd:YAG laser sources demonstrate that in case of aluminium a welding depth up to 20 mm can be achieved. In case of steel the maximum depth was 26 mm. However, the increase of the welding depth is not proportional to the increase of the power level; some losses cannot be avoided.

Welding with the diode pumped Yb:YAG-Thin Disk Laser

Using a thin disk laser with high beam quality as a tool for welding, leads to benefits concerning the layout and the performance of the handling device. High beam quality enables longer working distance as well as the use of slim focusing optics. Welding with the thin disk laser also leads to benefits concerning the welding process. Since the relation P/d_f determines the threshold for deep penetration welding, the high beam quality of the thin disk laser thus enables keyhole welding at very low laser power; lower energy input and reduced distortion are the consequences.

Experiments performed with lamp pumped Nd:YAG-lasers have shown that, at a constant power level, a reduction of the focus diameter leads to a reduced number of pores. This is due to the higher ablation rate inside the keyhole. On the other hand,

reducing the focus diameter, a certain weld depth can be achieved at a higher welding speed, a fact which leads to an enlargement of the keyhole- opening, thus a stabilization of the welding process. It is expected that a similar tendency should be observed when welding with extremely small focus diameters using thin disk laser sources. However, because of the limited available output power of the thin disk laser – at that time 1.5 kW – this could not be proved.

With a beam parameter product of 6 mm*mrad, which is four times better than that of the conventional lamp pumped laser, optical fibres with core diameter of 150 μm can be used. A new approach to obtain at the same time high quality welding results, reduced energy input and high process efficiency is the combination of several individual lasers with high beam quality. The experiments performed with up to four thin disk lasers showed, that there are several possibilities to combine the laser beams in a very efficient way. As a result of this experiments a “Quattro Fibre” was designed by TRUMPF- Laser. To investigate the efficiency of such a combination, a large number of welding experiments were performed. The main goal was to compare different welding techniques – such as single spot or even double focus – under as close as possible identical conditions and to find out which of these processes is able to combine high quality and high welding speed at the same time.

The welding performance of the multi focus technique using thin disk lasers still lies below that of the single- focus. The reason is the comparatively large focus distance on the work piece, caused by the dimension of the cladding, which was technically necessary for such thin optical fibres. Nevertheless, the welding depth in this case was higher than the depth achieved with double- focus. The comparison regarding the quality of the weld seams showed further advantages of the multi- focus technique using the thin disk laser: While in case of single- spot a high welding depth can be achieved, the quality of the upper bead is very poor; irregularities and melt ejections cannot be avoided. The welding results of the multi- focus technique still shows few pores, but no ejections and no holes were observed after welding, while the welding depth lies in the range of mono- focus. This was demonstrated for different aluminium materials.

The enormous flexibility of the multi focus technique was demonstrated in further experiments. For example, laser welding with an integrated smoothing of the upper bead leads to a welding result of high quality. Also the possibility of designing a concentric wire feeding system in combination with multi focus is discussed. Further applications like welding of thin metal sheets using thin disk lasers, simultaneous welding of rotationally symmetrical components demonstrate the potential of thin disk laser sources as a tool for welding.

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit

In der industriellen Fertigungstechnik gewinnt der Laser aufgrund der Vielzahl an technologischen Vorteilen zunehmend an Bedeutung. Diese technologischen Vorteile ergeben sich vor allem durch die gezielte, zeitlich und örtlich begrenzte Energieeinkbringung in das Werkstück und der damit verbundenen hohen Bearbeitungsgeschwindigkeit. Im Verkehrswesen, und hier besonders im Bereich des Karosserieleichtbaus, eröffnet sich dem Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen ein großes fertigungstechnisches Potential.

Die Doppelfokustechnik beim Laserstrahlschweißen, d.h. die Anwendung zweier räumlich getrennter Foki am Werkstück, ist eine Technik, die inzwischen den Sprung vom Labor in die Produktion geschafft hat. Der große Vorteil dieses Verfahrens liegt in der Möglichkeit, die Leistungsverteilung an die Aufgabenstellung anzupassen und in Abhängigkeit der Prozessbedingungen, z.B. bei veränderten Fügegeometrien oder Spaltweiten, zu regeln. Dadurch wird ein hohes Maß an Flexibilität, vor allem aber eine hohe Prozessstabilität und Schweißnahtqualität erreicht. Untersuchungen haben dennoch gezeigt, dass das Schweißen mit der Doppelfokustechnik bei gleichem Leistungsniveau geringere Einschweißtiefen liefert als das Schweißen mit nur einem Laserstrahl. Aus fertigungstechnischer Sicht ist jedoch die Frage nach den optimalen Parametern für die Erzeugung der gewünschten Schweißnaht sehr eng mit den wirtschaftlichen Gesichtspunkten des Gesamtprozesses verknüpft. Leistungsfähigkeit, Effizienz und Qualität des Schweißergebnisses sind demnach die zentralen Merkmale des Fügeverfahrens.

Unter diesen Gesichtspunkten soll im Rahmen dieser Arbeit das Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen genau untersucht werden, wobei es gilt, die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Parametern zu verstehen und daraus neue Strategien abzuleiten, die ein effizientes Schweißen bei bester Schweißnahtqualität ermöglichen. Dabei wird der Schwerpunkt der Untersuchungen auf die Reduzierung der Poren in der Schweißnaht gelegt. Um den reinen Einfluss der eingesetzten Fügevariante – ohne Einwirkung von weiteren „Störgrößen“ – auf das Schweißergebnis zu untersuchen, wird in den meisten Fällen bewusst auf die Verwendung von Zusatzwerkstoff verzichtet.

Vor dem Hintergrund einer potentiellen Anwendung im Automobilbau orientieren sich die Versuche bezüglich Werkstoff, Einschweißtiefen und Bearbeitungsgeschwindigkeiten an den dort gestellten Anforderungen. Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen das Prozessverständnis erleichtern und dem Anwender eine präzise Abschätzung der Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahrensvarianten ermöglichen.

Ausgangspunkt der Untersuchungen ist das Schweißen mit der Doppelfokustechnik unter Verwendung lampengepumpter Nd:YAG-Laser. Ein breit angelegtes Versuchsprogramm soll die Zusammenhänge zwischen Schweißnahtqualität und Prozesswirkungsgrad klären. Als Weiterentwicklung wird das Schweißen mit mehr als zwei Laserstrahlen, der sogenannten Fokusmatrix, hinsichtlich ihres Leistungspotentials untersucht.

Im Mittelpunkt der Arbeit steht jedoch das Schweißen mit dem diodengepumpten Scheibenlaser. Betrachtet werden dabei unterschiedlichste Verfahrensvarianten, beginnend mit nur einem Laserstrahl bis hin zum Schweißen mit vier Laserstrahlen gleichzeitig. Ziel ist es, beim Schweißen mit der Fokusmatrixtechnik eine Steigerung der Prozesseffizienz zu erreichen und gleichzeitig zu untersuchen, inwieweit diese Technik einen Einfluss auf die Schweißnahtqualität hat. Dabei soll die Fokusmatrixtechnik im Vergleich zu anderen Laserschweißtechniken, wie z.B. Einzelfokus- und Doppelfokustechnik, geprüft und bewertet werden.

1.2 Aufbau der Arbeit

Ausgehend von dem Stand der Technik und basierend auf der Zielsetzung leitet sich das Vorgehen und der Aufbau dieser Arbeit ab. Zunächst wird im Kapitel 2 auf den bisherigen Stand der Kenntnisse zum Laserstrahlschweißen eingegangen. Dabei werden auch die Grundlagen dieser Fertigungstechnologie, die für das weitere Verständnis sowie für die Erklärung bestimmter Phänomene notwendig sind, erläutert. In Kapitel 3 wird die verwendete Systemtechnik, beginnend von den Strahlquellen, über die optischen Komponenten bis hin zu den untersuchten Werkstoffen, beschrieben. Dabei liegt der Schwerpunkt beim Schweißen von Aluminiumwerkstoffen mit dem lampengepumpten Nd:YAG- beziehungsweise dem diodengepumpten Yb:YAG-Scheibenlaser.

Als Basis und Ausgangspunkt für weitere Entwicklungen wird in Kapitel 4 das Schweißen von Aluminiumlegierungen mit Hilfe der Doppelfokustechnik genau untersucht. Diesem Abschnitt liegen nur Arbeiten mit lampengepumpten Nd:YAG- Lasern zugrunde. Ziel ist es, die genauen Zusammenhänge und die Abhängigkeiten einzelner

Parameter zu verstehen und daraus Wege abzuleiten, die eine hohe Effizienz bei gleichzeitig bester Schweißnahtqualität ermöglichen.

Das Schweißen mit dem diodengepumpten Scheibenlaser zu untersuchen ist ein zentrales Anliegen dieser Arbeit. Dabei werden im Kapitel 5 die Vorteile, die sich durch den Einsatz des Scheibenlasers ergeben, ausführlich beschrieben. Als wichtiger Aspekt bleibt die Qualität der Schweißergebnisse im Vordergrund. Um den möglichen Anwendungen Rechnung zu tragen und um die dort geforderten Einschweißtiefen und Schweißgeschwindigkeiten umsetzen zu können, wird auch die Addition mehrerer Laserstrahlen untersucht. Die Ergebnisse der Fokusmatrixtechnik werden dabei in einem direkten Vergleich mit der Einzelfokustechnik beziehungsweise der Doppelfokustechnik bewertet. Überdies wird in diesem Kapitel das weitere Einsatzpotential der Fokusmatrix in Verbindung mit dem Scheibenlaser beim Schweißen von Aluminiumwerkstoffen untersucht.

Als Ausblick wird im Abschnitt 5.4 auf mögliche Einsatzgebiete der Scheibenlaser bei Stahlwerkstoffen eingegangen. Das vorteilhafte Schweißen von dünnsten Blechfolien bei höchsten Vorschubgeschwindigkeiten, der Einsatz der Vielpunkttechnik beim Schweißen von rotationssymmetrischen Bauteilen und das Schweißen von beschichteten Blechen unterstreicht das hohe Potential der Scheibenlaser. Zum Abschluss werden in Kapitel 6 die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst.

2 Grundlagen und Stand der Technik

2.1 Laserstrahlschweißen

Nach DIN 8593 [1] handelt es sich beim Laserstrahlschweißen um ein Schmelzschweißverfahren, bei welchem die erforderliche Energie durch einen Laserstrahl zugeführt wird. Die Hauptvorteile dieses Verfahrens gegenüber herkömmlichen Schweißverfahren, wie z.B. dem WIG (Wolfram-Inertgasschweißen), MIG (Metall-Inertgasschweißen) oder MAG (Metall-Aktivgasschweißen), ergeben sich durch die gezielte, zeitlich und örtlich begrenzte, berührungslose und dadurch kraftfreie Energieeinbringung in das Werkstück. Die Vorteile, die daraus für den Schweißprozess folgen, sind die hohen Prozessgeschwindigkeiten, die erreicht werden können, die hohe Nahtqualität und die gute Automatisierbarkeit des Prozesses.

Das Verfahrensprinzip beruht darauf, dass die Energie des auf die Bearbeitungsfläche fokussierten Laserstrahls vom Werkstück absorbiert wird und dort den Werkstoff lokal aufschmilzt. Durch die Relativbewegung zwischen dem Laserstrahl und dem Werkstück entsteht die Schweißnaht.

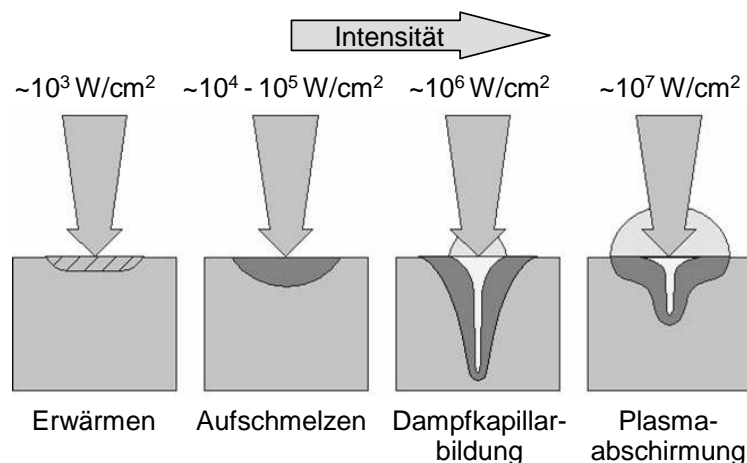


Bild 2.1: Wechselwirkungsprozesse zwischen Laserstrahl und Werkstück [2].

Wellenlänge, Strahlqualität und maximale Laserleistung wird durch die Wahl der Laserstrahlquelle festgelegt. Die Art des durchführbaren Prozesses wird durch die Intensität I auf der Werkstückoberfläche bestimmt. Dabei unterscheidet man die in Bild 2.1 dargestellten Bereiche.

2.1.1 Wärmeleitungsschweißen

Das *Wärmeleitungsschweißen* findet bei Intensitäten bis etwa 10^5 W/cm^2 statt. Da diese Intensität nicht für die Verdampfung des Werkstoffs ausreicht, wird das Werkstück nur an der Oberfläche aufgeschmolzen. Die Energie kann hierbei nur über Wärmeleitung in die Tiefe des Werkstücks gelangen, was zu einer nur wenig tiefen Schweißnaht mit linsenförmigem Querschnitt führt. Ein solcher ist in Bild 2.2 dargestellt und zeigt die typische Schweißnaht, wie sie sich beispielsweise auch aus den theoretischen Überlegungen in [3], [4] und [5] ergibt.

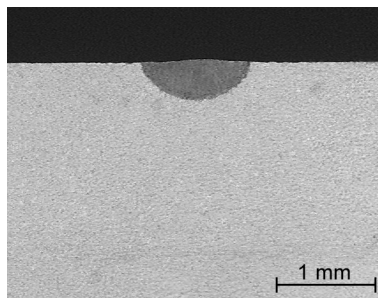


Bild 2.2: Wärmeleitungsschweißen mit dem typischen, linsenförmigen Nahtquerschnitt (Werkstoff AA 6xxx, $P_L = 2,9 \text{ kW}$, $d_f = 0,6 \text{ mm}$, $v = 4 \text{ m/min}$).

Das Wärmeleitungsschweißen hat aufgrund der geringen Absorption beim einmaligen Auftreffen der Strahlung auf das Werkstück einen sehr geringen Wirkungsgrad. Das Verfahren wird deshalb nur in der Feinwerktechnik, z.B. für das Schweißen sehr dünner Bleche oder bei der Fertigung von Elektronikkomponenten, angewendet.

2.1.2 Tiefschweißen

Übersteigt die Intensität auf dem Werkstück eine sogenannte Schwellintensität, die für Stahl bei ca. 10^6 W/cm^2 und für Aluminium bei ca. 10^7 W/cm^2 liegt, setzt lokale Verdampfung ein. Die als Folge des nach oben entweichenden Metaldampfes entstehende Reaktionskraft drückt die Schmelze nach unten und zur Seite, wodurch sich die für das *Tiefschweißen* typische Dampfkapillare ausbildet. Der Dampfdruck hält die Kapillare, deren Durchmesser in etwa dem Fokaldurchmesser des Laserstrahls entspricht, entgegen dem hydrostatischen und dem hydrodynamischen Druck der umgebenden Schmelze und deren Oberflächenspannung offen.

Eine vereinfachte Betrachtung des Temperaturfeldes auf der Werkstückoberfläche, die mit Laserleistung beaufschlagt wird, ergibt folgende Beziehung für die maximale Temperatur im Brennfleckmittelpunkt [3], [6], [7]:

$$T_{\max} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{A \cdot P_L}{2 \cdot r_f \cdot \lambda_{th} \cdot \sqrt{\frac{Pe}{2} + 1,1}}. \quad (2.1)$$

Dabei ist die Peclet-Zahl Pe mit der Vorschubgeschwindigkeit v und dem Strahlradius r_f bzw. dem Strahldurchmesser d_f zu bilden und ergibt sich zu

$$Pe = \frac{v \cdot r_f}{\kappa} = \frac{v \cdot d_f}{2 \cdot \kappa}. \quad (2.2)$$

Tiefschweißen setzt ein, wenn im Zentrum des Brennflecks Verdampfungstemperatur T_V erreicht wird. Setzt man demnach in der Beziehung (2.1) T_{\max} gleich der Verdampfungstemperatur T_V und $d_f = 2 r_f$ ein, so erhält man folgende Formel zur Abschätzung der Schwelle des Tiefschweißprozesses:

$$\frac{P_L}{d_f} = \underbrace{\sqrt{\pi}}_B \cdot \underbrace{\frac{T_V \cdot \lambda_{th}}{A}}_M \cdot \underbrace{\sqrt{\frac{Pe}{2} + 1,1}}_V = B \cdot M \cdot V. \quad (2.3)$$

In [8] ist die Schwelle so charakterisiert, dass Gleichung (2.3) in die Faktoren B , M und V aufgeteilt wird. Dabei ist der Faktor B (beam) von dem Strahlprofil bestimmt. Für einen Gauß-Strahl ist

$$B = \sqrt{\pi} \quad (2.4)$$

und für ein Tophat-Profil, welches beim Schweißen mit fasergeführtem Festkörperlaser vorhanden ist, ergibt sich der Faktor B zu:

$$B = 1,25\sqrt{\pi}. \quad (2.5)$$

Die im Faktor M zusammengefassten Materialeigenschaften zeigen, dass sich die Schwelle zum Tiefschweißen mit steigender Verdampfungstemperatur T_V und Wärmeleitfähigkeit λ_{th} hin zu höheren Werten verschiebt. Des Weiteren wird die Schwelle maßgeblich von dem Absorptionsgrad A bestimmt. Weiterhin ist aus Gleichung (2.3) ersichtlich, dass mit steigender Vorschubgeschwindigkeit und größer werdendem Fokussdurchmesser die Schwellleistung ebenfalls zunimmt.

In Bild 2.3 ist das Prozessfenster des Tiefschweißens über der spezifischen Leistung P/d_f des Laserstrahles eingezeichnet. Nach unten wird dieses durch die Schwelle zum Tiefschweißen, unterhalb derer nur noch Wärmeleitungsschweißen herrscht, scharf begrenzt. Zu höheren Intensitäten erfolgt die Begrenzung aufgrund der Abschirmung

des Laserstrahls durch ionisierten Metaldampf (Plasma). Die sogenannte Plasmaabschirmung führt dazu, dass die Einschweißtiefen trotz höherer Leistungsdichte zunächst nicht weiter steigen und ab einem bestimmten Wert der Prozess völlig zum Erliegen kommt. Da der Absorptionskoeffizient α im teilionisierten Metaldampf mit der Wellenlänge λ im Quadrat ansteigt, ist die Gefahr der Plasmaabschirmung beim Schweißen mit Nd:YAG- und Yb:YAG- Laser nicht gegeben. Die einzelnen Einflussgrößen und deren Auswirkung auf das Prozessfenster sind in Bild 2.3 eingezeichnet.

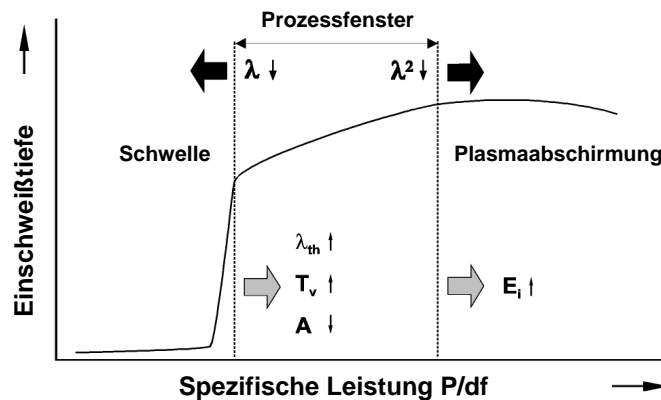


Bild 2.3: Prozessfenster beim Laserstrahlschweißen in Abhängigkeit der Laser- und Werkstoffparameter nach [9] (Absorptionsgrad A , Verdampfungstemperatur T_v , Wärmeleitfähigkeit λ_{th} , Wellenlänge λ , Ionisationsenergie des Werkstoffes E_i).

Das Bild 2.4 zeigt einen typischen Nahtquerschliff für das Tiefschweißen von Aluminiumwerkstoffen. Die scharfe Abgrenzung von Wärmeleitungsschweißen und Tiefschweißen wird deutlich, wenn man Bild 2.4 und Bild 2.2 miteinander vergleicht. Der Leistungsunterschied beträgt hierbei lediglich 200 W. Um einen stabilen Schweißprozess zu realisieren sollte man demnach bei P/df -Werten arbeiten, die deutlich oberhalb des Schwellwerts liegen.

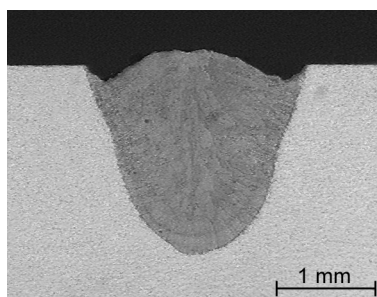


Bild 2.4: Nahtquerschnitt beim Tiefschweißen (Werkstoff AA 6xxx, $P_L = 3,1$ kW, $d_f = 0,6$ mm, $v = 4$ m/min).

2.1.3 Wirkungsgrade beim Tiefschweißen

Der thermische Prozess “Laserschweißen” wird nicht allein von der auftreffenden Laserstrahlung, sondern maßgeblich von dem Anteil der Strahlung bestimmt, der vom Werkstück absorbiert und in der Wechselwirkungszone in Wärme umgewandelt wird. Außerdem ist für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen von Bedeutung, in welchem Maße diese Wärme nutzbringend, d. h. zur Erzeugung der Schweißnaht, umgesetzt wird.

Der *Prozesswirkungsgrad* η_{Pr} hängt beim Laserstrahlschweißen vom *Einkoppelgrad* η_A und vom *thermischen Wirkungsgrad* η_{th} ab:

$$\eta_{Pr} = \eta_A \cdot \eta_{th} \quad (2.6)$$

Mit dem Absorptionsgrad A bezeichnet man einen Zahlenwert – das Verhältnis von absorbierter zu eingestrahelter Leistung – der die Absorption bei einmaligem Auftreffen der Strahlung auf eine Oberfläche quantifiziert. Der Absorptionsgrad ist dabei abhängig vom Einfallswinkel, der Polarisierung, der Wellenlänge dem Material und dessen Temperatur. Er beträgt bei senkrechtem Einfall nur wenige Prozent (Bild 2.5).

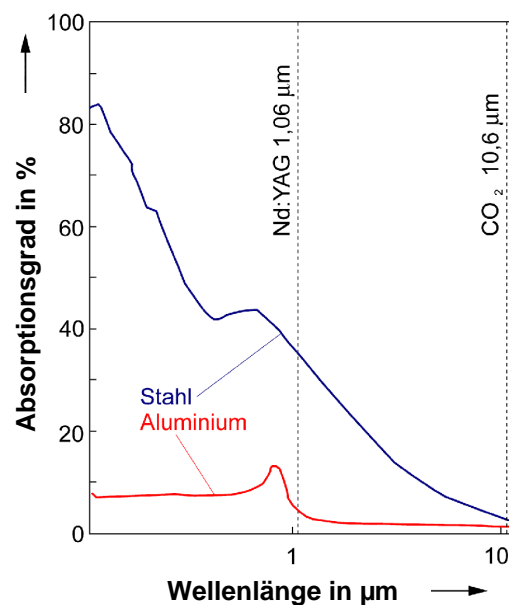


Bild 2.5: Absorptionsgrad von Aluminium und Stahl bei senkrechtem Strahleinfall als Funktion der Wellenlänge bei Raumtemperatur.

Tritt Vielfachreflexion auf, wie dies beim Tiefschweißen in der Dampfkapillare der Fall ist, so spricht man vom Gesamtabsorptionsgrad. Werden zusätzlich noch die Energieverluste durch den abströmenden Metaldampf und Strahlung berücksichtigt, so spricht man vom *Einkoppelgrad*. Aufgrund der Vielfachreflexion ist der Einkoppel-

grad um ein Mehrfaches höher als der Absorptionsgrad. Der Einkoppelgrad η_A ist nicht nur von den Materialeigenschaften, sondern auch von der Kapillarform abhängig [10]. Bild 2.6 zeigt dies für die Wellenlänge $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$ am Beispiel von Eisen und Aluminium.

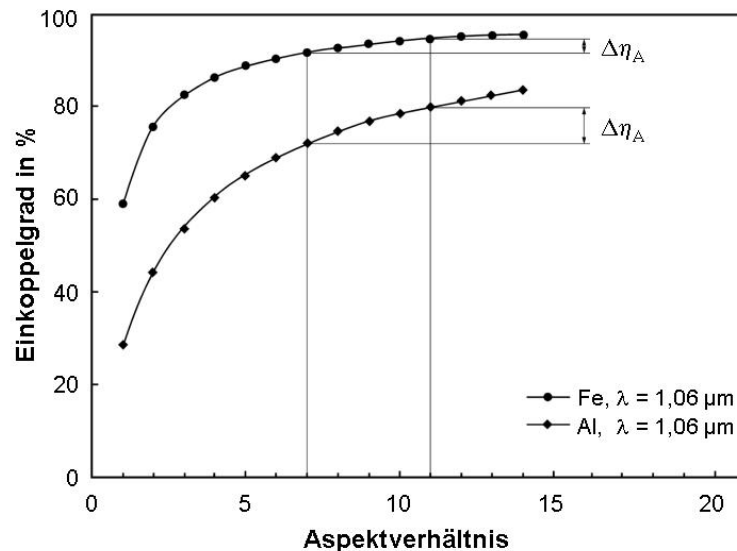


Bild 2.6: Abhängigkeit des Einkoppelgrades für eine kegelförmige Kapillare vom Aspektverhältnis für Stahl- und Aluminiumwerkstoffe bei Nd:YAG-Laserstrahlung [9].

Als weitere wichtige Größe zur Beurteilung der Energienutzung ist der *thermische Wirkungsgrad* η_{th} heranzuziehen. Er beschreibt, in welchem Umfang der eingekoppelte Teil der Laserstrahlung nutzbringend, d. h. im betrachteten Fall zur Erzeugung einer Schweißnaht, umgesetzt wird. Der thermische Wirkungsgrad wird durch die Wärmeleitungsverluste begrenzt und beträgt nach [9] maximal 48 %; er ist abhängig vom Material, der Vorschubgeschwindigkeit, der Kapillarform sowie der Bauteilgeometrie [11].

2.2 Schweißbarkeit von Aluminium

Aluminium ist nach Stahl das am meisten verwendete Metall. Sein Einsatz erstreckt sich auf fast alle Gebiete der Technik und umfasst, von einfachen Gegenständen bis in den Bereich hochbeanspruchter Konstruktionen. Es sind vor allem die geringe Dichte, hohe Wärme- und elektrische Leitfähigkeit, gute Umformbarkeit, gute Witterungs- und chemische Beständigkeit, Funkenfreiheit sowie die Eigenschaft, selbst bei tiefen Temperaturen nicht zu verspröden, die herausragenden Merkmale dieses Werkstoffes.

Die Schweißbarkeit von Aluminium wird einerseits von den physikalischen Eigenschaften des Materials und andererseits von dem Schweißverfahren selbst beeinflusst [12].

So wird die Schweißbeignung von Werkstoffen im Allgemeinen durch die Legierungszusammensetzung sowie deren Behandlungszustand bestimmt. Die Legierungsbestandteile bzw. die chemische Zusammensetzung haben Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften, die Härbarkeit, die Kalt- oder Warmrissneigung, die Gefügeausbildung, das Lösungs- bzw. Diffusionsvermögen von Gasen sowie das Schmelzbadverhalten.

Für den Laserschweißprozess sind vor allem die thermophysikalischen Eigenschaften von großer Bedeutung. Die Wärmeleitfähigkeit λ_{th} , die Verdampfungstemperatur T_V sowie das Absorptionsverhalten von Aluminium spielen dabei eine wichtige Rolle (siehe auch Gleichung (2.3)). Eine genaue und detaillierte Betrachtung der Laserschweißbarkeit von Aluminiumlegierungen ist in [13] zu finden.

Das Hauptproblem bei der Einführung des Laserstrahlschweißens von Aluminium in die industrielle Fertigung stellen die häufig auftretenden Schweißnahtfehler dar, welche die statische aber vor allem die dynamische Festigkeit der Schweißnähte erheblich herabsetzen. Risse, Poren und Schmelzbadauswürfe sind die vorwiegenden Nahtfehler beim Aluminiumschweißen.

2.2.1 Heißrisse

Da es sich bei Aluminiumlegierungen in der Regel um Mehrstoffsysteme handelt, erfolgt der Übergang der schmelzflüssigen in die feste Phase in einem Erstarrungsintervall. Die bestehende Volumendifferenz der beiden Phasen kann nur durch einen Schrumpfvorgang während der Erstarrung ausgeglichen werden. Entlang der Korngrenzen kann dies zu Fehlstellen führen. Ist kein flüssiges Material mehr vorhanden, welches die entstehenden Werkstofftrennungen ausfüllen kann, entstehen beim weiteren Erstarrungsvorgang so genannte Warm- oder Heißrisse entlang der Korngrenzen. Ob ausreichend flüssiges Material in Form des sogenannten Korngrenzeutektikums zum Ausgleich der Fehlstellen vorhanden ist, hängt stark von der Legierungszusammensetzung ab und ist maßgebend für die Heißrissanfälligkeit.

Der Einfluss der einzelnen Legierungselemente auf die relative Heißrissanfälligkeit wird in [14] eingehend beschrieben. Insbesondere die aushärtbaren Aluminium-Knetlegierungen, wie zum Beispiel die der Legierungsklasse AlMgSi (6xxx), weisen eine große Heißrissanfälligkeit auf (siehe Bild 2.7). Der Einsatz eines hochlegierten Zusatzwerkstoffes reduziert die Gefahr der Heißrissbildung. Nicht aushärtbare Aluminium-Knetlegierungen, wie zum Beispiel die der Werkstoffklasse AlMg (5xxx), neigen aufgrund ihres höheren Legierungsanteils weniger zur Heißrissbildung. Einen ver-

gleichsowie hohen Legierungsanteil besitzen die Aluminium-Gusslegierungen, welcher ihre gute Schweißbeignung bezüglich der Heißrissanfälligkeit erklärt.

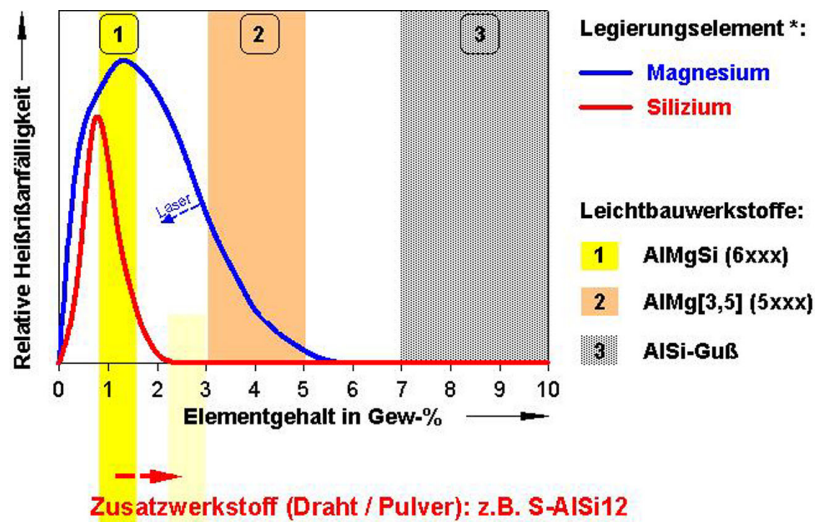


Bild 2.7: Relative Heißrissanfälligkeit bei AlMgSi, AlMg3,5 und AlSi-Guss [13], [15].

Heißrisse sind ein typischer Fehler des erstarrenden Schmelzgutes. Ihre Entstehung ist demnach auch eine Funktion der Erstarrungsgeschwindigkeit und damit der Vorschubgeschwindigkeit bzw. der Streckenenergie.

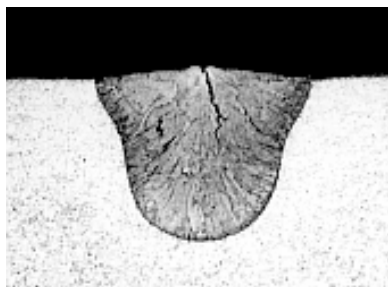


Bild 2.8: Erstarrungsrisss in der Schmelzzzone bei AlMgSi1 und $v = 10$ m/min.

Das häufige Auftreten von Heißrisen bei großen Vorschubgeschwindigkeiten bzw. kleinen Streckenenergien liegt darin begründet, dass es bei sehr raschem Abkühlen zu unterschiedlichen Gefügestrukturen und sehr hohen Schrumpfspannungen kommt [16], [17], [18].

Eine sehr genaue Untersuchung der Rissentstehung beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen ist vor allem in [13] zu finden. Hier werden sehr anschaulich die Ursachen und mögliche Maßnahmen zur Vermeidung von Heißrisen diskutiert. Demnach können Heißrisse nur werkstofftechnisch, z.B. durch Zusatzmaterial, und nicht prozesstechnisch, z.B. durch das Doppelfokusschweißen, vermieden werden [19]. Außerdem wird in vielen weiteren Publikationen die Thematik der Rissentstehung analysiert, von denen hier stellvertretend [20], [21] und [22] genannt werden soll.

In einer neueren Veröffentlichung [23] werden Untersuchungen zur Heißrissempfindlichkeit von Aluminiumlegierungen für die Luftfahrt diskutiert.

Ein weiteres Phänomen, welches ebenfalls als Heißriss eingestuft wird, ist beim Schweißen in Blechrandlage zu beobachten. Die Abhängigkeit dieser Risse von der Position des Fokuspunktes vom Blechrand, von der eingebrachten Laserleistung, von der Gestalt des zu schweißenden Bleches sowie von der Legierungszusammensetzung wird in [24] sehr ausführlich beschrieben.

2.2.2 Wasserstoffporen

Wasserstoffporen bilden sich als Folge der mit der Temperatur sinkenden Löslichkeit des Wasserstoffs im flüssigen Aluminium (Bild 2.9). Im abkühlenden Schmelzbad wird der gelöste Wasserstoff in Form von Gasbläschen ausgeschieden. Erstarrt die Schmelze schneller als die Wasserstoffblasen entweichen können, so verbleiben diese als Wasserstoffporen in der Schweißnaht [25]. Die Wasserstoffporenbildung, das Wachstum und die Bewegung der Wasserstoffporen wird ausführlich in [26] diskutiert.

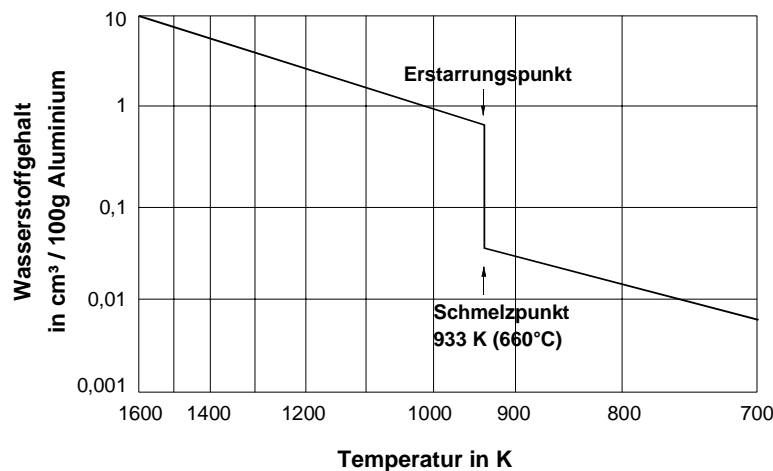


Bild 2.9: Wasserstofflöslichkeit als Funktion der Temperatur.

Wasserstoffporosität ist gekennzeichnet durch eine meist gleichmäßige Verteilung der kugelrunden Poren (siehe Bild 2.10). Wasserstoffporen treten grundsätzlich bei allen herkömmlichen Schweißverfahren auf. Die Gefahr der Porenbildung ist jedoch beim Laserschweißen wegen den sehr hohen Erstarrungsgeschwindigkeiten und gleichzeitig tiefen Schweißnähten wesentlich größer. Die Ursachen und die Entstehung von Wasserstoffporen ist in [27] [28], [29] und [30] sehr anschaulich dokumentiert.

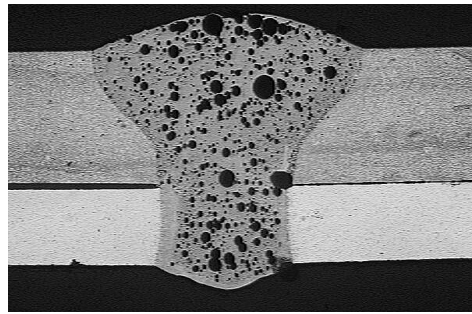


Bild 2.10: Wasserstoffporen bei einer Überlappverbindung Alu-Druckguss GD AlSi10MgMn, $s = 2,0$ mm (oben) mit Alu-Knetlegierung AC 120, $s = 1,15$ mm (unten).

Die Herkunft des Wasserstoffs in Aluminium kann verschiedene Ursachen haben. Wasserstoff, welcher molekular in der Atmosphäre vorkommt, ist aufgrund seiner kleinen Menge vernachlässigbar. Dagegen spielt der stets vorhandene Wasserdampf eine große Rolle. Ist die technische Oberfläche nicht oder nur teilweise durch eine Oxidschicht passiviert, so reagiert der Wasserdampf mit dem Aluminium. Dies geschieht aufgrund der hohen Affinität zu Sauerstoff nach der Reaktionsformel



unter Bildung atomaren Wasserstoffs. Zwar wird durch die Oxidschicht die direkte Aufnahme von Wasserstoff behindert, doch kann das Gas durch wasserstoffhaltige Verbindungen wie Fett und Öl, die an der Oberfläche absorbieren, durch deren Zersetzung beim Schweißen in die Schmelze gelangen. Neben neuen Techniken des Urformens, wie beispielsweise dem Porälverfahren und dem Vakuumdruckgießen [31], die zu Halbzeugen mit einem geringen Wasserstoffgehalt führen, lässt sich die Wasserstoffporosität durch eine sorgfältige Oberflächenvorbereitung, wie zum Beispiel durch Schaben oder Beizen, im Bereich der Schweißnaht minimieren.

Knetlegierungen weisen im Allgemeinen einen sehr niedrigen Wasserstoffgehalt auf [32], während der Wasserstoffanteil in Gusslegierungen deutlich höher liegt und sehr stark vom Gießverfahren abhängig ist [13], [29], [31]. Demnach werden beim konventionellen Druckgießprozess Teile des Formtrennmittels, des Kolbensmierstoffs und Umgebungsluft in dem Schmelzgut eingeschlossen. Der sehr hohe Nachverdichtungsdruck bewirkt, dass nicht gelöster Wasserstoff sowie andere Gase im Gussbauteil eingefroren werden [33]. Diese liegen molekular unter hohem Druck vor.

Beim Schweißen kommt es zur teilweise explosionsartigen Expansion der Gaseinschlüsse, was zu Schmelzauswürfen führen kann. Das bedeutet, dass es sich bei vielen Poren in der Schweißnaht um reine "Expansionsporen" handelt, da sich die beim Gießprozess gebildeten Gaseinschlüsse sofort nach dem Aufschmelzen des umgeben-

den Materials ausdehnen und deshalb als besonders kritisch zu bewerten sind. Das in [33] beschriebene Phänomen der Schmelzauswürfe ist auf Gaseinschlüsse im Gusswerkstoff zurückzuführen und unterscheidet sich deshalb von den im nächsten Abschnitt beschriebenen Schmelzauswürfen, deren Ursache in der Instabilität der Dampfkapillare während des Laserstrahlschweißens begründet liegt.

Da Wasserstoffporen hauptsächlich auf die chemische Zusammensetzung der zu fügenden Bauteile zurückzuführen sind, kann diese Art der Nahtfehler durch geeignete Werkstoffauswahl und durch geeignete Nahtvorbereitung auf ein gefordertes Maß reduziert werden. Diese Art der Poren kann durch das Schweißverfahren nur geringfügig beeinflusst werden. Bekannt sind lediglich Maßnahmen, welche die Erstarrungszeiten erhöhen und damit eine Ausgasung der Wasserstoffporen ermöglichen. Auf den Einfluss des Laserstrahlschweißens bzw. den Einfluss verschiedener Verfahrensvarianten auf die Wasserstoffporosität der Schweißnaht soll in Kapitel 5.2.2 näher eingegangen werden.

2.2.3 Prozessporen und Schmelzauswürfe

Prozessporen und Schmelzbadauswürfe sind typische Nahtfehler für das Laserschweißen. Sie werden durch Prozessinstabilitäten beim Tiefschweißen verursacht. Beim Tiefschweißen kann das dynamische Verhalten der Dampfkapillargeometrie zu Einschnürungen führen. Dabei wird der untere Teil der Kapillare durch flüssige Schmelze vom oberen getrennt. Erstarrt nun die Schmelzbadbrücke bevor der Hohlraum wieder aufgefüllt wird, entstehen unregelmäßige, meist schlauchförmige Poren [13], wie sie in Bild 2.11 dargestellt sind. Diese Art der Poren werden als Prozessporen bezeichnet.



Bild 2.11: Längsschliff einer Laserschweißnaht mit Prozessporen ($P_L = 4,0 \text{ kW}$, AA 5xxx).

Aluminiumlegierungen sind aufgrund der durch die hohe Wärmeleitfähigkeit verursachten großen Schmelzbäder und weiterhin der sehr dünnflüssigen Schmelze anfälliger für die Bildung von Prozessporen als beispielsweise Stahl. Mit zunehmender Einschweißtiefe nimmt die Gefahr der Porenbildung zu [3].

Die Ursachen dieser Nahtfehler sind noch nicht vollständig geklärt, es gibt jedoch zahlreiche Untersuchungen, welche die Entstehungsmechanismen eingehend behandeln. Forschergruppen aus Japan haben die Entstehungsmechanismen von Poren beim La-

serstrahlschweißen von Stahl mit CO₂-Laser in sehr ausführlicher Weise untersucht [34], [35]. Mit Hilfe von Hochgeschwindigkeits- Röntgenaufnahmen ist es dort gelungen, das Schmelzbad zu visualisieren und somit die Phänomene zu erklären, die zu der Entstehung von Poren führen [36]. Die meisten Ergebnisse beziehen sich in diesen Projekten, entsprechend den Forschungsschwerpunkten, auf das Schweißen von Stahl und zwar bei extrem hohen Laserleistungen, geringer Schweißgeschwindigkeit und entsprechend großen Einschweißtiefen. Die Ergebnisse zeigten, dass Prozessporen in der Regel im unteren Teil der Dampfkapillare entstehen. Aufgrund von zeitlich schwankenden Verdampfungsraten können Poren aber auch auf halber Tiefe entstehen. Als ein weiterer Grund für die Entstehung von Prozessporen wird hier der Einfluss des Schutzgases genannt [37].

In einem Gemeinschaftsprojekt zwischen dem *Joining and Welding Research Institut* (JWRI) der Universität Osaka, der Fa. *Nissan Motor Company*, Yokohama und dem *Institut für Strahlwerkzeuge* (IFSW) der Universität Stuttgart konnte erstmalig das Schweißen von Aluminiumlegierungen mit Nd:YAG-Lasern visualisiert werden. Die Röntgendurchstrahlung kombiniert mit Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des Schmelzbades während des Schweißprozesses konnten frühere Modellvorstellungen [3], [13] bestätigen, das Prozessverständnis erhöhen und dadurch verschiedenste Lösungsansätze zur Verbesserung der Prozessstabilität liefern.

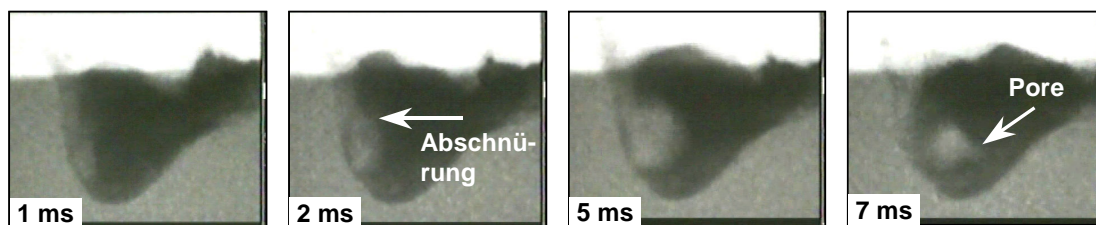


Bild 2.12: Röntgenaufnahme der Entstehung einer Prozesspore ($P_L = 4,0$ kW, AA 5xxx).

Bild 2.12 zeigt, wie es während dem Schweißprozess zur Porenentstehung kommt. Die anfangs noch sehr schlanke Dampfkapillare beginnt sich im unteren Teil aufzu- blähen. Innerhalb von nur wenigen Millisekunden findet eine komplette Abschnürung der Kapillare statt. Wird dieser mit Metaldampf gefüllte Hohlraum von der Erstar- rungsfront eingeholt, so bleibt eine Pore in der Schweißnaht zurück (siehe Pfeil im Bild 2.12, rechts). Die Mechanismen, die zur Entstehung von Prozessporen führen, werden in [38] in aller Ausführlichkeit erklärt. Ein Einfluss der Schmelzbadströmung auf die Porenbildung konnte dort nicht nachgewiesen werden, dennoch ist von einem Einfluss der Strömung auf die Stabilität der Dampfkapillare auszugehen. Außerdem wurde gezeigt, dass die Marangoni-Strömung bei der Porenbildung eine untergeordne- te Rolle spielt: die durch verschiedene Schutzgase beeinflusste Strömungsrichtung

zeigte keinen Einfluss auf die Porosität. Zu ähnlichen Ergebnissen sind auch die Untersuchungen in [39] gekommen.

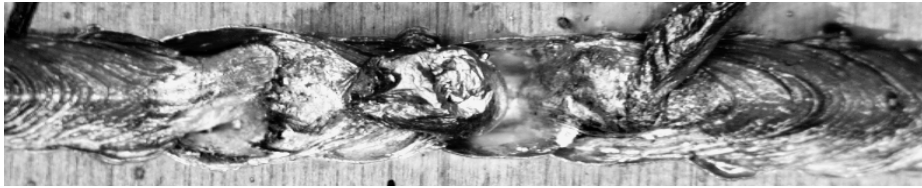


Bild 2.13: Foto einer Nahtoberraupe mit Schmelzbadauswurf ($P_L = 4,0 \text{ kW}$, AA 6xxx).

Als *Schmelzbadauswürfe* (siehe Bild 2.13) werden stochastisch, explosionsartige Auswürfe des geschmolzenen Nahtvolumens bezeichnet. Die Ursache hierfür können einerseits Verunreinigungen der Fügepartner und/oder in Alu-Druckgussbauteilen eingeschlossene Gasporen sein. Andererseits sind beim Laserstrahlschweißen stochastisch auftretende Auswürfe bekannt, deren Vorkommen nicht durch geeignete Materialauswahl beziehungsweise durch Nahtvorbereitung vermieden werden kann. Diese nur beim Tiefschweißen beobachteten Nahtfehler sind ähnlich wie die Entstehung der Prozessporen auf Instabilitäten der Dampfkapillare zurückzuführen. Im Gegensatz zur Entstehung der Prozesspore wird ein Auswurf jedoch durch die Einschnürung der Kapillare im oberen Bereich hervorgerufen, was in Bild 2.14 gut zu erkennen ist. Der hohe Dampfdruck in dem abgeschnürten Teil führt dann dazu, dass die gesamte Schmelze verdrängt wird, was schließlich zum Auswurf führt.

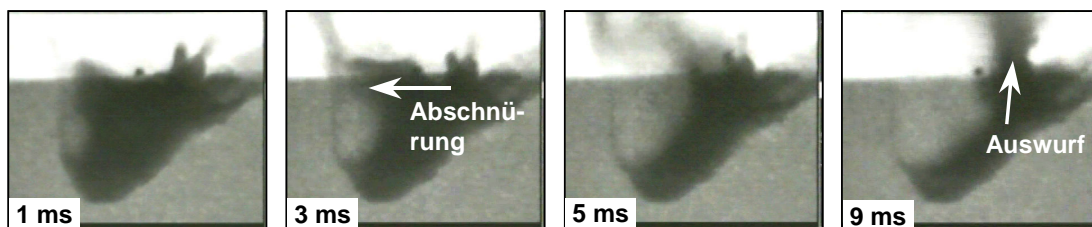


Bild 2.14: Entstehung eines Schmelzbadauswurfes ($P_L = 3,0 \text{ kW}$, AA 5xxx).

Eine detaillierte Untersuchung der Fehlerentstehung liefern die Arbeiten [38] und [40]. Demnach können als Ursache für die Entstehung von Poren und Schmelzbadauswürfen alle Effekte betrachtet werden, welche die Einschnürung der Dampfkapillare hervorrufen oder begünstigen. Die geringe Oberflächenspannung, geringe Viskosität der Schmelze sowie der Einfluss niedrigsiedender Legierungselemente werden dort an erster Stelle genannt.

2.3 Doppelfokustechnik

Als Basis und Ausgangspunkt dieser Arbeit – mit der besonderen Zielsetzung die Zahl der Poren in der Schweißnaht zu reduzieren und damit die Nahtqualität zu verbessern – soll das Thema Doppelfokustechnik im folgenden Abschnitt erläutert werden.

Die *Doppelfokustechnik* beim Laserstrahlschweißen, d. h. die Anwendung zweier räumlich getrennter Foki am Werkstück, ist eine Technik, die inzwischen den Sprung vom Labor in die Produktion geschafft hat [41]. Der große Vorteil dieses Verfahrens liegt in der Möglichkeit, die Leistungsverteilung an die Aufgabenstellung anzupassen und in Abhängigkeit der Prozessbedingungen, wie z.B. bei veränderten Fügegeometrien oder Spaltweiten, zu regeln. Dadurch wird ein hohes Maß an Flexibilität, Qualität, Prozesssicherheit und Effizienz erreicht.

Als eine Möglichkeit zur Steigerung der am Werkstück verfügbaren Laserleistung sowie der Prozessqualität ist die Doppelfokustechnik schon lange bekannt und wurde mit CO₂-Laser hinsichtlich dem Schweißen von Stahl- und Aluminiumwerkstoffen wie auch für das Beschichten in [42], [43], [44], [45], [46] und [47] untersucht. Im Bereich der Festkörperlaser werden in der Literatur zunächst verschiedene Ansätze beschrieben, die in erster Linie auf eine Erhöhung der verfügbaren Laserleistung zielen bzw. das Erreichen einer hohen Prozessgeschwindigkeit sowie großer Einschweißtiefen anstreben, siehe z.B. [48], [49]. Publikationen des IFSW stellen die Doppelfokustechnik – auch beim Einsatz von Festkörperlaser – als eine Verfahrensvariante vor, mit deren Hilfe die Prozessstabilität und damit die Schweißnahtqualität verbessert werden kann [50], [51], [52]. Insbesondere bei Aluminium und seinen Legierungen konnten Nahtfehler als Folge von Prozessporen und Schmelzbadauswürfen, bedingt durch eine gestörte Abströmung des Metaldampfes aus der Kapillare, vermindert bzw. vermieden werden [53].

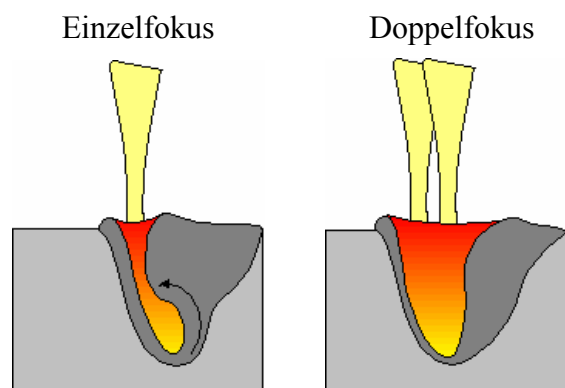


Bild 2.15: Aufweitung der Dampfkapillare mittels Doppelfokus (schematische Darstellung).

Durch das künstliche Aufweiten der Kapillare (siehe Bild 2.15) mit Hilfe der Doppelfokustechnik wird eine Blockade der Metaldampfabströmung bzw. das Kollabieren der Kapillare verhindert [3]. Neue Simulationsrechnungen [54] können die oben geschilderten Entstehungsmechanismen bzw. ihre Vermeidung mittels dieser Technik inzwischen bestätigen.

Erzeugung des Doppelfokus

Systemtechnisch ist die Erzeugung eines Doppelfokus auf mehrere Arten zu erreichen: durch *Strahlteilung* beziehungsweise durch *Strahladdition*. Dies ist sowohl mit CO₂-Lasern als auch mit Nd:YAG-Lasern möglich. Da der Inhalt dieser Arbeit sich jedoch auf das Schweißen mit Festkörperlaser konzentriert, werden im Weiteren alle Erläuterungen auf diese Art von Strahlquellen bezogen. In Bild 2.16 sind schematisch mehrere Wege aufgezeigt, wie ein Doppelfokus generiert werden kann.

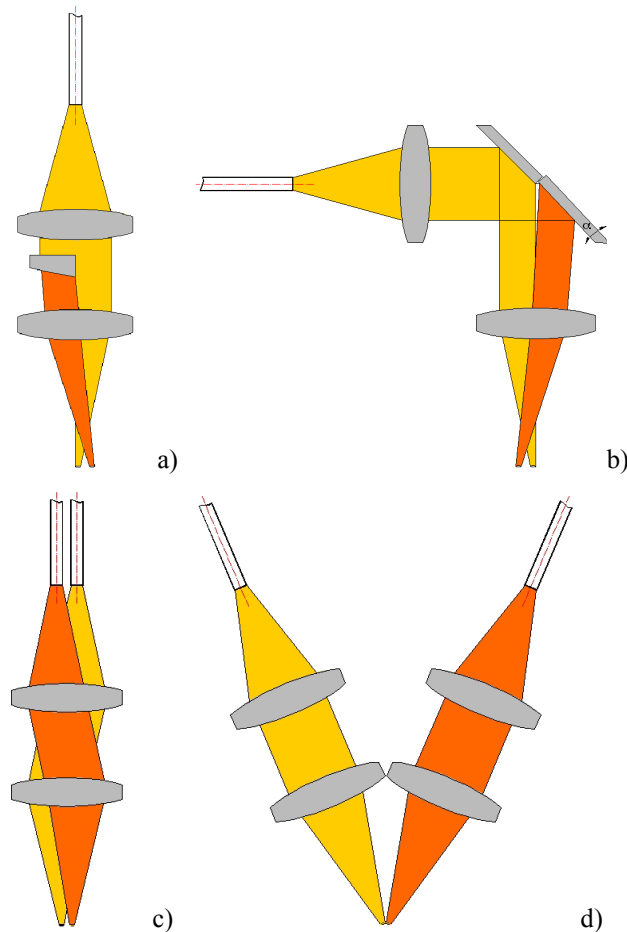


Bild 2.16: Erzeugung eines Doppelfokus mittels Strahlteilung durch eine optische Keilplatte a), geteilten Spiegel b) sowie durch Strahladdition mittels einer Doppelfaser c) beziehungsweise durch zwei Bearbeitungsoptiken d).

Durch einen optischen Keil lassen sich je nach Winkel der Keilplatte und den eingesetzten Fokussiereinheiten verschiedene Fokusabstände und Intensitätsverteilungen erzielen. In ähnlicher Weise ist bei der Strahlteilung mittels geteiltem Spiegel der Fokusabstand über den Kippwinkel der Spiegel zu verstellen. Bei der sogenannten Doppelfaser werden zwei Glasfasern – von unterschiedlichen Strahlquellen kommend – in einem gemeinsamen Faserendstecker zusammengeführt und über dieselbe Optik auf das Werkstück abgebildet. Auf eine äußerst einfache Art lässt sich ein Doppelfokus durch Addition zweier Bearbeitungsoptiken erzeugen. Bei gleicher Strahlqualität und gleicher Fokussierung der Einzelstrahlen ist der Fokusedurchmesser auf der Werkstückoberfläche ungefähr gleich dem der Einzelstrahlen. Allerdings verdoppelt sich der Fokussierwinkel in einer Richtung, während er in der Richtung quer dazu unverändert bleibt. Der Nachteil dieser Anordnung ist demzufolge nicht nur die Baugröße, sondern auch die deutliche Verschlechterung der Strahlqualität [50].

Somit bietet die Doppelfokustechnik die Möglichkeit einer frei einstellbaren Leistungsverteilung, wodurch im Vergleich zur Einzelfokustechnik neue Verfahrensparameter zur Verfügung stehen, die eine weitgehende Adaption des Prozesses an die Aufgabenstellung ermöglichen. Bestimmt wird die Leistungsverteilung auf der Werkstückoberfläche durch den Abstand a der Einzelfoki, die Orientierung der Brennflecke relativ zur Vorschubrichtung sowie die frei wählbare Leistung im einzelnen Fokus.

Erhöhte Flexibilität

Diese neu gewonnenen Einstellmöglichkeiten ermöglichen es, den Prozess an die Aufgabenstellung anzupassen und in Abhängigkeit der Prozessbedingungen zu regeln. Dadurch wird ein hohes Maß an Flexibilität erreicht. Bei Kehlnähten und Stumpfstößen kann beispielsweise der Doppelfokus genutzt werden, um die Spaltüberbrückbarkeit zu erhöhen (siehe Bild 2.17 re). Die Fokusanordnung kann dabei so gewählt werden, dass beide Teilstrahlen jeweils auf einen Fügepartner treffen und nicht ohne Wechselwirkung durch den Spalt hindurchtreten. Laterale Positionierungsungenauigkeiten und dadurch bedingte Fehler werden weitgehend vermieden.

Bild 2.17 zeigt anhand von Nahtquerschliffen bei Stahl sehr deutlich, wie mit wachsendem Fokusabstand die Nahtbreite zunimmt, wobei gleichzeitig die Einschweißtiefe geringer wird. Beim Schweißen von Überlappstößen kann damit die Effizienz des Schweißprozesses gesteigert werden, da bei diesem Stoß die Festigkeit nicht von der Einschweißtiefe, sondern nur von der Nahtbreite in der Fügeebene bestimmt wird [13], [55], [56].

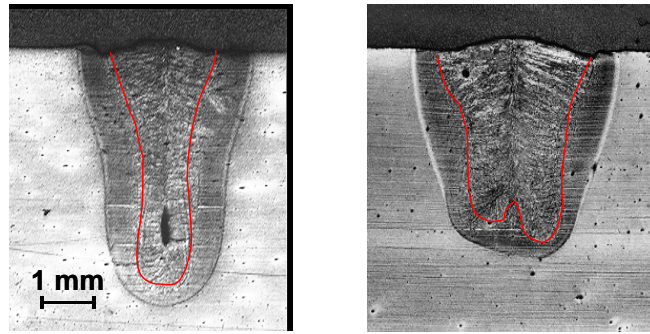


Bild 2.17: Gestaltung des Nahtquerschnitts mittels Variation des Fokusabstandes für StE 690 bei konstanter Laserleistung und Vorschubgeschwindigkeit.

Leistungssteigerung

Bei den heute zur Verfügung stehenden Festkörperlasern ist eine Reihe von Anwendungen aufgrund zu niedriger Laserleistungen nicht realisierbar. Mit den in Bild 2.16 c) und d) dargestellten Methoden lässt sich auch eine Steigerung der am Werkstück verfügbaren Laserleistung erreichen. Die Leistungssteigerung soll grundsätzlich zwei Ziele näher bringen: zum einen möchte man auf diesem Wege die Schweißgeschwindigkeiten erhöhen und damit Fertigungszeiten reduzieren, zum anderen sollen durch eine erhöhte Einschweißtiefe neue Anwendungsgebiete erschlossen werden.

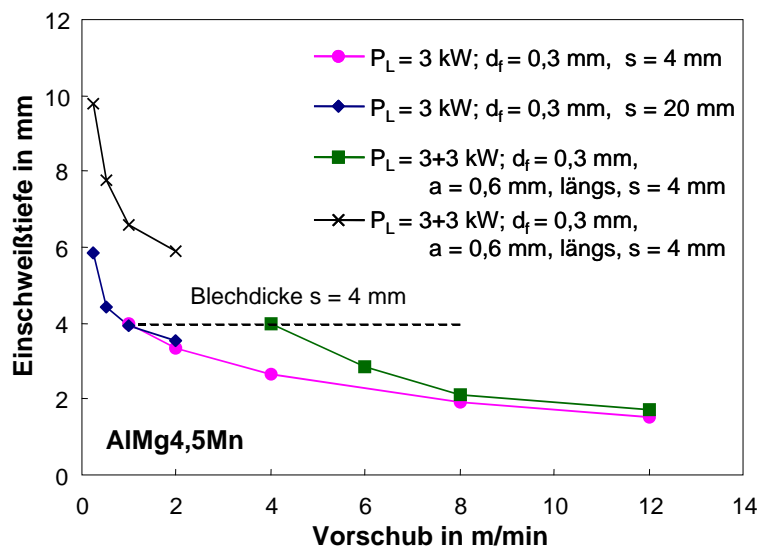


Bild 2.18: Steigerung der Einschweißtiefe bzw. Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit bei vorgegebener Tiefe durch Strahladdition mittels Doppelfaser [41].

In Bild 2.18 ist der Vergleich von Einzel- und Doppelfokustechnik für das Material AlMg4,5Mn dargestellt. Im Bereich sehr großer Einschweißtiefen führt eine Verdopplung der Laserleistung zwar nicht zu einer Verdopplung der Einschweißtiefe, die Schweißgeschwindigkeit kann jedoch beispielsweise bei einer geforderten Einschweißtiefe von $t = 4 \text{ mm}$ um das Vierfache und bei $t = 6 \text{ mm}$ um den Faktor 8 von

$v = 0,25 \text{ m/min}$ auf $v = 2 \text{ m/min}$ gesteigert werden. Außerdem zeigt sich, dass die Leistungsaddition bei Aluminium nur im Bereich großer Einschweißiefen – also sehr niedrigem Vorschub – effizient ist.

Schweißnahtqualität und Prozessstabilität

Der wichtigste Vorteil der Doppelfokustechnik liegt in der Erhöhung der Schweißnahtqualität und der Prozesssicherheit. Wie schon erwähnt, können durch den Einsatz dieser Technik zum einen bestimmte Nahtfehler im Vergleich zur Einstrahltechnik sehr stark reduziert oder gar vermieden werden, und zum anderen lässt sich die Fehler-toleranz des Schweißprozesses aufgrund der geringeren Empfindlichkeit gegenüber Spalt und Bauteillagenänderungen insgesamt deutlich erhöhen. Bereits in den ersten Veröffentlichungen zum Thema Steigerung der Schweißnahtqualität durch den Einsatz der Doppelfokustechnik [52] konnte nachgewiesen werden, dass diese Verfahrensvariante einen positiven Einfluss auf die Stabilität des Schweißprozesses hat. Das Diagramm in Bild 2.19 zeigt den Einfluss der Doppelfokustechnik auf die Prozessstabilität beim Schweißen von Aluminium.

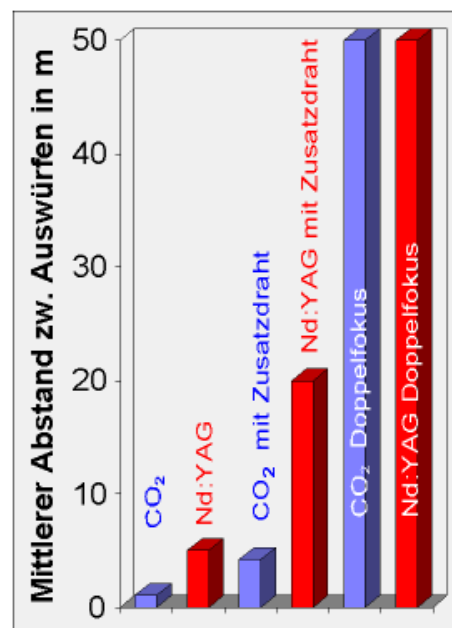


Bild 2.19: Einfluss der Doppelfokustechnik auf die Prozessstabilität beim Laserstrahlschweißen von Aluminium [52].

Als Hauptursache für die Entstehung von Prozessporen und Schmelzbadauswürfen wurde die Instabilität der Dampfkapillare bzw. deren Kollaps identifiziert (siehe Abschnitt 2.2.3). Demzufolge liegt die Lösung dieser Problematik in der Schaffung einer stabilen, weit geöffneten Dampfkapillare, die das ungehinderte Ausströmen des Metaldampfes ermöglicht; die Doppelfokustechnik bietet hierfür eine elegante Lösung.

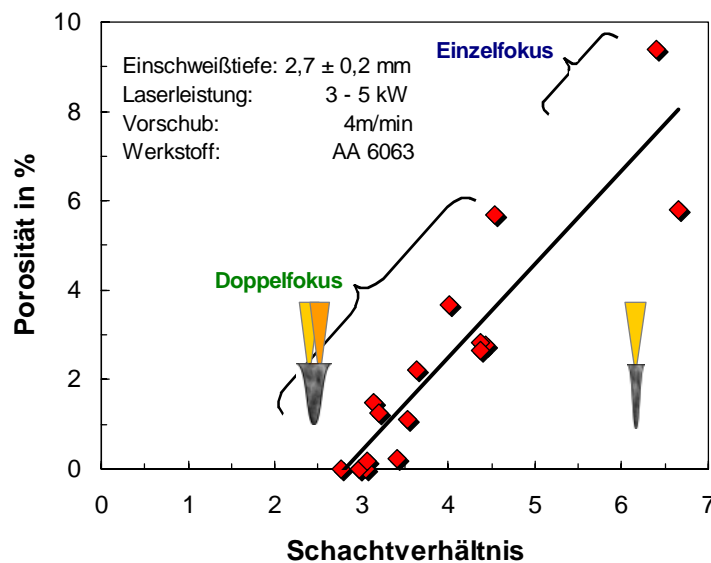


Bild 2.20: Porosität in Abhängigkeit des Schachtverhältnisses der Kapillare – Umfang der Kapillare zu Kapillartiefe – bei konstanter Einschweißtiefe [40].

In [40] und [57] konnte eine eindeutige Korrelation zwischen der Häufigkeit von Poren und Auswürfen und einem zu kleinen Öffnungsquerschnitt der Kapillare nachgewiesen werden. Ist durch die vorgegebene Schweißaufgabe eine bestimmte Einschweißtiefe gefordert, so kann die Kapillaröffnung direkt durch die Doppelfokustechnik beeinflusst werden. Bild 2.20 zeigt hierzu die Porosität in Abhängigkeit des erzielten Schachtverhältnisses bei konstanter Einschweißtiefe. Zu erkennen ist, dass ab einem bestimmten Schachtverhältnis die Porosität proportional mit steigendem Schachtverhältnis zunimmt. Das Maximum wird beim Schweißen mit dem Einzelfokus erreicht.

3 Systemtechnik, Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

In diesem Kapitel wird näher auf die verwendete Systemtechnik eingegangen. Der Versuchsaufbau von der Strahlquelle über die Strahlführungskomponenten und die Fokussiereinrichtungen bis hin zu den untersuchten Werkstoffen soll hier nicht nur genannt, sondern auch beschrieben werden. Außerdem wird die Vorgehensweise bei der Durchführung der Experimente verdeutlicht, wobei auch die eingesetzten Hilfsmittel dargestellt werden.

3.1 Strahlquellen

In allen hier diskutierten Schweißversuchen wurden ausschließlich Festkörperlaser eingesetzt, weshalb in diesem Abschnitt auf die Eigenschaften und den Aufbau anderer Laserstrahlquellen nicht eingegangen wird.

3.1.1 Lampengepumpter Nd:YAG-Laser

Das laseraktive Medium (LAM) der Festkörperlaser besteht aus Kristallen oder Gläsern, den sogenannten Wirtsmaterialien, die mit Metall-Ionen oder Ionen seltener Erden dotiert werden. Das Wirtskristall des Nd:YAG- Lasers besteht aus **Yttrium-Aluminium-Granat** ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$), bei dem im Kristallgitter Y^{3+} -Ionen durch Nd^{3+} -Ionen ersetzt sind [2]. Die von Nd:YAG- Lasern emittierte Strahlung liegt im infraroten Bereich und hat eine Wellenlänge von $\lambda = 1064 \text{ nm}$, was eine Strahlführung mittels Glasfaser ermöglicht. Die Länge der sogenannten Lichtleitkabel (LLK) beträgt dabei standardmäßig zwischen 20 und 50 m. Sie bieten damit eine einfache Leistungsübertragung über große Entfernungen, hohe Bearbeitungsflexibilität sowie geringen Justieraufwand. Außerdem ist die Anfälligkeit gegenüber Umgebungseinflüssen, verglichen mit der freien Propagation in Strahlführungssystemen von CO_2 - Lasern, sehr gering.

Die Anregung des LAM erfolgt durch sogenanntes optisches Pumpen mittels Krypton- oder Xenon-Bogenlampen. Wesentlich aufgrund der Tatsache, dass lediglich ein ge-

ringer Teil des breitbandigen Pumplichts tatsächlich zum „Pumpen“ des Laserstabs beiträgt, weisen Nd:YAG-Laser einen Gesamtwirkungsgrad von nur 2 - 5 % auf. Der Rest der Pumpenergie muss als Verlustwärme abgeführt werden. Da die Kühlung des Laserstabes über dessen Mantelfläche erfolgt, entsteht im LAM ein radialer Temperaturgradient, der zu einer über den Querschnitt ungleichförmigen Verteilung des Brechungsindex führt. Dies ist der Grund für den „thermischen Linseneffekt“, welcher zu einer Verschlechterung der Strahlqualität führt.

Die heutzutage maximal auskoppelbare Strahlleistung von bis zu 800 W pro Kavität (siehe Bild 3.1) wird zugunsten besserer Strahleigenschaften in der Regel nicht voll ausgeschöpft. Zur Erzielung hoher Laserausgangsleistungen erfolgt in der Praxis eine Hintereinanderschaltung mehrerer Kavitäten, wodurch eine einfache Skalierung und modulare Bauweise ermöglicht wird.

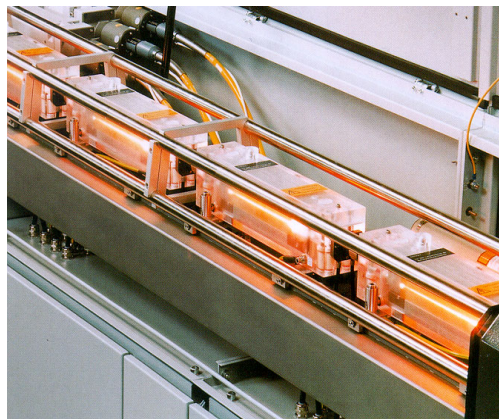


Bild 3.1: In Reihe geschaltete Kavitäten eines lampengepumpten Nd:YAG- Lasers [Quelle: TRUMPF- Laser].

Eingesetzt wurden für die Versuche ausschließlich Laser der Firma TRUMPF- Laser. Insgesamt kamen drei Strahlquellen zum Einsatz: ein HL4006D mit 4,0 kW Ausgangsleistung sowie zwei HL3006D mit jeweils 3,0 kW Ausgangsleistung. Das Strahlparameterprodukt dieser Laserstrahlquellen wird mit $w_0\Theta_0 = 25 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ angegeben (w_0 = Taillendurchmesser, Θ_0 = voller Divergenzwinkel des Laserstrahls), was den Einsatz von Lichtleitkabeln mit einem Faserkerndurchmesser von 600 μm ermöglicht. Dabei ist das *Strahlparameterprodukt* ebenso wie Wellenlänge, Leistung oder Wirkungsgrad eine feststehende Eigenschaft des Geräts, von Art und Auslegung des Resonators abhängig. Es ist ein Maß für die Fokussierbarkeit eines Laserstrahls.

3.1.2 Diodengepumpter Yb:YAG-Scheibenlaser

Bei der „ersten Generation“ der diodengepumpten Festkörperlaser wurde die für lampengepumpte Systeme übliche Bauweise beibehalten und nur die Anregungslampen durch Laserdioden ersetzt. Durch die Anregung mittels Diodenlasern kann der Wirkungsgrad durch das spektral an das laseraktive Medium angepasste Pumplicht um ca. den Faktor 5 gesteigert werden [58]. Da jedoch die Kühlung des Laserstabes analog zu lampengepumpten Festkörperlaser nur über die Mantelfläche erfolgt, ist auch bei diesem System die Strahlqualität durch den „thermische Linseneffekt“ begrenzt. Bei Hochleistungslasern ist dadurch ein Strahlparameterprodukt $w_0\Theta_0 \approx 16 \text{ mm}$ realisierbar.

Das 1992 am Institut für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart entwickelte Konzept des *Scheibenlasers* [59] stellt die „zweite Generation“ der diodengepumpten Festkörperlaser dar. Im Gegensatz zum oben besprochenen diodengepumpten Festkörperlaser erster Generation, liegt dem Scheibenlaser ein komplett neues Bauprinzip zugrunde. Die Entwicklung dieses Konzepts hatte das Ziel, die Möglichkeiten der Diodenlaseranregung konsequent zu nutzen und unter Verwendung entsprechender Materialien, Kristallgeometrien und Pumpanordnungen einen Laser zu schaffen, der die Vorzüge des CO₂-Lasers – hohe Strahlqualität, hoher Wirkungsgrad – mit denen des Festkörperlaser – prozess- und systemtechnische Vorteile der kürzeren Wellenlänge – in sich vereinigt.

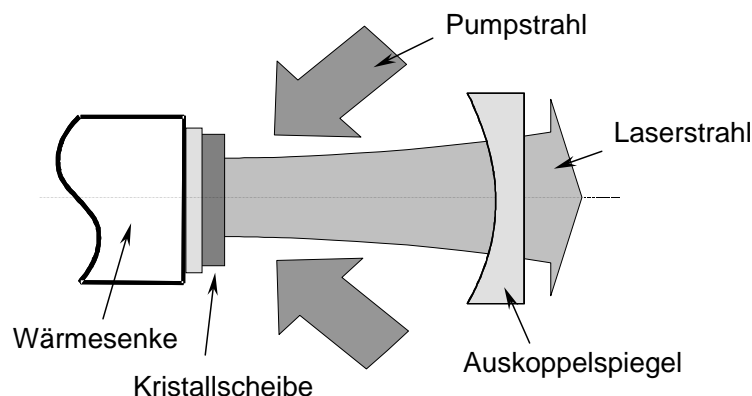


Bild 3.2: Prinzipieller Aufbau eines Scheibenlasers.

Die Idee dieses neuen Ansatzes ist aus Bild 3.2 ersichtlich: Wird die Länge eines zylindrischen Stabs so weit reduziert, bis sie deutlich geringer ist als sein Durchmesser, dann ist diese Scheibe nicht mehr über ihren Umfang zu kühlen. Stattdessen muss die in ihrem Volumen erzeugte Verlustwärme über die Stirnflächen abgeführt werden. Vorausgesetzt die Energieumsetzung Pumplicht/Laserlicht wie auch der Wärmeübergang erfolgen in radialer Richtung absolut homogen, so wird sich ein Temperaturfeld

im Kristall einstellen, wo die Isothermen parallel zu seinen Stirnflächen verlaufen. Damit ist das Entstehen einer thermischen Linse konzeptbedingt ausgeschlossen [60]. Die Yb:YAG-Scheibe mit einem Durchmesser von typischerweise 7 mm und einer Dicke von 0,3 mm ist auf ihrer Rückseite verspiegelt, so dass diese das Pump- wie auch das entstehende Laserlicht total reflektiert. Die Pumpstrahlung wird annähernd axial eingekoppelt. Damit trotz ihres kurzen Weges durch den Kristall insgesamt eine möglichst hohe Gesamtabsorption stattfindet, wird mit Hilfe externer Spiegel das reflektierte Pumplicht mehrfach auf die Scheibe gelenkt.

Durch den Einsatz von Diodenlaser als Pumpquelle ist es möglich, hohe Pumpleistungsichten zu erzielen. Dies erlaubt den Einsatz von Materialien, bei denen mittels herkömmlicher Anregung durch Lampen kein Laserbetrieb möglich ist. Der Wirtskristall des Yb:YAG-Scheibenlasers besteht aus Yttrium-Aluminium-Granat, in welchem Y^{3+} - Ionen durch Yb^{3+} - Ionen ersetzt sind. Mit der Wahl dieses Mediums ist ein sehr hoher optisch-optischer Wirkungsgrad von bis 83% zu erreichen [61], [62], wobei die emittierte Wellenlänge 1030 nm beträgt

Bild 3.3 zeigt einen Teil des Resonators von einem von der Firma TRUMPF-Laser gebauten und in dieser Arbeit eingesetzten Scheibenlaser. Der Parabolspiegel sowie die Spiegel zur Realisierung der Mehrfachdurchgänge der Pumpstrahlung bestimmen zusammen mit den im Bild rechts zu sehenden Pumpmodule die Größe des Geräts. Die Längsabmessung des Geräts wird zudem von der Resonatorlänge – welche in direktem Zusammenhang mit der Strahlqualität steht – bestimmt. Leistungen im Multi kW Bereich werden durch serielle Kopplung mehrerer Scheiben erreicht.

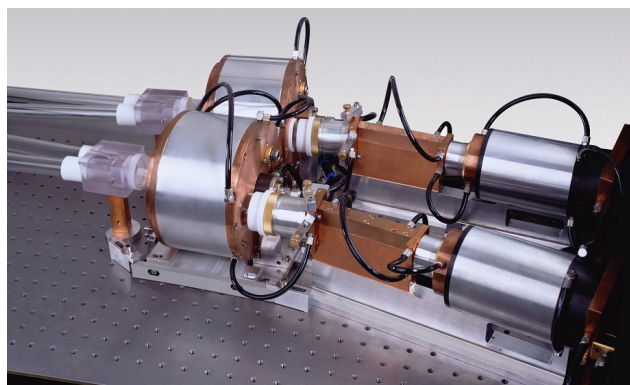


Bild 3.3: Teil des Resonators eines 1,5 kW Scheibenlasers bestehend aus zwei Pumpmodulen in „W- Anordnung“ [Quelle: TRUMPF- Laser].

Die Leistung der in dieser Arbeit zur Verfügung stehenden Scheibenlaser beträgt jeweils 1,5 kW bei einem Strahlparameterprodukt $w_0\Theta_0 = 6 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$, was die Verwendung von Lichtleitkabeln mit einem Faserkerndurchmesser von 150 μm erlaubt. Der Gesamtwirkungsgrad dieser Strahlquellen wird mit 16% angegeben.

In der folgenden Tabelle 3.1 sind die technischen Daten und Kenngrößen der eingesetzten Strahlquellen vergleichend aufgeführt.



	Lampengepumpter Nd:YAG HL006D	Yb:YAG- Scheibenlaser HLD1500.2D
		
Laseraktives Medium	Nd:YAG-Kristall	Yb:YAG-Kristall
Wellenlänge [nm]	1064	1030
Anregung	Lampen	InGaAs-Dioden
max. Leistung [kW]	4,0	1,5
Strahlparameterprodukt [mm mrad]	~ 25	~ 6
Strahlführung	Glasfaser	Glasfaser
Faserkerndurchmesser [μm]	600	150
Wirkungsgrad elektrisch/optisch [%]	2 – 5	~ 16
Wartungsintervall [h]	ca. 1000 (Lampen)	10.000 (Dioden)

Tabelle 3.1: Technische Daten und Kenngrößen der eingesetzten Laser im Vergleich.

3.2 Optische Komponenten zur Strahlführung und Strahlformung

3.2.1 Lichtleitkabel

Wie bereits in Kapitel 3.1 erwähnt, bietet die Wellenlänge beider Lasertypen die Möglichkeit der Strahlführung mittels Glasfaser. Basierend auf dem Prinzip der Totalreflexion von Licht an der Grenzfläche zwischen optisch dichteren und optisch weniger dichten Medien ist eine nahezu verlustfreie Leistungsübertragung möglich. Lediglich bei der Ein- und Auskopplung in und aus der Glasfaser sind Verluste von jeweils 3-4 % zu verzeichnen. Durch die Vielfachreflexion der Laserstrahlung in der Glasfaser resultiert am Austritt aus der Faser eine homogenisierte Leistungsdichteverteilung.

Für die Referenzversuche mit dem Einzelfokus bzw. auch bei den Doppelfokus- Versuchen mit Strahlteilung oder Strahladdition mittels Optik- Addition wurden *Einfachfasern* eingesetzt. Die jeweiligen Kerndurchmesser dieser Fasern sind in Tabelle 3.1 aufgelistet.

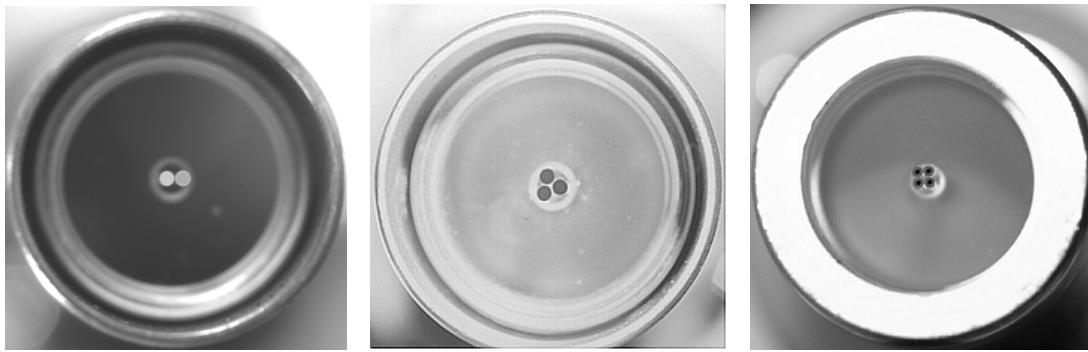


Bild 3.4: Doppel- und Dreifachfaser im Standardfaserendstecker, hier mit 600 μm Faserkerndurchmesser und einem Fasermittenabstand von 720 μm sowie Quattrofaser (Bild re) mit Faserkerndurchmesser 200 μm und Fasermittenabstand von 460 μm [Quelle: TRUMPF- Laser].

Bei den Mehrfachfasern ist der Abstand zwischen den Faserenden fest, die Endflächen liegen in einer Ebene und die Strahlachsen der einzelnen Fasern sind parallel. Die in Bild 3.4 abgebildeten Fasern mit 600 μm Faserkerndurchmesser sind für den Einsatz mit lampengepumpten Nd:YAG- Lasern konstruiert. Für die Experimente standen drei verschiedene Doppelfasern mit Faserabständen von 720, 1200 und 2000 μm zur Verfügung. Je nach verwendeter Fokussiereinheit und daraus resultierenden Abbildungsmaßstäben erhält man auf der Werkstückoberfläche bestimmte Fokusburchmesser und entsprechende Fokusabstände (siehe Tabelle 3.2). Die oben abgebildete Dreifachfaser, ebenfalls für den Nd:YAG- Laser, besitzt einen Abstand von Fasermitte zu Fasermitte von 720 μm , wobei die Faserenden in einem Dreieck angeordnet sind.

Brennweite	Fokusburchmesser	Fokusabstand DF 720 μm	Fokusabstand DF 1200 μm	Fokusabstand DF 2000 μm
f=100 mm	0,3 mm	0,36 mm	0,6 mm	1,0 mm
f=150 mm	0,45 mm	0,54 mm	0,9 mm	1,5 mm

Tabelle 3.2: Fokusabstand bei den eingesetzten Doppelfasern (DF) für unterschiedliche Fokussierungen und der daraus resultierende Fokusburchmesser.

Für den Einsatz mit dem Scheibenlaser wurden Lichtleitkabel mit einem Faserdurchmesser von 150 beziehungsweise 200 μm eingesetzt. Die Versuche mit der Fokussiertechnik wurden mit einer von TRUMPF- Laser speziell entwickelten Quattrofaser durchgeführt (Bild 3.4. re).

3.2.2 Standard- Bearbeitungsoptiken

Nach dem Verlassen der Glasfaser wird der Laserstrahl mit Hilfe einer Bearbeitungsoptik auf das Werkstück fokussiert. Zunächst wird der Strahl kollimiert und anschlie-

ßend fokussiert, was der Abbildung des Faserendes auf das Werkstück entspricht. Um die für den jeweiligen Prozess gewünschte Brennfleckgröße und Leistungsdichte zu erhalten, werden Optiken mit unterschiedlichen Linsensystemen eingesetzt.

Verwendet wurden Standardbearbeitungsoptiken der Firma TRUMPF- Laser mit Linsendurchmesser von einem und zwei Zoll. Bei den „kleinen“ Bearbeitungsoptiken (Bild 3.5, li) beträgt dabei die Brennweite der Kollimationslinse $f_K = 100$ mm. Mit Fokussierlinsen der Brennweite $f = 100$ mm resultiert für diese Konstellation ein Abbildungsmaßstab von 1:1.

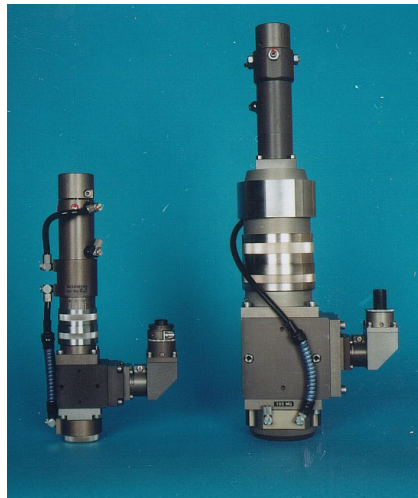


Bild 3.5: Standard- Bearbeitungsoptiken D35 (li) und D70 (re) [Quelle: TRUMPF- Laser].

Die im Bild 3.5 rechts abgebildete Optik ist mit einer Kollimationslinse $f_K = 200$ mm aufgebaut. Mit Fokussierlinsen der Brennweite $f = 100$ mm, $f = 150$ mm und $f = 200$ mm resultiert für diese Kombination ein Abbildungsmaßstab von 1:2, 1:1,33 und 1:1.

3.2.3 Doppelfokusoptiken

Zur Erzeugung des Doppelfokus sind verschiedene Strategien zum Einsatz gekommen. In diesem Abschnitt sollen die Optiken beschrieben werden, welche den Doppelfokus durch Strahlteilung generieren.

Strahlteilung durch optische Keilplatten – Bifokaleinsätze

In erster Linie wurden sogenannte Bifokaleinsätze verwendet. Das sind unterschiedliche Keilplatten, die zwischen Kollimationslinse und Fokussierlinse eingebaut werden (siehe Bild 2.16, a). Es kamen drei verschiedene Keilplatten mit einem Keilwinkel

von 3, 5 und 10 mrad zum Einsatz. Daraus resultieren je nach Fokussierung unterschiedliche Fokusabstände, die in Tabelle 3.3 zusammengefasst sind.

Brennweite	Fokusbrennweite	Fokusabstand Bifokal 0,3	Fokusabstand Bifokal 0,5	Fokusabstand Bifokal 1,0
f=100 mm	0,3 mm	0,3 mm	0,5 mm	1,0 mm
f=150 mm	0,45 mm	0,45 mm	0,75 mm	1,5 mm

Tabelle 3.3: Fokusabstand bei den eingesetzten Bifokalloptiken für unterschiedliche Fokussierungen und der daraus resultierende Fokusbrennweite.

Charakteristisch für diese Art der Doppelfokustechnik ist die resultierende Intensitätsverteilung als Funktion der Fokallage, siehe Bild 3.6. Im Unterschied zur Doppelfasertechnik ist lediglich im Fokus die Leistungsdichteverteilung der Teilstrahlen rotationssymmetrisch. Oberhalb der Brennebene schneiden die Teilstrahlen, es ist eine Überlagerung in den Messungen zu erkennen. Unterhalb der Brennebene zeichnen sich die halbkreisförmigen Teilstrahlen ab.

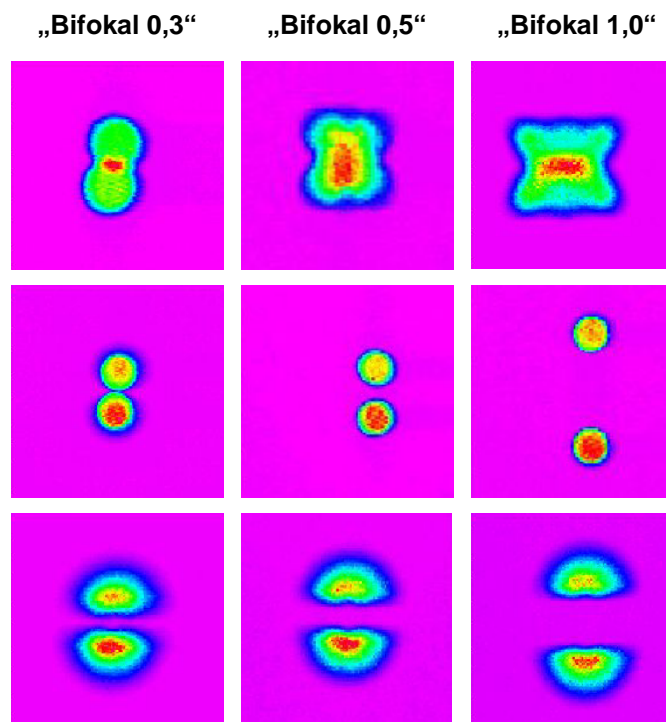


Bild 3.6: Intensitätsverteilung oberhalb (Reihe oben), in (mittlere Reihe) und unterhalb (Reihe unten) der Brennebene bei den drei verschiedenen Strahlteileroptiken mit festem Fokusabstand; gemessen bei einer Fokussierbrennweite $f = 150$ mm (vgl. Abmessungen in der Brennebene mit Tabelle 3.3).

Der Unterschied zur Doppelfaser ist demnach, dass sich bei einer Fokussierungsänderung nicht nur die Fokusabmessung verändert, sondern auch die Form des Brennflecks sowie der Abstand zwischen den beiden Foki.

Strahlteileroptik „T 45“

Zur Erzeugung von zwei Foki, deren Abstand stufenlos einstellbar ist, wurde am IFSW eine Optik gebaut, bei welcher die Strahlteilung über einen geteilten Spiegel (siehe Skizze in Bild 2.16, b) erfolgt. Die „T45“ genannte Optik ist mit geöffnetem Gehäuse in Bild 3.7 dargestellt.

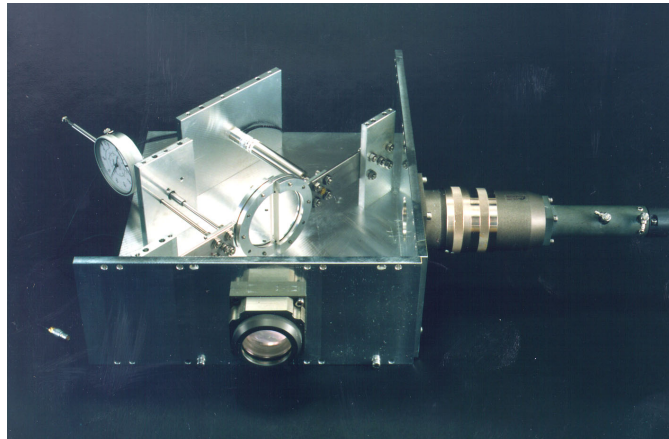


Bild 3.7: Strahlteileroptik „T 45“ mit stufenlos verstellbarem Fokusabstand und eingebautem Piezo- Aktor für die schnelle Pendelbewegungen eines Teilstrahls.

Das Gehäuse der Strahlteileroptik „T 45“ ist in den kollimierten Strahlengang einer Standard- Schweißoptik eingebaut. Die Brennweite der Fokussierlinse beträgt $f = 100$ mm. Mit Hilfe des festen und des beweglichen Spiegels wird der kollimierte Laserstrahl in zwei Teillaserstrahlen aufgeteilt und um 90° abgelenkt. Beide Spiegel aus beschichtetem Quarzglas haben einen halbrunden Querschnitt und sind über ein Federstahlband mit dem Gehäuse verbunden. Mit Hilfe einer Gewindestange kann die Position des festen Spiegels gegenüber der des beweglichen Spiegels verändert und somit der Abstand der beiden durch die Fokussierung entstehenden Foki variiert werden (siehe Bild 3.8). Die spielfrei mit dem Spiegel verbundene Messuhr garantiert die reproduzierbare Einstellung des Fokusabstands.

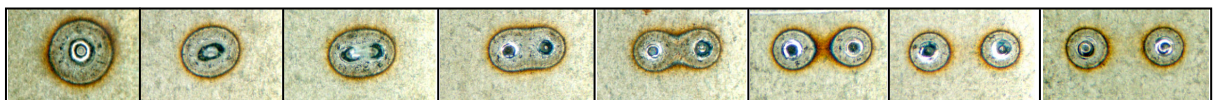


Bild 3.8: Einbrände von Laserpulsen im Fokus auf einem Stahlblech – Stufenlos verstellbarer Fokusabstandes von 0 (Superposition) bis 2,4 mm (bei $f = 100$).

Durch den am zweiten Spiegel eingebauten Piezo- Aktor ist es außerdem möglich, einen Teilstrahl zu „pendeln“. Der Aktor überträgt das mit einem Funktionsgenerator erzeugte und mit einem Leistungsverstärker verstärkte Spannungssignal auf den beweglichen Spiegel. Es soll dabei anhand von Schweißversuchen überprüft werden, ob durch die generierte Pendelbewegung die Dampfkapillare dergestalt beeinflusst wer-

den kann, dass eine Stabilitätssteigerung beziehungsweise eine Erhöhung der Schweißnahtqualität durch Reduzierung der Prozesssporen erzielt wird.

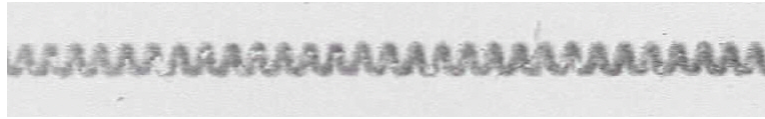


Bild 3.9: Mittels Piezo- Aktor generierte Pendelbewegung des Teillaserstrahls. Einbrand in ein eloxiertes Aluminiumblech bei $P_L = 80 \text{ W}$ und $v = 4 \text{ m/min}$ [63].

Bild 3.10 zeigt den gesamten Versuchsaufbau und die dabei eingesetzten Komponenten. Ein Leistungsverstärker (2) verstärkt das Spannungssignal des Funktionsgenerators (1) und gibt das verstärkte Spannungssignal an den Piezo- Aktor weiter. Mit einem Oszilloskop (3) wird das Ausgangssignal des Funktionsgenerators eingestellt bzw. überprüft. Die T 45- Optik (4) sowie die elektronischen Geräte sind an der Z-Achse der Handhabungsmaschine montiert. Der Tisch, auf dem die Spannvorrichtung (5) montiert ist, führt die Vorschubbewegung aus, so dass die elektronischen Geräte somit durch Beschleunigungs-, Bremskräfte o.ä. nicht beeinflusst werden. Außerdem gewährleistet diese Anordnung eine hohe Präzision der Fokusslage ($\pm 0,03 \text{ mm}$), was für eine sichere Interpretation der Ergebnisse besonders wichtig ist.

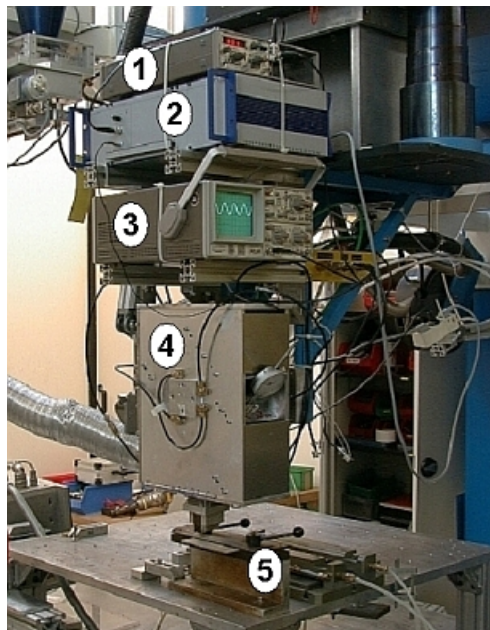


Bild 3.10: Bearbeitungsstation mit Versuchsaufbau für Doppelfokustechnik.

In den Versuchen zur Doppelfokustechnik mit dem lampengepumpten Nd:YAG- Laser wurden zwei weitere Bearbeitungsoptiken mit verstellbarem Fokusabstand eingesetzt. Die von der Firma TRUMPF-Laser gebauten Optiken (siehe Bild 3.11) können mit drei verschiedenen Brennweiten - 200, 150 und 100mm - ausgestattet werden.



Bild 3.11: Bifokaloptik mit stufenlos einstellbarem Fokusabstand [Quelle: TRUMPF- Laser].

Der Fokusdurchmesser und der Fokusabstand sind dabei abhängig von der eingesetzten Brennweite. So kann beispielsweise bei einer Brennweite $f = 150 \text{ mm}$ der Fokusabstand in einem Bereich von $a = 0,45 \text{ mm}$ bis $a = 0,75 \text{ mm}$ (Optik 1) bzw. $a = 0,9 \text{ mm}$ bis $a = 1,5 \text{ mm}$ (Optik 2) eingestellt werden.

Doppelfokusoptik für den Scheibenlaser

Aufgrund der relativ niedrigen Leistung der verfügbaren Scheibenlaser ist dort für das Schweißen von Aluminium eine Strahlteilung nicht sinnvoll. Deshalb wurden bei allen Doppelfokus- oder Fokusmatrix- Schweißversuchen die Methode der Strahladdition angewandt. Zum einen kam die bereits in Abschnitt 3.2.1 erwähnte Quattrofaser zum Einsatz und zum anderen wurden am IFSW Optiken zur Strahladdition speziell für diese Versuche gebaut (siehe Bild 3.12).

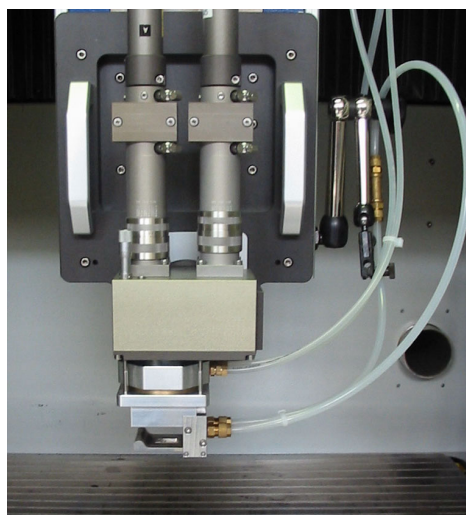


Bild 3.12: Doppelfokusoptik mit stufenlos einstellbarem Fokusabstand und einem 1:1 Abbildungsmaßstab [64].

Als Kollimation ist bei dieser Doppelfokusoptik ein Standardbauteil von TRUMPF-Laser mit einer Brennweite von $f_k = 100 \text{ mm}$ verwendet worden. Die Einstellung der z-Position der beiden Foki erfolgt über Stellringe an der Kollimation. Die Verstellung des Fokusabstandes in x- und y-Richtung erfolgt über zwei im Gehäuse angebrachte kippbare Umlenkspiegel. Hierbei wird jeweils ein Spiegel für eine Achsrichtung eingesetzt. Um ein Abbildungsverhältnis von 1:1 zu erhalten, besitzt das gemeinsame Objektiv eine Brennweite von $f = 100 \text{ mm}$.

3.2.4 Fokusmatrixoptik

Als Folge der sehr hohen Strahlqualität können bei dem diodengepumpten Scheibenlaser kleinere Fokussieroptiken eingesetzt werden. Dadurch besteht die Möglichkeit, mehrere Optiken in kompakter Bauweise unter einem kleinen Winkel zueinander anzuordnen. Bei der am IFSW konstruierten Fokusmatrixoptik können bis zu 4 räumlich getrennte Foki auf das Werkstück abgebildet werden. Mit dieser Optik können auf sehr einfache und flexible Art verschiedene Anordnungen der Einzelfoki bei verschiedenen Fokusabständen untersucht werden. Die räumliche Verstellung der Foki erfolgt dabei durch am Grundkörper angebrachte xyz-Verstellische, auf die jeweils eine Fokussieroptik montiert ist. Die Justage kann mit einer Genauigkeit von bis zu $0,05 \text{ mm}$ erfolgen. In Bild 3.13 ist diese Fokusmatrixoptik als 3D-CAD Modell mit drei bzw. mit vier eingebauten Fokussieroptiken der Baureihe BEO D35 dargestellt.

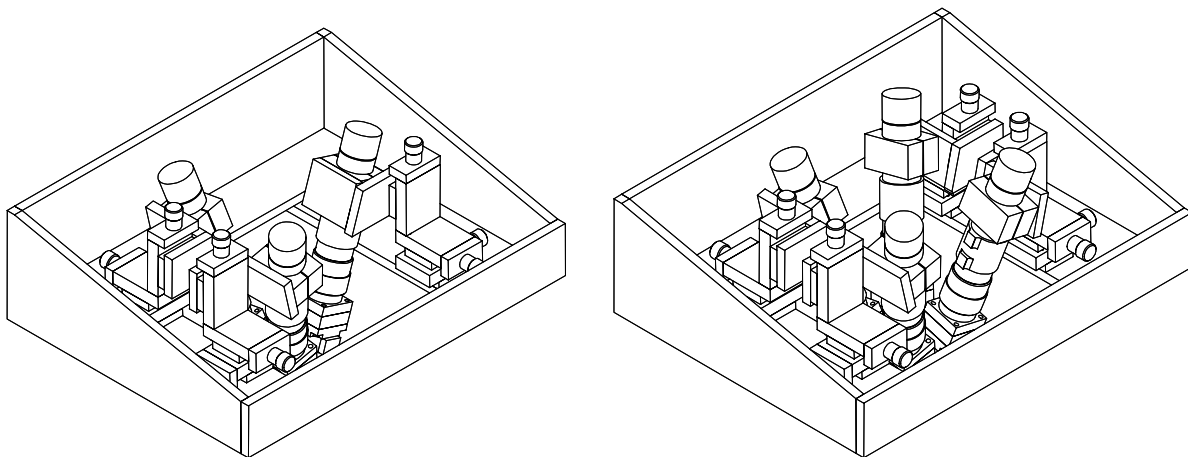


Bild 3.13: Fokusmatrixoptik mit drei (li) beziehungsweise mit vier EinzeLOPTIKEN des Typs BEO D35. Stufenlos einstellbarer Fokusabstand und Fokusslage mittels xyz-Verstellische [64].

Erst der Einsatz dieser Optik hat eine genaue und detaillierte Untersuchung der Fokusmatrixtechnik ermöglicht. Die hieraus resultierenden Erkenntnisse haben anschließend zu dem Bau der „Quattrofaser“ (siehe Bild 3.4 re) geführt.

3.3 Prozessadapter und Bearbeitungsstationen

Prozessadapter

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

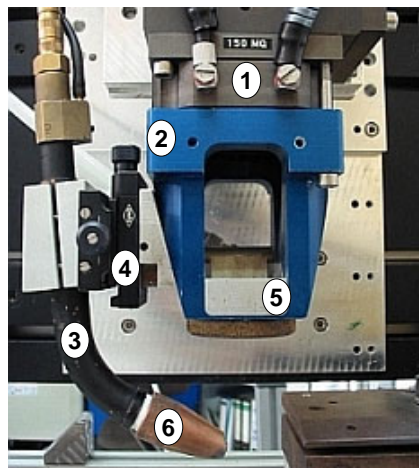


Bild 3.14: Prozessadapter zum Laserstrahlschweißen mit integrierter Schutzglaswechseleinheit, Querjet sowie Draht- und Schutzgaszufuhr.

Der in Abbildung Bild 3.14 gezeigte Prozessadapter bietet alle oben genannten Funktionen. Der Grundkörper (2) ist direkt unterhalb der Fokussierlinse (1) angebracht. Der Zusatzdraht wird über einen Standard- MIG- Brenner (3) an die Bearbeitungsstelle gebracht und kann mit Hilfe des xy- Verschiebetisches (4) exakt positioniert werden. Somit läuft der Draht während des Prozesses stabil und reproduzierbar in das Schmelzbad. Um das aufgeschmolzene Material vor Oxidation zu schützen wird koaxial zum Zusatzdraht (6) ein Schutzgas an die Schweißstelle geführt. Voraussetzung für gleichbleibende Prozessverhältnisse ist ebenso ein von Schmutz unbeeinflusster Strahlengang. Deshalb muss der Prozessadapter einen effektiven Schutz der Fokussieroptik vor Schweißspritzern und Rauch bieten. Unterhalb der Fokussiereinheit ist deshalb ein sogenannter Querjet (5) eingebaut. Diese quer zur Strahlachse führende Luftströmung sorgt dafür, dass während des Schweißens entstehende Spritzer sowie Schweißschmauch effektiv abgelenkt werden.

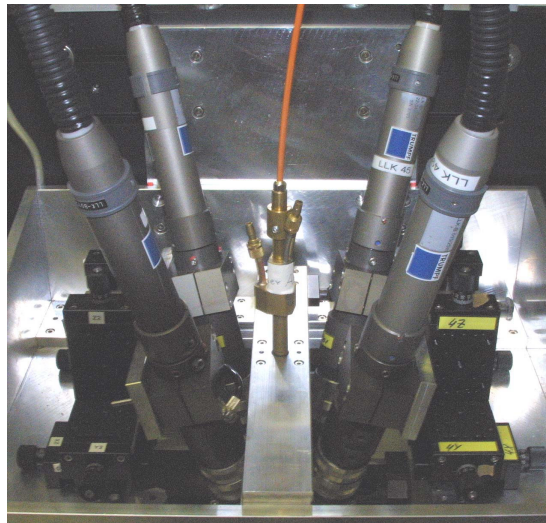


Bild 3.15: Zentrale Drahtzufuhr bei der Fokusmatrixoptik.

Bei den Versuchen mit den Sonderbearbeitungsoptiken wurden diese Funktionen auf jeweils angepasste Art sichergestellt. Bei allen Versuchen wurden je nach Ziel und Anforderungen Schutzgas, Zusatzdraht und Querjet eingesetzt. Diese Einzellösungen erfordern zum Teil individuelle, provisorische Konstruktionen, die dementsprechend einen höheren Justageaufwand mit sich bringen und deshalb nicht als Standard zu betrachten sind. In der Mitte von Bild 3.15 ist beispielsweise die Drahtzuführungslanze zu erkennen wie sie beim Schweißen mit der Fokusmatrixoptik mit zentraler Drahtzufuhr untersucht wurde (siehe Abschnitt 5.3). Die Lanze ist in horizontaler Richtung mittels eines am Grundkörper der Fokusmatrixoptik montierten xy- Verschiebetischs verstellbar. Die Verstellung in vertikaler Richtung erfolgt durch das Verschieben der in der Aufnahme geklemmten Lanze.

Bearbeitungsstationen

Die Versuche wurden an vier verschiedenen Bearbeitungsstationen durchgeführt. Grund dafür war, dass nicht alle verfügbaren Laserstrahlquellen und Optiken auf jeder Bearbeitungsstation angesteuert und eingesetzt werden können.

Für die in Kapitel 4.1.1 vorgestellten Versuche stand die 4-Achsen- Bearbeitungsstation VARILAS der Firma Held zur Verfügung.

Die Versuche zur Bestimmung der Schwelle, also dem Übergang vom Wärmeleitungsschweißen zum sogenannten Tiefschweißen sowie die ersten Versuche zum Schweißen mit dem Scheibenlaser (Kapitel 5.1 und 5.1.3) wurden an einer 4-Achsen- Laserbearbeitungsstation des Typs LASMA 10.54 der Firma TRUMPF- Laser (siehe Bild 3.16) durchgeführt. Mit einem Verfahrensweg von bis zu einem Meter, einer Bear-

bearbeitungsgeschwindigkeit von maximal 20 m/min und einer Positioniergenauigkeit von $\pm 0,02$ mm ist diese Anlage besonders gut für Grundlagenuntersuchungen geeignet.



Bild 3.16: Bearbeitungsstation LASMA 10.54.

Die Fokusmatrixversuche sowie die in Kapitel 5.2 und 5.3 beschriebenen Versuche wurden auf der sogenannten LEICHTER- Station durchgeführt (die Anlage wurde im Rahmen des vom BMBF geförderten gleichnamigen Forschungsprojektes aufgebaut). Sie besteht aus einem Standard- Industrieroboter der Firma KUKA, welcher auf einer Lineareinheit montiert ist. Zusätzlich ist es möglich, durch einen hochdynamischen Lineardirektantrieb, welcher mit der Robotersteuerung verknüpft ist, Versuche durchzuführen, welche eine sehr genaue z- Positionierung erfordern. Bei den hier beschriebenen Untersuchungen wurde die Relativbewegung zwischen Bauteil und Laserstrahl durch die schnelle Linearachse erzeugt.

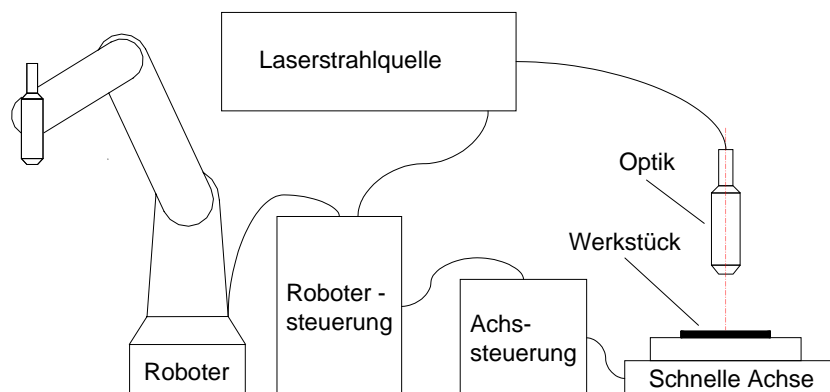


Bild 3.17: Vernetzung der Steuereinheiten des Roboters und der „Schnellen Achse“.

Die Verfahrenswege und die Geschwindigkeit werden in einen angeschlossenen PC eingegeben und von diesem an die Steuerung der Achse weitergeleitet. Die Ansteuerung des Lasers, der Linearachse, des Prozessgases und der anderen Zusatzmedien erfolgt bei diesem Versuchsaufbau über die Steuereinheit des Roboters. Bild 3.17 zeigt schematisch die Vernetzung der eingesetzten Komponenten.

3.4 Untersuchte Werkstoffe

Reinaluminium ist aufgrund der niedrigen Festigkeitswerte für technische Anwendungen nur eingeschränkt geeignet. Deshalb konzentrieren sich die Untersuchungen dieser Arbeit im Wesentlichen auf das Schweißen von *Aluminiumlegierungen*. Durch die Beimischung von Legierungselementen, wie zum Beispiel Silizium, Magnesium, Mangan und Kupfer, lassen sich seine Werkstoffeigenschaften erheblich beeinflussen. Vor allem betrifft dies die Festigkeit, die Härte sowie die Gießbarkeit des Aluminiums.

Wie bereits in Kapitel 2.2 erläutert wurde, treten beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen häufig Nahtfehler in Form von Wasserstoffporen, Schmelzbadauswürfen und Prozessporen auf. Aufgrund der unterschiedlichen Ursachen für die Porenentstehung und um die deutliche Abgrenzung zwischen Prozessporen und Wasserstoffporen zu unterstreichen, soll im weiteren Verlauf dieser Arbeit zwischen dem Schweißen von *Aluminium- Knetlegierungen* und dem Schweißen von *Aluminium- Druckguss* unterschieden werden.

3.4.1 Aluminium- Knetlegierungen

Als Knetlegierungen werden Legierungen bezeichnet, die sich gut umformen lassen. Bei einem Teil der Aluminium- Legierungen ist durch Glühen, Abschrecken und anschließendes Auslagern eine Steigerung der Härte und der Festigkeit zu erreichen, was als Aushärten bezeichnet wird. Eine Steigerung der Festigkeit ist bei nichtaushärtbaren Aluminium- Legierungen nur durch eine Kaltverfestigung zu erreichen. Diese Legierungen werden als naturhart bezeichnet [65], [66].

AlMgSi1- Legierungen

Die AlMgSi- Legierungen sind die am häufigsten eingesetzten Aluminium-Knetlegierungen und finden ihre Anwendung vor allem in Strangpressprofilen und als Außenhautteile im Karosseriebau. Neben der guten Umformbarkeit ist auch die gute Schweißbeignung dieser Legierung von praktischer Bedeutung. AlMgSi1 zählt zu den Legierungen der 6000-er Gruppe und ist über die Mg_2Si - Phase aushärtbar. In Tabelle 3.4 ist die chemische Zusammensetzung von AlMgSi1 (AA 6082) aufgeführt.

Mit einem Silizium- und Magnesiumanteil von etwa 1% liegt dieser Werkstoff im Bereich maximaler Heißbrissanfälligkeit (siehe Bild 2.7). Die Vermeidung der Heißrisse durch Verwendung von Zusatzmaterialien wurde bereits in Kapitel 2.2 erwähnt und

ist Stand der Technik. Im Rahmen dieser Arbeit wurde jedoch in den meisten Fällen bewusst auf die Verwendung von Zusatzwerkstoffen verzichtet. Heißrisse werden somit in Kauf genommen, zumal die Festigkeit der resultierenden Schweißverbindung nicht im Vordergrund dieser Untersuchungen steht. Dadurch ist es jedoch möglich, den „reinen“ Einfluss der eingesetzten Fügetechnologie auf das Schweißergebnis ohne Einwirkung von weiteren „Störgrößen“ zu untersuchen.

Legierung	Leg. Nr.	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
AlMgSi1	AA6082	0,7 – 1,3	0,5	0,1	0,4 - 1,0	0,6 – 1,2	0,25	0,2	0,1
AlMg3Mn	AA5454	0,25	0,4	0,1	0,5 - 1,0	2,4 – 3,0	0,05 – 0,20	0,25	0,2
AlMg4,5Mn	AA5083	0,4	0,4	0,1	0,4 - 1,0	4,0 – 4,9	0,05 – 0,25	0,25	0,15

Tabelle 3.4: Chemische Zusammensetzung in Masse % der eingesetzten Aluminium- Knetlegierungen [66].

AlMg3Mn und AlMg4,5Mn

Die Werkstoffe der 5000-er Legierungsgruppe gehören zur Familie der naturharten Legierungen. Sie werden wegen der guten Umformbarkeit, der hohen Festigkeit und guter Korrosionsbeständigkeit vor allem für Strukturbauteile im Fahrzeugbau, aber auch für hochbeanspruchte Konstruktionen im Behälter- und Apparatebau verwendet.

Der hohe Magnesiumanteil dieser Legierungen (siehe Tabelle 3.4) reduziert die Heißrissempfindlichkeit, führt aber aufgrund der hohen Verdampfungsraten zu Prozessinstabilitäten während dem Laserstrahlschweißen. Spritzer, Schmelzbadauswürfe und Prozesssporen treten beim Schweißen dieser Legierungen sehr häufig auf.

Stoffkennwert	AlMgSi1 AA6082	AlMg3Mn AA5454	AlMg4,5Mn AA5083
c_p in kJ/kgK	0,896	0,900	0,900
h_s in kJ/kg	356	380	380
ρ in kg/dm^3	2,70	2,68	2,66
λ_{th} in W/mK	170...220	130...150	110...140
T_S in K	923	919	911
T_V in K	2313	1952	1883

Tabelle 3.5: Physikalische Eigenschaften der verwendeten Aluminium- Knetlegierungen [66], [67], [68].

Für die Berechnung der Wirkungsgrade beim Schweißen mit der Doppelfokustechnik waren die physikalischen Eigenschaften der eingesetzten Materialien notwendig. Exakte Daten sind für die einzelnen technischen Legierungen nur schwer zu finden, weshalb man sich auf die in Tabelle 3.5 zusammengefassten Stoffwerte festgelegt hat. Es sei jedoch angemerkt, dass bei der Interpretation der Ergebnisse die absolute Größe der Kennwerte keinen Einfluss auf den prinzipiellen Verlauf der Kurven hat.

3.4.2 Aluminium- Druckguss

Während bei Knetlegierungen die plastische Verformbarkeit im Vordergrund steht, ist bei den Gusslegierungen das Formfüllungsvermögen und die Vergießbarkeit die legierungsbestimmende Eigenschaft. Daher weisen Gusslegierungen im Allgemeinen mit $\sim 10 - 12 \%$ einen deutlich höheren Siliziumgehalt auf als Knetlegierungen.

Bei dem in dieser Arbeit eingesetzten GD- AlSi10MgMn handelt es sich um eine warm-aushärtbare Druckgusslegierung im naheutektischen Bereich. Durch den hohen Siliziumgehalt lässt sie sich sehr gut gießen und ist außerdem nicht heißrisgefährdet. Zentraler Problempunkt beim Schweißen von Gusswerkstoffen sind jedoch im Guss eingeschlossene Gase und die daraus resultierende Schweißnahtporosität. Vor einigen Jahren noch galten Aluminium- Druckgussbauteile aufgrund des hohen Gasgehalts im Material als mit dem Laserstrahl nicht schweißbar [69], [70], [71].

Moderne Gießverfahren ermöglichen heute jedoch selbst hochkomplexe Bauteile mit sehr geringem Wasserstoffgehalt zu gießen. Das PORAL- Verfahren, das Vakuumdruckgießen und das VACURAL- Verfahren [72] sind nur einige Verfahrensbeispiele zur Herstellung von Aluminium- Guss mit höchster Qualität und geringstem Gasgehalt.

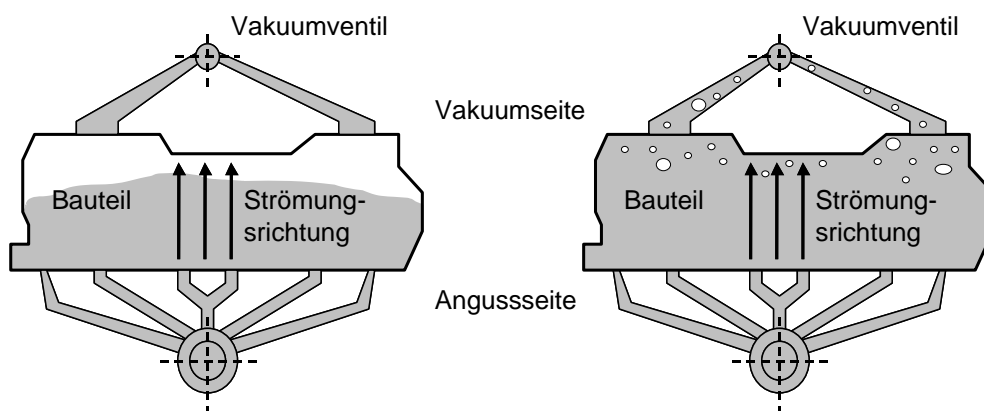


Bild 3.18: Schematische Darstellung des Gießprozesses und daraus resultierend unterschiedlich hohe Gasgehalte zwischen „Anguss“- und „Vakuumseite“ nach [33].

Dennoch werden während dem Druckgießprozess Teile des Formtrennmittels, des Kolbensmierstoffes oder der Atmosphäre in der Schmelze eingeschlossen, die dann als Wasserstoffquelle dienen. Es wurden außerdem unterschiedlich hohe Gasgehalte zwischen "Anguss"- und "Vakuumseite" der Druckguss-Bauteile festgestellt (siehe Skizze in Bild 3.18). Der hohe Nachverdichtungsdruck bewirkt, dass der Wasserstoffgehalt im Gussteil eingefroren wird, ohne dass Poren gebildet werden [29]. Beim Schweißen unter Atmosphärendruck kommt es dann zu einer explosionsartigen Gasblasenbildung. Nach der Erstarrung weisen diese Nähte eine hohe Wasserstoffporosität auf. In [33] wird in sehr ausführlicher Weise die werkstoffbedingte Porenbildung innerhalb der gesamten Prozesskette der Gussteilherstellung analysiert. Ausgehend von den verschiedenen Behandlungen der Schmelze bis zur Wärmebehandlung des fertigen Bauteils mit anschließendem Laserstrahlschweißen werden dort die verschiedenen Einflussfaktoren auf die Porenbildung dargestellt.

Anhand der Schweißversuche an Aluminium-Druckgussbauteilen soll im Abschnitt 5.2.2 untersucht werden, ob das jeweils eingesetzte Laserschweißverfahren einen Einfluss auf die Qualität der Schweißnaht hinsichtlich Wasserstoffporosität hat.

4 Laserstrahlschweißen mit dem lampen- gepumpten Nd:YAG-Laser

Die technologischen Vorteile des thermischen Werkzeugs Laser gegenüber den klassischen Verfahren sind im Wesentlichen durch die örtlich und zeitlich exakte Energieeinbringung gekennzeichnet. Damit sich jedoch der Laser in der Materialbearbeitung durchsetzt, muss dessen Energie möglichst effizient im Prozess umgesetzt und genutzt werden. Prozessstabilität, Qualität und nicht zuletzt die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens sind ausschlaggebende Kriterien. Der Zusammenhang zwischen Qualität und Prozesswirkungsgrad ist demnach von zentraler Bedeutung.

4.1 Schweißen mit dem Doppelfokus

Es ist inzwischen unumstritten, dass die Doppelfokustechnik einen sehr positiven Einfluss auf die Stabilität und Qualität des Laserschweißprozesses von Aluminiumwerkstoffen hat. Wie schon erwähnt, können Nahtfehler im Vergleich zur Einstrahltechnik sehr stark reduziert oder weitgehend vermieden werden. Als Hauptursache für die Entstehung von Prozessporen und Schmelzbadauswürfen ist die Instabilität der Dampfkapillare zu betrachten. Die eindeutige Korrelation zwischen der Häufigkeit von Poren und Auswürfen und einem zu kleinen Öffnungsquerschnitt der Kapillare konnte nachgewiesen werden (siehe Kapitel 2.3).

Eine künstliche Aufweitung der Dampfkapillare hat jedoch unmittelbare Auswirkungen auf das Aspektverhältnis (Kapillartiefe / Eintrittsöffnung). Gemäß der Modellrechnung nach Gouffé (siehe Bild 2.6) ändert sich damit der Einkoppelgrad.

Das Schweißen mit der Doppelfokustechnik hat diesen Überlegungen zufolge nicht nur einen Einfluss auf die erzielte Schweißnahtqualität, sondern auch auf den Prozesswirkungsgrad des Laserstrahlschweißens. In den folgenden Abschnitten sollen diese Aspekte eingehend diskutiert werden.

4.1.1 Einfluss des Fokusabstandes

Um den Einfluss des Fokusabstandes auf das Schweißergebnis genau zu untersuchen, wurden in der Regel Blindeinschweißungen an Aluminiumlegierungen der 5000- und 6000-er Legierungsgruppe durchgeführt. Es wurde ein großes Parameterfeld variiert und die Ergebnisse miteinander verglichen; insbesondere wurden die Einflüsse von

- ⇒ Fokusabstand,
- ⇒ Vorschubgeschwindigkeit und
- ⇒ Orientierung der Laserstrahlen bezüglich der Vorschubrichtung

untersucht.

Als Fokusabstand a wird im Weiteren die Distanz zwischen den einzelnen Fokusmittelpunkten bezeichnet. Die Bezeichnung „längs“ und „quer“ bezieht sich auf die Orientierung der Foki relativ zur Vorschubrichtung des Schweißprozesses. Demnach bedeutet Schweißen in Längsanordnung, dass die beiden Foki in Vorschubrichtung hintereinander angeordnet sind, während sie beim Schweißen in der Queranordnung nebeneinander angeordnet sind.

Einschweißtiefe und Wirkungsgrad

Bild 4.1 zeigt für drei verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten den Verlauf der Einschweißtiefe in Abhängigkeit des Fokusabstandes a . Dabei wurde die Strahlteileroptik „T 45“ bei einer Brennweite von $f = 100$ mm verwendet.

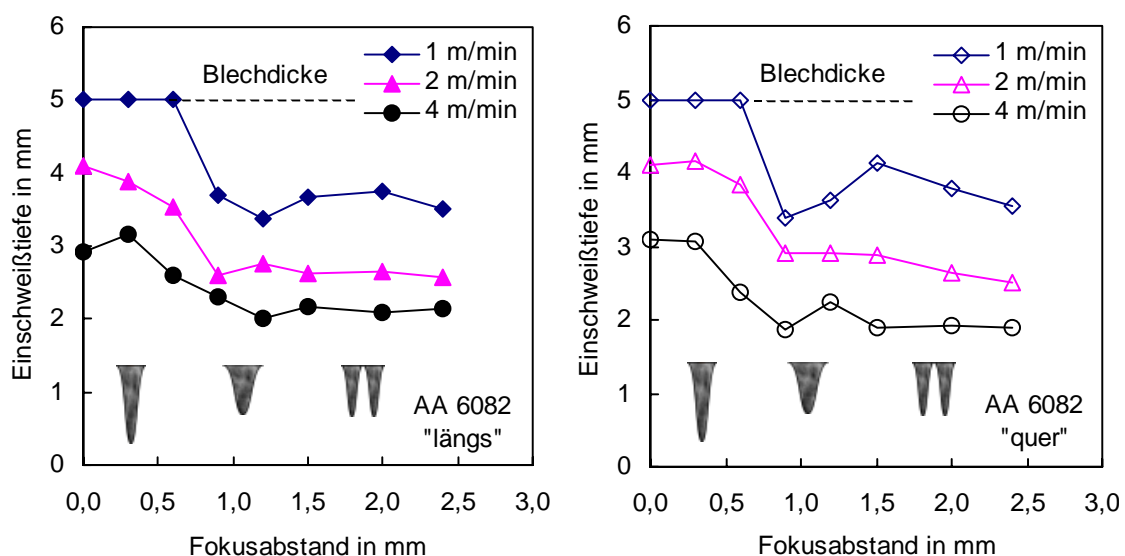


Bild 4.1: Einschweißtiefe als Funktion des Fokusabstandes für die Längs- und Queranordnung ($P_L = 2,0 + 2,0$ kW, $f = 100$ mm, $d_f = 0,3$ mm).

Angelehnt an das Modell der Vielfachreflexion (siehe Bild 2.6) ist in beiden Schaubildern die vermutete Form der Dampfkapillare bei verschiedenen Fokusabständen skizziert.

Die maximale Einschweißtiefe ist unabhängig von der jeweiligen Schweißgeschwindigkeit bei Superposition, d.h. Fokusabstand $a = 0$ mm, gemessen worden. Für diesen Fall ist die Kapillaröffnung ähnlich der beim Einstrahlschweißen, sodass das daraus resultierende hohe Aspektverhältnis einen hohen Einkoppelgrad zur Folge hat. Mit größer werdendem Fokusabstand nimmt die Einschweißtiefe ab. Durch den steigenden Fokusabstand weitet sich die Kapillaröffnung auf. Dabei wird weniger Laserleistung in das Bauteil eingekoppelt, was dazu führt, dass die Einschweißtiefe sinkt. Bei einem Wert von etwa $a = 0,9$ mm erreicht die Einschweißtiefe ihr Minimum, ab welchem die Tiefe auf einem konstanten Niveau bleibt.

Diese Abhängigkeiten werden zudem von Untersuchungen zur Messung des Einkoppelgrades bestätigt. Mit Hilfe eines kalorimetrischen Messaufbaus (siehe auch [38] und [73]) kann die während des Schweißens in das Werkstück eingekoppelte Energie gemessen werden. Dies geschieht entsprechend der Gleichung

$$\eta_A = \frac{\Delta U}{P_L \cdot \Delta t} = \frac{(\sum m_i \cdot c_{pi})}{P_L} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t}. \quad (4.1)$$

Aus der gemessenen Erwärmung der beteiligten Massen wird auf die Änderung der inneren Energie – und damit auf die eingekoppelte Energie – geschlossen.

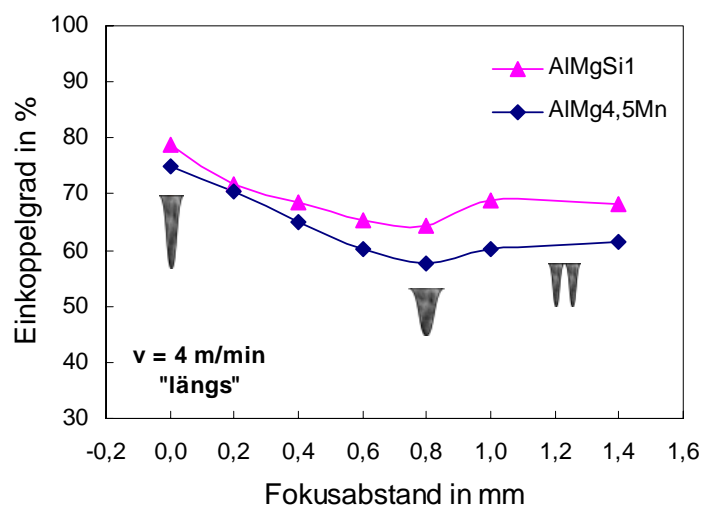


Bild 4.2: Gemessener Einkoppelgrad bei AlMgSi1 und AlMg4,5Mn (Längsanordnung, $P_L = 2,0 + 2,0$ kW, $f = 100$ mm, $d_f = 0,3$ mm, $v = 4$ m/min).

Die in Bild 4.2 dargestellten Messungen bestätigen, dass die bislang angenommenen Kapillarformen (bei $d_f = 0,3 \text{ mm}$) als Funktion des Fokusabstandes richtig sind. Unabhängig von der Anordnung der Foki ist bis zu $a = 0,8 \text{ mm}$ eine gemeinsame, weit geöffnete Dampfkapillare anzunehmen. Der Einkoppelgrad durchläuft hier ein Minimum, da bei dieser Kapillargeometrie ein großer Teil der Strahlung wieder aus der Kapillare hinaus reflektiert wird. Nach der Trennung bei größeren Werten von a in zwei einzelne Kapillaren steigt η_A aufgrund der kleineren Kapillaröffnungen nochmals leicht an. Bei einer weiteren Vergrößerung des Fokusabstandes ändert sich die Form der Kapillaren im Wesentlichen nicht mehr, und der Einkoppelgrad verhält sich so, als würde mit zwei Einzelstrahlen der Leistung $P_L = 2,0 \text{ kW}$ geschweißt.

Das Verhalten der Dampfkapillare beim Schweißen mit einer größeren Brennweite wurde anhand einer weiteren Versuchsreihe analysiert. Da die Strahlteileroptik „T45“ nicht für größere Brennweiten ausgelegt ist, wurden an dieser Stelle zwei weitere Strahlteileroptiken eingesetzt (siehe Bild 3.11), bei welchen der Fokusabstand bis maximal $a = 1,5 \text{ mm}$ verstellt werden kann.

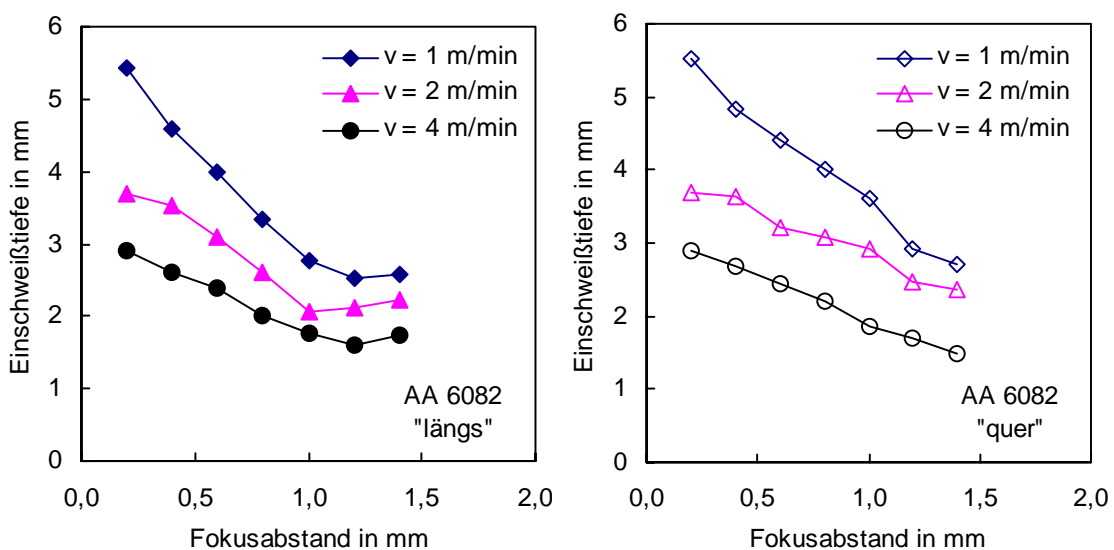


Bild 4.3: Einschweißtiefe bei $f = 150 \text{ mm}$ als Funktion des Fokusabstandes für die Längs- und Queranordnung (AA 6082, $P_L = 2,0 + 2,0 \text{ kW}$, $f = 150 \text{ mm}$, $d_f = 0,45 \text{ mm}$).

Die Schaubilder in Bild 4.3 zeigen die Abhängigkeit der Einschweißtiefe vom Fokusabstand – und damit von der Geometrie der Kapillare – beim Schweißen mit der Brennweite von $f = 150 \text{ mm}$ und dem daraus resultierenden Fokusbereich $d_f = 0,45 \text{ mm}$. Die Blechdicke betrug $s = 6,0 \text{ mm}$. Ähnlich wie in Bild 4.1 ist die Zunahme des Fokusabstandes mit einer Abnahme der Einschweißtiefe verbunden. Nachdem sich zwei Dampfkapillaren ausgebildet haben (in diesem Fall bei $a = 1,2 \text{ mm}$) bleibt die Tiefe konstant. Der Übergang von einer zu zwei Kapillaren ist mit den hier einstellbaren Fokusabständen nur in der Längsanordnung (Bild 4.3 linkes Diagramm)

gut zu erkennen, in der Queranordnung hingegen kann dies nur vermutet werden [74]. Eine weitere Vergrößerung des Fokusabstandes konnte bei 150 mm Brennweite aus konstruktiven Gründen mit keiner der vorhandenen Optiken realisiert werden. Zusammenfassend kann jedoch festgestellt werden, dass bei größerem Fokusbereich – bei sonst gleichen Bedingungen – es erst bei höherem Fokusabstand zu einer Trennung der Kapillare kommt.

Eine genauere Beurteilung der Schweißergebnisse ist unter Betrachtung des Prozesswirkungsgrades möglich. Dabei wird in erster Annäherung das pro Energieeinheit aufgeschmolzene Materialvolumen herangezogen. Das „spezifische Schmelzbadvolumen“ vermittelt demnach einen Eindruck davon, wie in Abhängigkeit des eingesetzten Schweißverfahrens die bereitgestellte Energie zum Aufschmelzen des Werkstoffes umgesetzt wird.

Der *Prozesswirkungsgrad*

$$\eta_{\text{Pr}} = \frac{F \cdot v \cdot \rho \cdot [c_p \cdot (T_S - T) + h_s]}{P_L} \quad (4.2)$$

ist als Verhältnis Nutzleistung zu Gesamtleistung definiert. Als Nutzleistung wird hier jener Wert bezeichnet, der zum Aufschmelzen des Nahtvolumens erforderlich ist. Die verwendeten Kenngrößen der Schweißnaht sind in Bild 4.4 dargestellt.

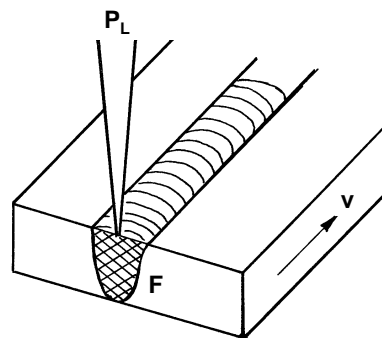


Bild 4.4: Skizze einer Schweißnaht mit Nahtquerschnittsfläche F , Vorschubgeschwindigkeit v und dabei eingesetzter Laserleistung P_L .

Die Materialparameter können für $T_S - T$ zum spezifischen Wärmebedarf zusammengefasst werden

$$H \approx \rho \cdot (c_p \cdot T_S + h_s). \quad (4.3)$$

Damit ergibt sich aus Gleichung (4.2) der Prozesswirkungsgrad zu

$$\eta_{\text{Pr}} = \frac{F \cdot v \cdot H}{P_L} \quad (4.4)$$

Aus diesem Zusammenhang ist die Proportionalität zwischen Prozesswirkungsgrad und Schmelzbadvolumen zu erkennen. Laut Gleichung (4.4) ist der Prozesswirkungsgrad proportional dem pro Energieeinheit aufgeschmolzenem Nahtvolumen.

Aus einem Schaubild, in dem das spezifische Schmelzbadvolumen über dem Fokusabstand aufgetragen wird, ist demnach der Einfluss des Fokusabstandes beziehungsweise der Fokusanordnung auf den Prozesswirkungsgrad abzuleiten. Die Diagramme in Bild 4.5 bestätigen die anhand der Einschweißtiefen getroffenen Aussagen. Mit größer werdendem Fokusabstand nimmt der Prozesswirkungsgrad ab. Dies ist zum einen mit der Abnahme des Einkoppelgrades verbunden, zum anderen nehmen bei größer werdendem Fokusabstand die durch Wärmeleitung bedingte Verluste zu [8], [73]. Letztere sind zudem stark von der Schweißgeschwindigkeit abhängig, was in Bild 4.5 zu erkennen ist. Bei niedrigen Geschwindigkeiten führen hohe Wärmeleitverluste zu einem insgesamt niedrigen Prozesswirkungsgrad. Ab dem Bereich, wo von zwei getrennten Dampfkapillaren auszugehen ist, spielt die Anordnung der beiden Foki eine wichtige Rolle. Während in der Längsanordnung der Wirkungsgrad nach der Trennung der Kapillaren sich nicht weiter ändert, steigt er in der Queranordnung deutlich an. Die Querschliffe aus Bild 4.6 verdeutlichen die Ursache für den Anstieg des Wirkungsgrades in der Queranordnung.

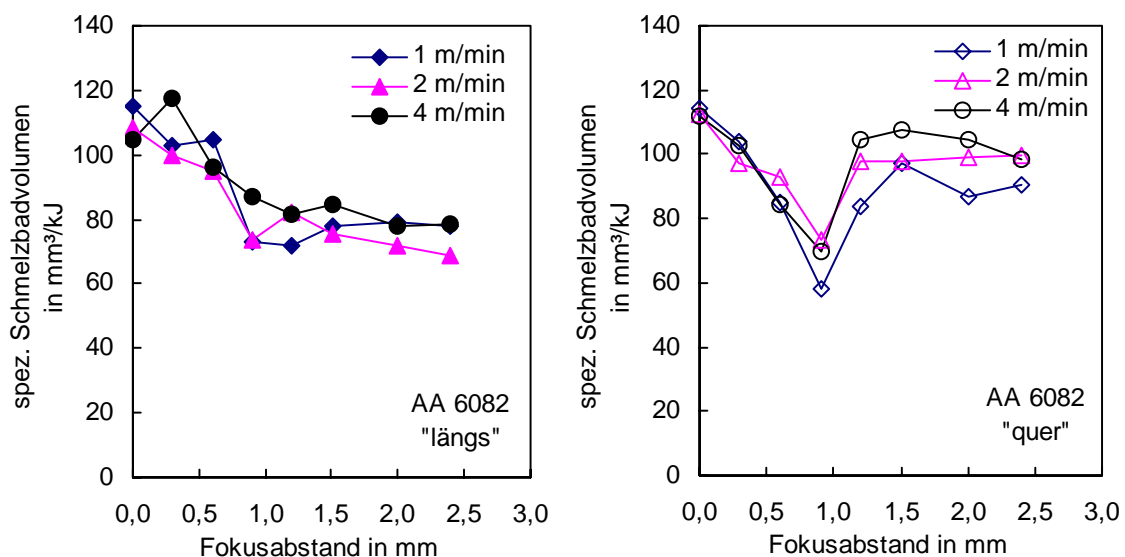


Bild 4.5: Spezifisches Schmelzbadvolumen als Funktion des Fokusabstandes für die Längs- und Queranordnung ($P_L = 2,0 + 2,0$ kW, $f = 100$ mm, $d_f = 0,3$ mm).

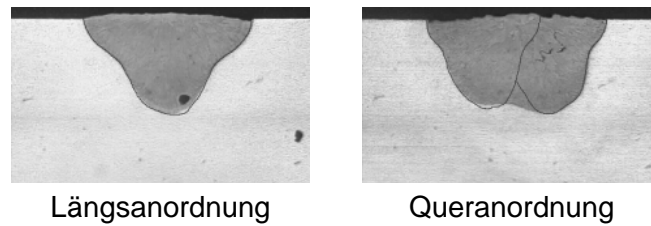


Bild 4.6: Vergleich der Nahtquerschliffe bei Längs- und Queranordnung (AA 6082, $P_L = 2,0 + 2,0$ kW, $f = 100$ mm, $d_f = 0,3$ mm).

Da in der Längsanordnung der zweite Laserstrahl in Vorschubrichtung dem ersten folgt, ist der Nahtquerschnitt deutlich kleiner als in der Queranordnung. Dieser Sachverhalt kann mit Hilfe der Existenz zweier Dampfkapillaren erklärt werden, wenn jede für sich ein „eigenes“ Schmelzbad erzeugt. Während in der Längsanordnung – beim Schweißen jenseits des Fokusabstandes wo sich zwei Dampfkapillaren ausbilden – der zweite Laserstrahl lediglich das vom ersten erzeugte Nahtvolumen wieder aufschmilzt, werden in der Queranordnung zwei Schweißnähte nebeneinander generiert (siehe Bild 4.6).

Alle oben beschriebenen Untersuchungen führen zu der Erkenntnis, dass eine Aufweitung der Dampfkapillare beim Schweißen von Aluminiumwerkstoffen zu einer Reduktion der Prozesseffizienz führt. Die Einschweißtiefe nimmt demnach mit größer werdender Kapillaröffnung – bei konstant bleibender Laserleistung – ab.

Schweißnahtqualität

Dass durch die Doppelfokustechnik die Kapillargeometrie beeinflusst werden kann, wurde in dem vorigen Abschnitt gezeigt. Der Einfluss des Fokusabstandes auf die resultierende Schweißnahtqualität soll im Folgenden untersucht werden.

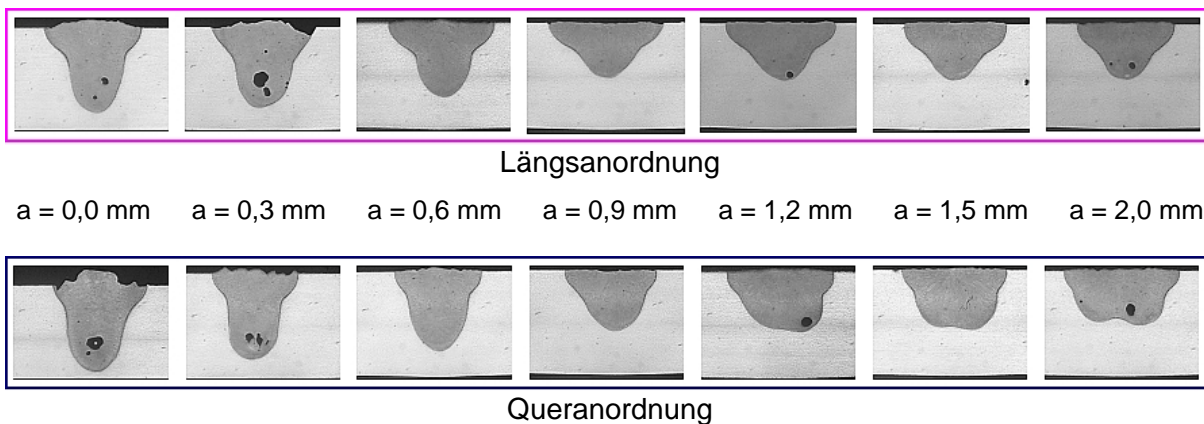


Bild 4.7: Nahtquerschnitt als Funktion des Fokusabstandes (AA 6082, $P_L = 2,0 + 2,0$ kW, $f = 100$ mm, $d_f = 0,3$ mm, $v = 2$ m/min).

Anhand der in Bild 4.7 gezeigten Querschliffe lassen sich bereits erste Rückschlüsse auf die Qualität des Schweißergebnisses ziehen. Bei kleinem Fokusabstand führt das hohe Aspektverhältnis der Dampfkapillare zu einem instabilen Verhalten, was Poren in der Naht zur Folge hat. Im Bereich zwischen $a = 0,6 \text{ mm}$ und $a = 0,9 \text{ mm}$, wo eine gemeinsame und weit geöffnete Kapillare existiert, sind keine Poren zu erkennen. Der Prozess ist hier stabil, es treten keine Schmelzbadauswürfe auf. Bei großem Fokusabstand bilden sich zwei getrennte Kapillaren aus, jede mit verhältnismäßig hohem Aspektverhältnis, da jeweils eine kleine Öffnung vorliegt. Dieser Sachverhalt führt analog zu dem Fall Fokusabstand $a = 0,0 \text{ mm}$ erneut zu Poren.

Die in Bild 4.8 gezeigten Längsschliffe und das entsprechende Diagramm unterstreichen die oben genannten Sachverhalte. Beim Einsatz der Doppelfokustechnik existiert ein sehr deutlicher Zusammenhang zwischen Fokusabstand, der daraus resultierenden Geometrie der Dampfkapillare und der Porenanzahl in der Schweißnaht.

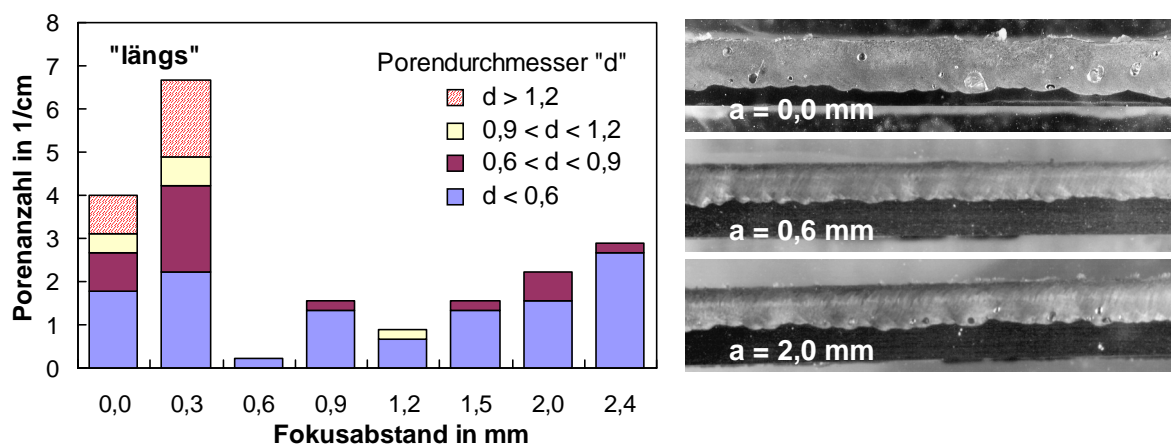


Bild 4.8: Verbesserung der Schweißnahtqualität mittels Doppelfokustechnik, gemessen anhand von 45 mm langen Längsschliffen (Bild re) ($P_L = 2,0 + 2,0 \text{ kW}$, $f = 100 \text{ mm}$, $d_f = 0,3 \text{ mm}$, $v = 2 \text{ m/min}$).

Die beste Schweißnahtqualität wurde bei einem Fokusabstand von $a = 0,6 \text{ mm}$ erreicht. Für diese Einstellung konnten Poren, deren Durchmesser größer als $0,6 \text{ mm}$ war, gänzlich vermieden werden. Kleinere Poren sind ebenfalls kaum vorhanden. Hier sei angemerkt, dass Poren kleiner als $0,3 \text{ mm}$ nicht berücksichtigt wurden. Diese Art der Poren sind in der Regel als Wasserstoffporen zu bezeichnen und nicht die Folge eines instabilen Kapillarverhaltens während des Schweißens. Außerdem ist in diesem Schaubild zu sehen, dass nach der Ausbildung der getrennten Dampfkapillaren die Porosität erneut ansteigt. In diesem Fall sind die Poren kleiner, was auf die kleinere Leistung pro Laserstrahl – und damit kleineren Kapillare – zurückzuführen ist.

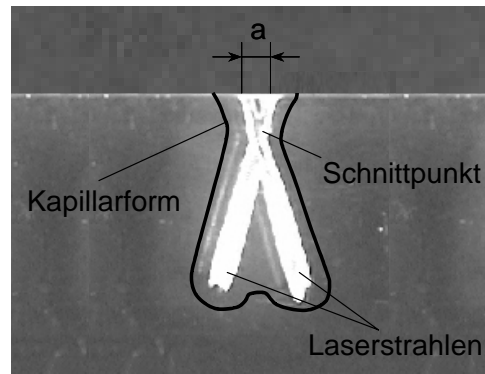


Bild 4.9: Kapillargeometrie bei winkelliger Anordnung der beiden Teillaserstrahlen bei $a = 0,3$ mm. Visualisierung der Einzellaserstrahlen mit Hilfe von Plexiglaseinbränden (CO₂-Laser) bei vergleichbaren geometrischen Verhältnissen wie „T 45“.

Die höhere Porosität bei $a = 0,3$ mm im Vergleich zu $a = 0,0$ mm ist nicht gänzlich verstanden, ein Hinweis könnte jedoch die Intensitätsverteilung im Inneren der Kapillare sein. Aufgrund der winkelig angeordneten Teilstrahlen bei der „T 45“ ist ihr Schnittpunkt – und damit der Punkt höchster Leistungsdichte – unterhalb der Werkstückoberfläche (siehe Bild 4.9). Dies führt, wie auch im nächsten Abschnitt gezeigt wird, zu einer instabilen Kapillargeometrie und damit zu einer Verschlechterung der Schweißnahtqualität.

4.1.2 Einfluss der Leistungsverteilung

Durch die Schweißversuche mit verschiedenen Fokusabständen konnte gezeigt werden, dass es Einstellungen gibt, wo Aluminiumwerkstoffe porenfrei geschweißt werden können. Diese Parameter führen jedoch dazu, dass die Leistungsfähigkeit des Schweißprozesses im Vergleich zu der Einzelfokustechnik hinsichtlich Wirkungsgrad und Einschweißtiefe abnimmt: schweißt man mit optimalem Fokusabstand, muss die Schweißgeschwindigkeit verglichen mit der Einzelfokustechnik (bei konstanter Laserleistung) reduziert werden, um eine bestimmte Einschweißtiefe t zu erreichen.

Die Änderung der Leistungsverteilung soll Aufschluss darüber geben, ob es möglich ist, Umstände zu finden, unter welchen gute Schweißnahtqualität bei gleichzeitig hoher Effizienz zu erzielen ist. Dieser Einfluss auf das Schweißergebnis wird in diesem Abschnitt am Beispiel einer 5000-er Aluminiumlegierung diskutiert. Im Vergleich zu AA 6082 hat sie einen höheren Magnesiumgehalt, der aufgrund seiner niedrigen Verdampfungstemperatur zu einem instabileren Verhalten der Kapillare während dem Schweißprozess führt. Folglich sind die Phänomene, welche die Schweißnahtqualität beeinflussen, bei dieser Legierung stärker ausgeprägt; der prinzipielle Sachverhalt gilt jedoch auch für die 6000-er Aluminiumlegierungen.

Ausgangspunkt ist die bisher verwendete symmetrische Leistungsverteilung. Bei „optimalem“ Fokusabstand $a = 0,6$ mm wurde die Energieverteilung gezielt verändert und das resultierende Ergebnis betreffend Qualität und Effizienz betrachtet. Bild 4.10 fasst die Ergebnisse dieser ersten Versuchsreihe zusammen. In dem Diagramm ist der Verlauf der Einschweißtiefe in Abhängigkeit der eingestellten Energieverteilung zu sehen. Die höchste Einschweißtiefe wurde bei stark asymmetrischer Verteilung (20%-80% beziehungsweise 80%-20%) erreicht. Unter diesen Umständen nähert sich die Form der Dampfkapillare jener, wie sie beim Einzelfokus vorliegt. Eine hohe Energieeinkopplung führt zu ähnlich hohen Einschweißtiefen wie beim Einstrahlschweißen. Gleichzeitig nimmt die Qualität der Schweißnähte, in Bild 4.10 am Beispiel der Nahtquerschliffe gezeigt, ab.

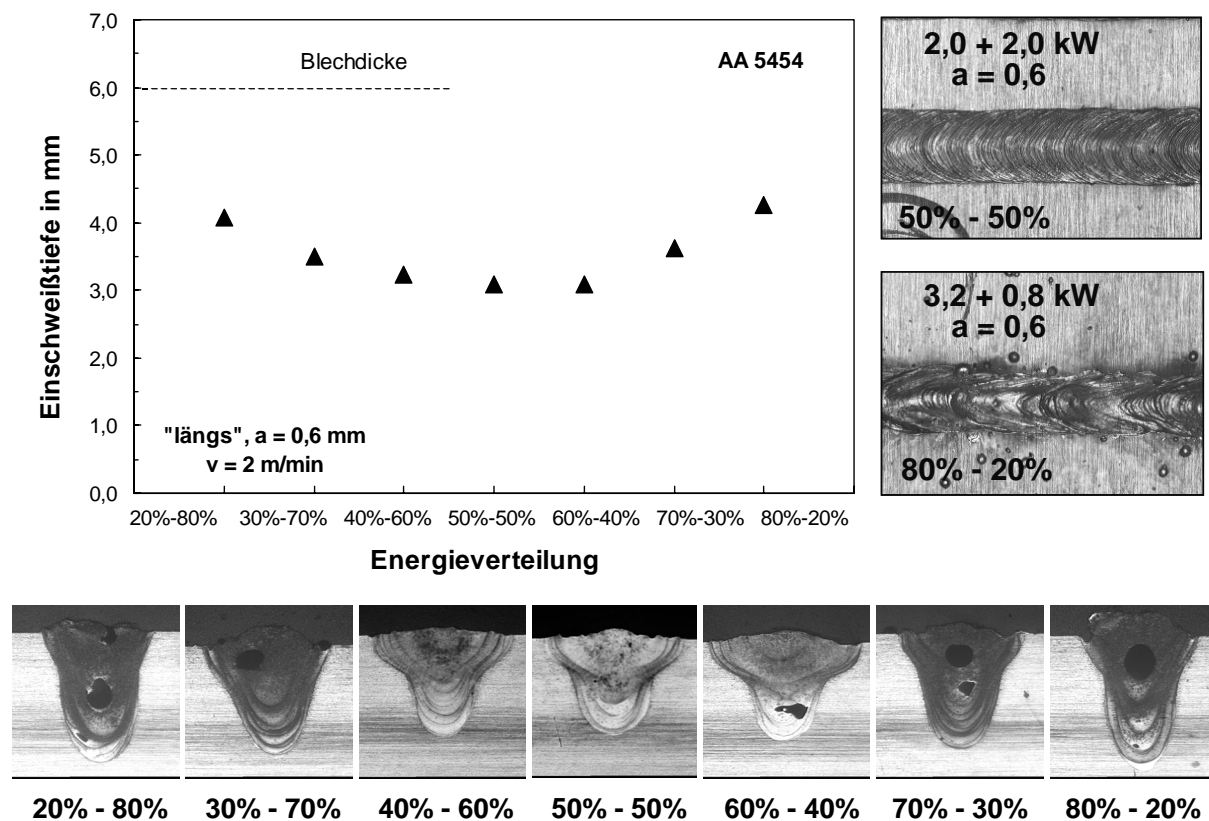
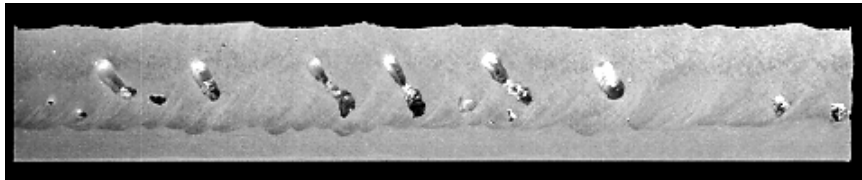


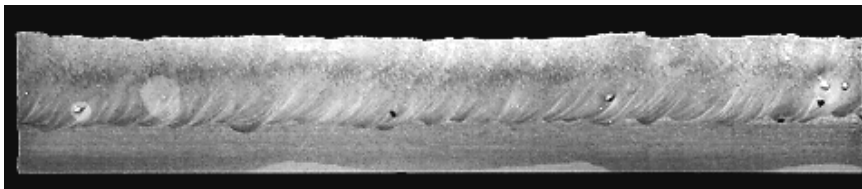
Bild 4.10: Einfluss der Energieverteilung auf das Schweißergebnis (AA 5454, $P_L = 4,0$ kW, $f = 150$ mm, $d_f = 0,45$ mm, $a = 0,6$ mm, $v = 2$ m/min).

Während die Querschliffe bei symmetrischer Energieverteilung 50%-50% ($P_L = 2,0 + 2,0$ kW) keine Poren aufweisen, sind bei einer Einstellung 20%-80% ($P_L = 3,2 + 0,8$ kW) große Prozessporen zu sehen. Die Fotos der Nahtoberräupen bei diesen Einstellungen unterstreichen die Aussage, dass beste Qualität bei symmetrischer Leistungsverteilung resultiert. Eine Verbesserung der Leistungsfähigkeit bei gleichzeitig bester Qualität ist demnach durch Änderung der Leistungsverteilung nicht möglich.

In einem weiteren Schritt wurde die *Fokuslage* der Laserstrahlen relativ zu der Werkstückoberfläche variiert und so die Leistungsdichte und deren Verteilung auf der Werkstückoberfläche verändert. In der Praxis ist es oftmals möglich – zumindest bei ausreichend zur Verfügung stehender Laserleistung – die Einschweißtiefe geringfügig zu erhöhen, indem die Fokuslage in das Bauteil ($f_{\text{pos}} < 0$ mm) positioniert wird (siehe auch [3] und [19]).



„längs“, $a = 0,6$ mm, $f_{\text{pos}} = -1,0$ mm



„längs“, $a = 0,6$ mm, $f_{\text{pos}} = 0$ mm

Bild 4.11: Vergleich der Längsschliffe bei den Fokusalagen $f_{\text{pos}} = -1$ mm und $f_{\text{pos}} = 0$ mm (AA 5454, $P_L = 2,0 + 2,0$ kW, $f = 150$ mm, $d_f = 0,45$ mm).

Alle hier erzielten Ergebnisse zeigen jedoch, dass die Steigerung der Einschweißtiefe durch negative Fokuslage nur sehr gering ausfällt, während die Qualität der Schweißnaht im Gegenzug sehr deutlich abnimmt. Bild 4.11 verdeutlicht diese Aussage anhand von zwei Längsschliffen. Bei dem Schliff links (Fokuslage $f_{\text{pos}} = -1$ mm) sind die sehr großen Prozessporen deutlich zu erkennen.

4.1.3 Änderung der Leistungsdichte

Der Vollständigkeit halber wurde angestrebt, die Qualität beim Schweißen mit der Einzelfokustechnik zu verbessern. Dazu wurden Versuche mit dem 4 kW- Laser durchgeführt. Die Änderung der Fokuslage ist ein sehr einfacher Weg, die Leistungsdichte auf der Werkstückoberfläche zu verändern. Dabei ändert sich der Fokusbereich gemäß der in Bild 4.12 dargestellten Strahlkaustik. Bei einer Brennweite von $f = 150$ mm wurden die Fokusalagen von $f_{\text{pos}} = 0$ mm bis $f_{\text{pos}} = +2$ mm untersucht. Die dabei resultierenden Fokusbereiche sind der Kaustik aus Bild 4.12 zu entnehmen. An dieser Stelle sei angemerkt, dass bis auf die bereits erwähnten Änderungen des Schweißergebnisses bei negativer Fokuslage (siehe Bild 4.11) eine weitere Untersuchung ($f_{\text{pos}} < -1$ mm) keine neuen Erkenntnisse brachte, weshalb der Einfluss der De-

fokussierung bei der Einzelfokustechnik nur am Beispiel der „positiven“ Fokuslage ($f_{\text{pos}} > 0 \text{ mm}$) erläutert wird.

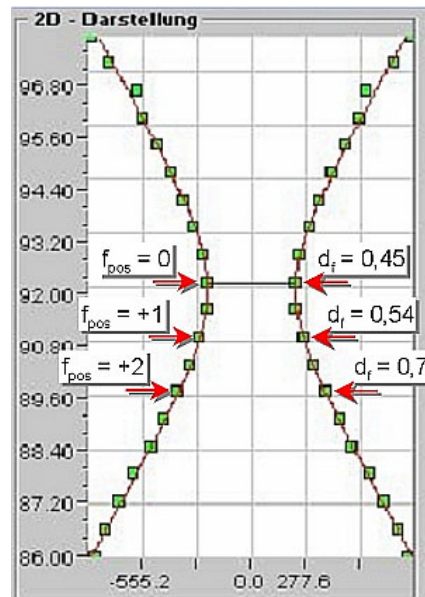


Bild 4.12: Gemessene Kaustik des Laserstrahls bei der Brennweite $f = 150 \text{ mm}$ und einem Faserkerndurchmesser von $d_k = 600 \mu\text{m}$ (Einstrahl).

Die Qualität der Schweißnähte ist bei Fokuslagen bis $f_{\text{pos}} = +1,5 \text{ mm}$ sehr schlecht. Es kommt sehr häufig zu Auswürfen, und teilweise wird das gesamte Schmelzbad explosionsartig hinausgeschleudert. Ruhige Schmelzbäder mit guter Qualität der Nahtoberfläche sind erst bei der Fokuslage $f_{\text{pos}} = +2 \text{ mm}$ und deutlich geringerem Vorschub $v = 1,5 \text{ m/min}$ realisierbar, siehe Bild 4.13.

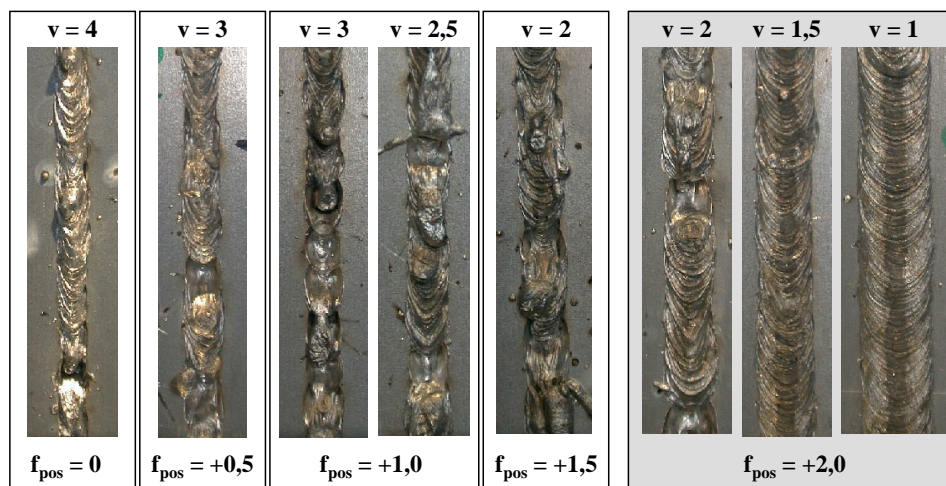


Bild 4.13: Qualität der Schweißergebnisse bei 4,0 kW Einzelfokus und 150 mm Brennweite bei unterschiedlicher Fokuslage und Vorschubgeschwindigkeit, aber ähnlicher Einschweißtiefe $t = 3 \text{ mm}$ (AA 6082, $P_L = 4,0 \text{ kW}$, EF, $f = 150 \text{ mm}$).

Es hat sich gezeigt, dass eine Veränderung der Leistungsdichte im Sinne einer Defokussierung beim Schweißen mit der Einzelfokustechnik keine Vorteile bringt. Zum

einen wird der Prozess sehr ineffektiv, zum anderen kann die Schweißnahtqualität nicht gesteigert werden. Gute Schweißnahtqualität ist erst dann zu erreichen, wenn der Prozess dem Wärmeleitungsschweißen sehr nahe kommt. Damit ist gleichzeitig ein hoher Wärmeeintrag, niedrige Schweißgeschwindigkeit und ein geringer Prozesswirkungsgrad verbunden. Die aufgrund der Defokussierung sinkende Leistungsdichte führt dazu, dass die Verdampfungsrate des Werkstoffes in der Dampfkapillare abnimmt. Obwohl die Kapillaröffnung durch die Defokussierung größer wird – ähnlich wie bei dem Einsatz der Doppelfokustechnik – führt der niedrige Ablationsdruck jedoch zu einem insgesamt instabileren Verhalten der Dampfkapillare. Die Stabilität der Dampfkapillare hängt demnach nicht alleine von deren Öffnungsdurchmesser ab, sondern auch von der Leistungsdichte – und damit der Verdampfungsrate des Werkstoffes im Inneren der Dampfkapillare. Ähnliches Verhalten wird auch in den Abschnitten 5.1.2 und 5.2.1 für das Verhalten der Dampfkapillare beim Schweißen mit der Fokusermatrixtechnik bei Verwendung der Scheibenlaser festgestellt (siehe Bild 5.18).

4.1.4 Verbesserungsmöglichkeiten durch Strahlpendeln

Beim Elektronenstrahlschweißen können Nahttiefen bis 100 mm, in Einzelfällen sogar bis 200 mm erreicht werden [75], [76]. Bei diesen sehr tiefen und auch sehr schlanken Schweißnähten bildet sich ähnlich wie beim Laserstrahlschweißen eine instabile Dampfkapillare aus, welche die Entstehung von Prozessporen begünstigt. Durch das Pendeln des Elektronenstrahls kann die Dampfkapillare verbreitert werden, was zu einer Steigerung der Prozessstabilität und damit zur Erhöhung der Schweißnahtqualität führt [77], [78].

Veröffentlichungen in [79] und [80] beispielsweise führen den Beweis, dass beim Laserstrahlschweißen eine „resonante Stimulation“ das System Schmelze, Dampfkapillare, Plasma im Sinne einer Stabilisierung beeinflussen kann. Eine *Modulation der Laserleistung* führt dabei zu einer stabilen Dampfkapillare und dementsprechend zu einer erhöhten Qualität des Schweißergebnisses. Ähnliche Resultate wurden in [81] berichtet, wo das Werkstück über einen Piezo- Aktor angeregt und gleichzeitig eine Modulation der Laserleistung verwendet wird. So konnten beim Schweißen von Aluminium sowohl Risse als auch Poren reduziert werden.

Das Ziel der gependelten Doppelfokusversuche ist in Anlehnung an die oben geschilderten Untersuchungen, die Nahtqualität durch das Strahlpendeln zu verbessern. Eingesetzt wurde hierbei die in Kapitel 3.2.3 dokumentierte Optik „T45“. Einer der bei-

den Teilstrahlen kann mit Hilfe eines Piezo- Aktors gependelt werden, wodurch die Geometrie der Dampfkapillare beeinflusst werden soll.

Die Schweißversuche wurden in der Längsanordnung durchgeführt, sodass der in Vor-schubrichtung hintere Laserstrahl „gependelt“ wurde (siehe Bild 4.14). Primäres Ziel war es, dort anzusetzen, wo die Effizienz des Schweißprozesses sehr hoch ist, die Qualität der Nähte jedoch nicht zufriedenstellend ist. Deshalb wurde das Strahlpendeln bei den Fokusabständen $a = 0 \text{ mm}$ und $a = 0,3 \text{ mm}$ analysiert. Die maximale Pendelfrequenz ist durch die Resonanzfrequenz des Piezo- Aktors auf 200 Hz begrenzt. Die maximale Pendelamplitude A_P beträgt dabei $\pm 0,12 \text{ mm}$.

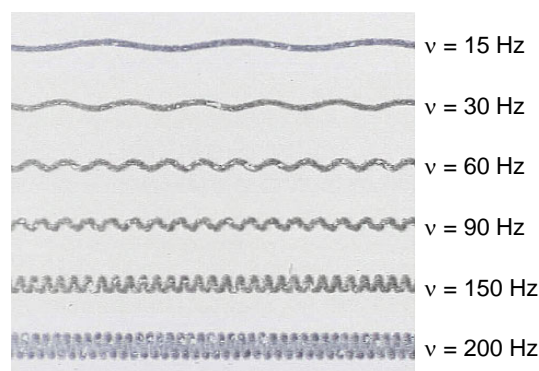


Bild 4.14: Pendelmuster bei unterschiedlichen Pendelfrequenzen. Einbrand in ein eloxiertes Aluminiumblech bei $P_L = 80 \text{ W}$ und $v = 4 \text{ m/min}$.

Das Schaubild in Bild 4.15 zeigt, dass entgegen den ersten Vermutungen die Einschweißtiefe durch das Strahlpendeln nicht beeinflusst wird. Die Schwankungen, ausgehend von der Frequenz $v = 0 \text{ Hz}$ sind nur gering. Die Effizienz des Schweißprozesses wird durch das Pendeln mit der hier eingestellten Amplitude nicht beeinträchtigt. Dies trifft auch für die Ergebnisse mit dem Fokusabstand $a = 0,3 \text{ mm}$ zu.

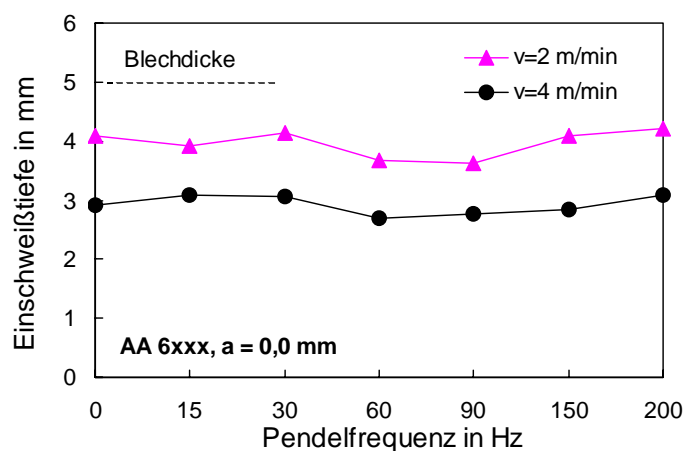


Bild 4.15: Einschweißtiefe bei den untersuchten Pendelfrequenzen (AA 6082, $P_L = 2,0 + 2,0 \text{ kW}$, $f = 100 \text{ mm}$, $d_f = 0,3 \text{ mm}$).

Die anhand von Längsschliffen ausgewerteten Proben weisen, wie im linken Diagramm aus Bild 4.16 ersichtlich, unabhängig von der eingestellten Pendelfrequenz eine hohe Porosität auf. Gezählt wurden dabei nur Poren mit einem Durchmesser von $d > 0,3 \text{ mm}$, da nur diese als Prozessporen gewertet werden. Die meisten Poren treten bei $\nu = 30 \text{ Hz}$ auf, die wenigsten bei $\nu = 150 \text{ Hz}$. Porenfreie Nähte konnten jedoch nicht erzielt werden.

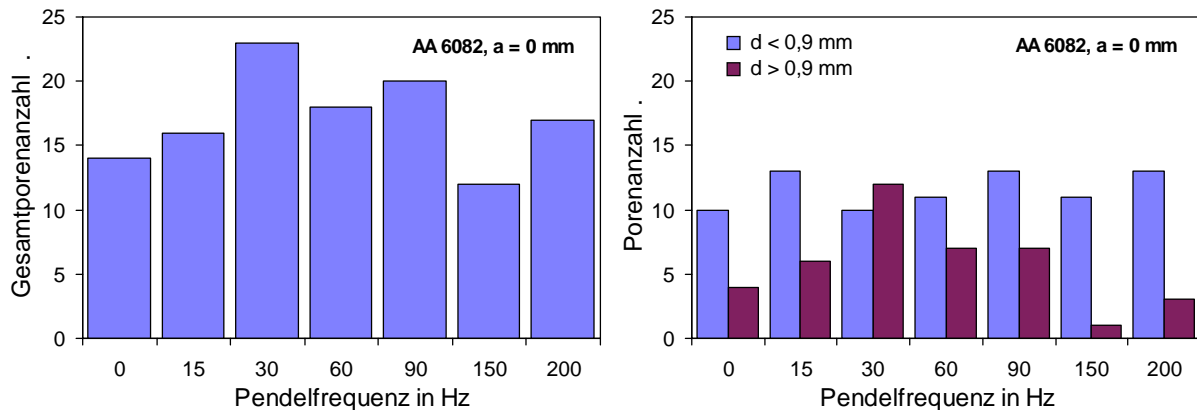


Bild 4.16: Anzahl der Prozessporen in Abhängigkeit der Pendelfrequenz (AA 6082, $P_L = 2,0 + 2,0 \text{ kW}$, $f = 100 \text{ mm}$, $d_f = 0,3 \text{ mm}$, $\nu = 2 \text{ m/min}$).

Dass die Pendelfrequenz einen, wenn auch nur geringen Einfluss auf das Schweißresultat hat, zeigt die Aufschlüsselung der Poren nach ihrer Größe (Bild 4.16, Diagramm re): die Zahl der großen Poren ($d > 0,9 \text{ mm}$) war bei $\nu = 150 \text{ Hz}$ am niedrigsten. Allerdings sei darauf hingewiesen, dass diese Aussage auf einer relativ geringen zur Verfügung stehenden Datenmenge beruht.

Aufgrund der niedrigen Pendelamplitude $A_P = \pm 0,12 \text{ mm}$, hat das Pendeln des in Vor-schubrichtung hinteren Laserstrahls keine signifikante Aufweitung der Dampfkapillare hervorrufen können. Allerdings haben die Ergebnisse auch gezeigt, dass bei Frequenzen bis zu 200 Hz die geometrische Stimulation der Dampfkapillare nicht den erwünschten Effekt einer Stabilisierung mit sich bringt. Ein gewisser Einfluss der Pendelfrequenz auf das Schweißergebnis ist zwar zu erkennen, die Qualität wird jedoch nicht deutlich verbessert. Eine Untersuchung des Strahlpendelns bei größeren Amplituden sowie höheren Pendelfrequenzen wäre auf der Basis dieser ersten Ergebnisse sehr sinnvoll, konnte jedoch im Rahmen dieser Arbeit aufgrund technischer Gegebenheiten nicht durchgeführt werden.

4.2 Fokusmatrix

Die Fokusmatrix ist als eine Weiterentwicklung der Doppelfokustechnik zu verstehen. Das Ziel dabei ist, die Vorteile der Doppelfokustechnik hinsichtlich Schweißnahtqualität zu nutzen, gleichzeitig jedoch höchste Effizienz zu gewährleisten. In diesem Kapitel werden Untersuchungen beschrieben, bei denen mehr als zwei Foki am Werkstück zum Einsatz kommen. In einem ersten Schritt wird die Fokusmatrix mit Hilfe der in Bild 3.4 gezeigten Dreifachfaser realisiert. Durch die Addition eines HL4006D- Lasers mit $P_L = 4 \text{ kW}$ und zweier HL3006D- Laser mit $P_L = 3 \text{ kW}$ betrug die Strahlleistung am Werkstück maximal $P_L = 10 \text{ kW}$.

Bei diesen Grundlagenuntersuchungen wurde der Einfluss der für diese Verfahren spezifischen Parameter wie Laserleistung, Anordnung und Vorschubgeschwindigkeit auf Qualität und geometrische Form der Schweißnaht sowie die Geschwindigkeit und die Effizienz des Verfahrens untersucht. Verwendet wurden der Werkstoff AlMg4,5Mn (AA 5083) der Materialdicken $d = 4 \text{ mm}$ bzw. $d = 5 \text{ mm}$. Um Prozessgrenzen auszuloten, wurde auch die Materialdicke $s = 20 \text{ mm}$ untersucht.

Ein erster Blick auf die Einschweißkurven zeigt jedoch, dass die Fokusmatrixtechnik bei Verwendung von lampengepumpten Festkörperlasern nicht die erhoffte Effizienzsteigerung bringt. Verglichen bei etwa gleichem Leistungsniveau sind diese Verhältnisse in Bild 4.17 am Beispiel der Einschweißtiefe dargestellt. Die Einzelfokusversuche mit $P_L = 4 \text{ kW}$ werden dabei mit der Doppelfokustechnik bei $2,0 + 2,0 \text{ kW}$ und einem Fokusabstand $a = 0,6 \text{ mm}$ sowie mit der Fokusmatrix bei $3 \times 1,6 \text{ kW}$ und etwas kleinerem Fokusabstand $a = 0,36 \text{ mm}$ verglichen.

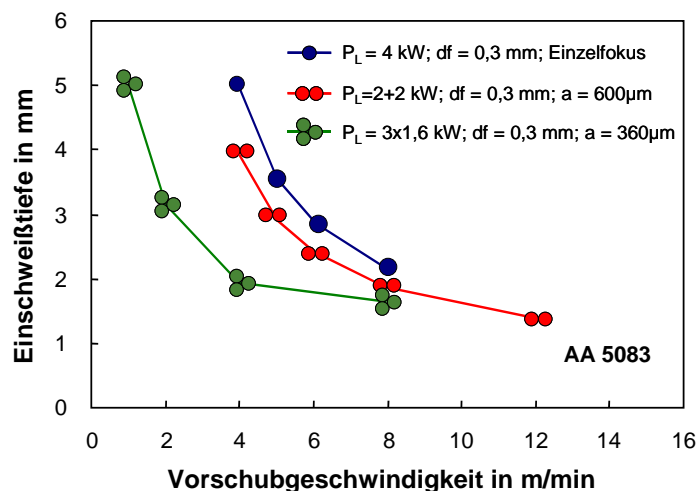


Bild 4.17: Vergleich der Fokusmatrix bei $3 \times 1,6 \text{ kW}$ mit der Doppelfokustechnik bei $2,0 + 2,0 \text{ kW}$ und der Einzelfokustechnik bei $4,0 \text{ kW}$ (AA 5083, $s = 5 \text{ mm}$).

Obwohl die Gesamtleistung bei der Addition der drei Laserstrahlen mit 4,8 kW höher liegt als bei den anderen Verfahren sind die Ergebnisse hinsichtlich Einschweißtiefe deutlich schlechter. Die sehr weit geöffnete Dampfkapillare führt zwar zu qualitativ sehr guten Schweißnähten, gleichzeitig jedoch auch zu einem entsprechend niedrigen Einkoppelgrad, was die Effizienz des gesamten Prozesses merklich herabsetzt. Auch ist bei dieser Form der Dampfkapillare der thermische Wirkungsgrad niedriger als bei der Einzelfokustechnik, da die am Wärmeaustausch beteiligten Flächen größer sind. Allerdings ist der Unterschied zwischen den jeweiligen thermischen Wirkungsgraden ab einer Vorschubgeschwindigkeit von etwa 4 m/min sehr gering und spielt kaum noch eine Rolle [82], [83].

Unabhängig von den zuvor beschriebenen Untersuchungen hinsichtlich Schweißnahtqualität und Prozesseffizienz soll im folgenden Abschnitt ein fertigungstechnisch bedeutsames Potential der Fokusmatrixtechnik verdeutlicht werden. Die Möglichkeit der *Strahladdition* mit Hilfe von Mehrfachfasern erlaubt mit mehreren Nd:YAG-Lasern in Leistungsbereiche deutlich oberhalb $P_L = 4$ kW (dem heutigen kommerziell am Gerät zugänglichen Bereich) und damit in den Bereich des CO₂-Lasers vorzudringen.

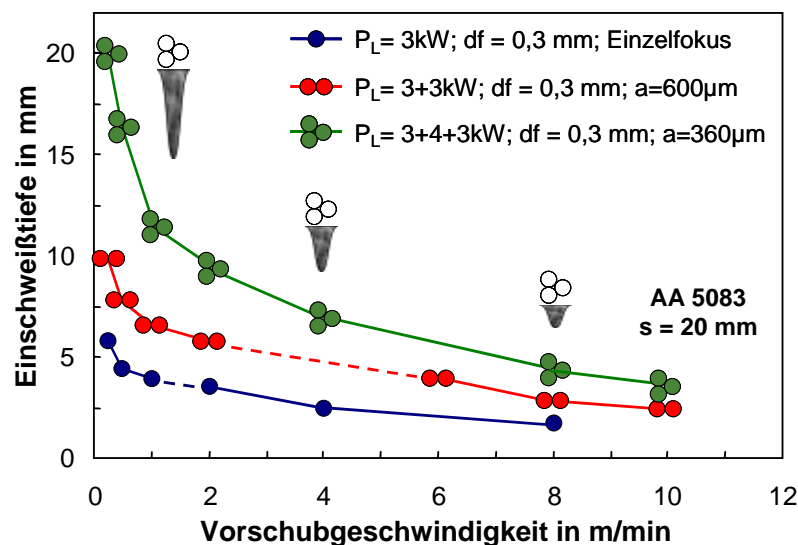


Bild 4.18: Steigerung der Einschweißtiefe im Bereich niedriger Vorschubgeschwindigkeiten durch den Einsatz der Fokusmatrix bei maximaler Laserleistung von 10 kW.

Zwei Beispiele mögen dies verdeutlichen. So sind bei $v = 0,25$ m/min sind Tiefen von bis zu 20 mm möglich (Bild 4.18). Das bei dieser Geschwindigkeit sehr hohe Schachtverhältnis der Kapillare führt zu einer fast vollständigen Einkopplung der eingesetzten Laserleistung. Bei Stahlwerkstoffen konnten im Rahmen dieser Versuchsreihe sogar Einschweißtiefen von 26 mm erreicht werden [84]. Interessant ist der Aspekt, dass bei einer geforderten Einschweißtiefe die Schweißgeschwindigkeit sehr deutlich gesteigert werden kann. Ist beispielsweise die Tiefe von 5 mm mit der Einstrahltechnik

und 4,0 kW nur unter extrem langsamen, d.h. unwirtschaftlichen Vorschüben möglich ($v = 0,5$ m/min), so kann diese Aufgabe mit der Dreifachfaser und 10 kW Laserleistung mit bis zu 8 m/min umgesetzt werden, was einer Steigerung um den Faktor 16 entspricht (siehe auch [85]).

Bei höheren Schweißgeschwindigkeiten lässt sich auch in diesem Fall die Effizienz aufgrund des kleinen Aspektverhältnisses (siehe Skizzen im Diagramm Bild 4.18) nicht erhöhen. Die durch die drei Laserstrahlen erzeugte Kapillaröffnung beträgt bei der Fokussierung mit einer 100 mm Brennweite etwa 1,1 mm. Bei einer Einschweißtiefe von 4 mm ($v = 8$ m/min) resultiert ein Aspektverhältnis von $S \approx 3,6$. Bei der Einzelfokustechnik ist bei gleicher Geschwindigkeit $S \approx 8$, was entsprechend dem Bild 2.6 einen etwa 20% höheren Einkoppelgrad zur Folge hat. Betrachtet man diese nur sehr grobe Schätzung für $v = 8$ m/min, so sind allein aufgrund der schlechten Einkoppelverhältnisse bei der Fokusmatrixtechnik 1,6 kW Verlustleistung in Kauf zu nehmen.

4.3 Synopsis

Die in diesem Kapitel beschriebenen Untersuchungsergebnisse haben die Konsequenzen der Doppelfokustechnik beim Schweißen von Aluminiumwerkstoffen deutlich gemacht. Die Anwendung zweier eng nebeneinander liegenden Foki auf dem Werkstück bietet die Möglichkeit, die Form der Dampfkapillare zu beeinflussen. Die Versuche mit variablem Doppelfokus haben die Zusammenhänge zwischen dem eingestellten Fokusabstand und dem daraus resultierenden Schweißergebnis sowie der dabei erreichten Leistungsfähigkeit und Effizienz des Prozesses gezeigt.

- ⇒ Durch die Aufweitung der Kapillaröffnung ist es möglich, die Qualität der Schweißnähte deutlich zu verbessern. Bei bestimmten Fokusabständen können Prozessporen und Auswürfe fast vollständig vermieden werden. Diese Qualitätssteigerung ist eine Folge der stabilisierten Dampfkapillare.
- ⇒ Bei kleinem Fokusabstand sind die Verhältnisse dem Einzelfokusschweißen sehr ähnlich. Die tiefe und sehr schlanke Dampfkapillare führt zu einem instabilen Prozess. Poren und Schmelzbadauswürfe sind häufig vorhanden.
- ⇒ Bei Fokusabständen von $a = 0,6$ mm bis $a = 0,9$ mm konnte die beste Qualität erzielt werden. Dabei existiert noch eine gemeinsame, weit geöffnete Kapillare, die einen sehr stabilen Prozess zur Folge hat.

- ⇒ Ab etwa $a = 1,0$ mm, abhängig von dem verwendeten Fokusbereich, der Laserleistung und der Schweißgeschwindigkeit, bilden sich zwei getrennte Kapillaren aus. Dabei kommt es erneut zur Bildung von, wenn auch kleineren, Prozessporen.

Die gezielte Gestaltung der Dampfkapillare mittels Doppelfokustechnik hat jedoch auch unmittelbare Auswirkungen auf die Effizienz des Schweißverfahrens.

- ⇒ Durch die Aufweitung der Kapillaröffnung wird das Aspektverhältnis der Kapillare kleiner, was zu einer Reduzierung des Einkoppelgrades führt. Bei sonst gleichen Leistungsdaten nimmt die Einschweißtiefe mit größer werdendem Fokusabstand – und damit die Effizienz – ab.
- ⇒ Eine Erhöhung der Schweißnahtqualität ist demnach mit einer Abnahme der Prozesseffizienz verbunden.

Die Versuche durch, eine geeignete *Leistungsverteilung* gute Schweißnahtqualität bei gleichzeitig hohem Wirkungsgrad zu erzielen, waren nicht zielführend.

- ⇒ Durch die Änderung der Energieverteilung konnte die Einschweißtiefe bei optimalem Fokusabstand verbessert werden. Stark asymmetrische Leistungsverteilung führt zu Tiefen, die der Einzelfokustechnik nahe kommen.
- ⇒ Die Porosität steigt mit der sich ändernden Leistungsverteilung sehr schnell an, der Schweißprozess wird instabil.
- ⇒ Als optimal im Hinblick auf eine gute Schweißnahtqualität hat sich die symmetrische Leistungsverteilung erwiesen.
- ⇒ Die hier erzielten Ergebnisse zeigen, dass durch negative Fokuslage die Steigerung der Einschweißtiefe nur sehr gering ausfällt, während die Qualität der Schweißnaht im Gegenzug sehr deutlich abnimmt.
- ⇒ Eine Defokussierung beim Schweißen mit der Einzelfokustechnik bringt keine Vorteile: der Prozess bleibt instabil und wird mit steigender Defokussierung ineffizienter. Erst bei Fokuslage $f_{\text{pos}} = +2$ mm (Fokusbereich $d_f = 0,7$ mm) sind gute Ergebnisse erzielt worden. Allerdings ist dabei der Vorschub sehr niedrig.

Weiterhin wurde analog dem Elektronenstrahlschweißen versucht, die Schweißnahtqualität durch *Strahlpendeln* zu verbessern. Ziel war es, dort anzusetzen, wo die Effi-

zienz des Schweißprozesses sehr hoch, die Qualität der Nähte jedoch nicht zufriedenstellend ist.

- ⇒ Das Strahlpendeln wurde bei den Fokusabständen $a = 0$ mm und $a = 0,3$ mm untersucht. Die Schweißergebnisse weisen unabhängig von der eingestellten Pendelfrequenz eine hohe Porosität auf.
- ⇒ Die untersuchten Pendelfrequenzen haben nur einen geringen Einfluss auf das Schweißresultat. Tendenziell ist bei $\nu = 30$ Hz die höchste Porengröße und -zahl, bei $\nu = 150$ Hz die geringste Porosität festzustellen, wobei zudem die Zahl der großen Poren ($d > 1,2$ mm) da am niedrigsten ist.
- ⇒ Es ist nicht ausgeschlossen, dass eine größere Pendelamplitude bzw. eine höhere Pendelfrequenz einen stärkeren Einfluss auf die Schweißnahtqualität haben kann.

Mit dem Ziel, die Vorteile der Doppelfokustechnik hinsichtlich Schweißnahtqualität zu nutzen, jedoch gleichzeitig höchste Effizienz zu gewährleisten, wurde die *Fokusermatrixtechnik mit lampengepumpten Nd:YAG-Lasern* untersucht.

- ⇒ Aufgrund der großen Kapillaröffnung sind die Schweißergebnisse von hoher Qualität. Bei ähnlichem Leistungsniveau wie bei Einzel- bzw. Doppelfokustechnik weist die FM-Technik mit lampengepumpten Nd:YAG-Lasern jedoch die geringste Effizienz auf.

Die Möglichkeit der *Strahladdition* mit Hilfe von Mehrfachfasern erlaubt mit mehreren Nd:YAG-Lasern in Leistungsbereiche deutlich oberhalb $P_L = 4$ kW (dem heutigen kommerziell am Gerät zugänglichen Bereich) und damit in den Bereich des CO₂-Lasers vorzudringen.

- ⇒ Bei der durch Leistungsaddition erzielter Laserleistung von $P_L = 10$ kW lassen sich bei Aluminium Einschweißiefen von bis zu 20 mm erreichen. Hier eröffnen sich neue Einsatzgebiete für das Laserstrahlschweißen.

5 Schweißen mit dem diodengepumpten Yb:YAG- Scheibenlaser

Durch Verwendung von Dioden für die Anregung von Festkörperlaser wird neben höheren Wirkungsgraden und längeren Wartungsintervallen auch eine höhere Fokussierbarkeit erreicht. Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit standen vier diodengepumpte Scheibenlaser mit je 1,5 kW Ausgangsleistung zur Verfügung, die im Vergleich zu lampengepumpten Festkörperlaser eine vierfach höhere Fokussierbarkeit bieten. Bessere Fokussierbarkeit bringt beim Schweißen gewichtige systemtechnische Vorteile wie schlanke Optiken mit geringer Masse und Volumen sowie größere Arbeitsabstände. Einerseits lassen sich dadurch Dynamik, Leistungsfähigkeit, Flexibilität und Integrationsfähigkeit in übliche Handhabungseinrichtungen erhöhen, andererseits werden ganz neue Anwendungen ermöglicht wie z.B. das Scannerschweißen.

5.1 Besonderheiten beim Schweißen mit dem Yb:YAG- Scheibenlaser

5.1.1 System- und verfahrenstechnische Vorteile des Scheibenlasers

Im Allgemeinen wird unter Strahlqualität die mit der Strahlqualitätszahl K oder der Beugungsmaßzahl M^2 charakterisierte „Nähe“ zum best- fokussierbaren Strahl, dem Gauß'schen Grundmode verstanden. Sie ist demnach eine relative, von der Wellenlänge unabhängige Qualitätsangabe. Für die Anwendung ist jedoch hauptsächlich die Fokussierbarkeit – eine absolute Eigenschaft – interessant [86], [87]. Sie beschreibt, wie stark sich ein Laserstrahl mit einer gegebenen Optik fokussieren lässt und wird über das inverse Strahlparameterprodukt SPP festgelegt:

$$\text{Fokussierbarkeit} = \frac{1}{SPP} = \frac{4}{w_0 \cdot \theta_0} = M^2 \frac{\lambda}{\pi}. \quad (5.1)$$

Die unmittelbaren Auswirkungen dieser Größe auf die Geometrie des fokussierten Strahls werden aus nachstehenden Beziehungen für den Brennfleckdurchmesser d_f und

die Rayleighlänge z_{rf} (von der Strahltaile bei d_f aus gemessene Distanz in Ausbreitungsrichtung des Strahls, innerhalb derer sein Querschnitt auf den doppelten Wert ansteigt bzw. die Intensität auf die Hälfte des Wertes im Fokus absinkt) ersichtlich:

$$d_f = (w_0 \theta_0) \cdot \frac{f}{D} = (w_0 \theta_0) \cdot F = (4\lambda / \pi) \cdot M^2 \cdot F \quad (5.2)$$

$$z_{rf} = d_f \cdot F = (w_0 \theta_0) \cdot F^2. \quad (5.3)$$

Bei festgelegter Fokussierzahl F (Brennweite der Fokussierlinse dividiert durch Strahldurchmesser auf derselben) ist ein um so kleinerer Brennfleckdurchmesser zu erzielen, je geringer das Strahlparameterprodukt ist (Bild 5.1, links).

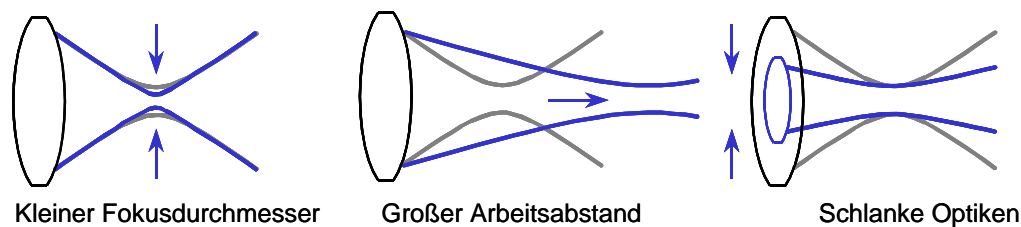


Bild 5.1: Systemtechnische Vorteile hoher Strahlqualität.

Ist andererseits ein bestimmter Brennfleckdurchmesser notwendig, so kann die bessere Fokussierbarkeit des Scheibenlasers in eine Vergrößerung des Arbeitsabstandes bei gleichzeitig geringerer Strahldivergenz umgesetzt werden (siehe mittlere Skizze Bild 5.1). Dieses hat unmittelbare Vorteile was den Schutz der optischen Komponenten und die Zugänglichkeit an engen Fugestellen betrifft.

Des Weiteren lässt sich eine hohe Fokussierbarkeit in eine Verschlankeung der optischen Komponenten umsetzen (siehe auch Bild 3.5). Im Vergleich zu einer Standardoptik, wie sie heute für lampengepumpte Festkörperlaser verwendet wird, beansprucht eine Kompaktoptik für einen Strahl mit doppelter Fokussierbarkeit lediglich 50 % Durchmesser und 25 % Gewicht (bei gleichem Arbeitsabstand und Fokusbereich).

Die Schwelle zum Tiefschweißen

Da jeder mit Laserstrahlung erfolgende Fertigungsprozess einer bestimmten Mindestleistung bedarf (siehe Kapitel 2.1.2), die für das Erreichen der charakteristischen Prozesstemperatur erforderlich ist, bringt eine gute Fokussierbarkeit vor allem Vorteile mit sich, welche dem Schweißprozess zugute kommen. Dies zeigt eine Untersuchung, bei der verschiedene lampengepumpte Stablaser mit unterschiedlichem Strahlparame-

terprodukt – also unterschiedlichem Fokusbereich – mit dem Scheibenlaser verglichen wurden.

Laserstrahlquelle	Leistung	Strahlqualität	Faserkern- durchmesser	Fokusbereich
HL4006 D	4000 W	25 mm*mrad	0,6 mm	0,3 / 0,45 / 0,6 mm
HL3006 Di	2000 W	16 mm*mrad	0,4 mm	0,2 mm
HLD1002 D	1000 W	6 mm*mrad	0,2 mm	0,1 mm

Tabelle 5.1: Untersuchte Festkörperlaser mit den verwendeten Fasern und den mit zum Teil unterschiedlichen Fokussierungen generierten Fokusbereichen.

Die im Querschliff gemessene Einschweißtiefe ist in Bild 5.2 über der Leistung P und über der auf den Fokusbereich bezogenen Leistung P/d_f aufgetragen. Der Fokusbereich wird sowohl durch Änderung der Fokussierbrennweite als auch durch Verwendung von Lasern unterschiedlicher Fokussierbarkeit (Tabelle 5.1) variiert. Die Schwelle zum Tiefschweißen liegt bei AlMgSi1 unabhängig vom eingesetzten Fokusbereich in einem eng begrenzten Bereich bei etwa $P/d_f = 4 \text{ kW/mm}$ [86].

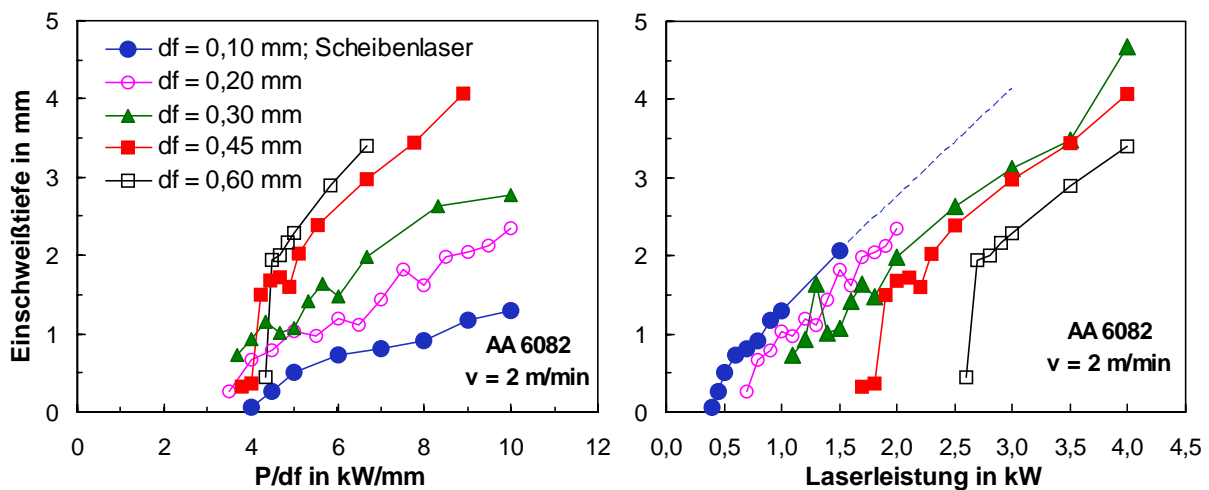


Bild 5.2: Einschweißtiefe in Abhängigkeit vom Strahlparameterquotient P/d_f sowie der Leistung P . Verwendet wurden die in Tabelle 5.1 aufgeführten Strahlquellen. Die Vorschubgeschwindigkeit wurde konstant bei $v = 2 \text{ m/min}$ gehalten.

Die Laserleistung, bei der der Tiefschweißeffekt einsetzt, ist bei geringem Fokusbereich deutlich niedriger. Das bedeutet, dass bei einem Laser mit stärkerer Fokussierbarkeit eine geringere Leistung erforderlich ist, um die Schwelle zu erreichen (bei gleicher F-Zahl). So kann beispielsweise mit dem Scheibenlaser bereits mit 450 W Aluminium tiefgeschweißt werden. Dieses hat zur Folge, dass der Fügeprozess mit deutlich niedrigerem Energieeintrag durchgeführt werden kann. Weniger Verzug und weniger Nacharbeit sind demnach mit diesen Laserstrahlquellen hoher Strahlqualität realisierbar.

Es ist weiterhin bemerkenswert, dass der an der Schwelle zu beobachtende Sprung in der Einschweißtiefe umso stärker ausfällt, je größer der Fokusedurchmesser ist. Das bedeutet, dass für prozesssicheres Dampfkapillaren- „Tief-“ Schweißen von Aluminium im Bereich um und unter 1 mm hohe Anforderungen an die Strahlqualität der Festkörperlaser zu stellen sind [86].

Oberhalb der Schwelle liegen die einzelnen Kurven nahe zusammen und weisen eine ähnliche Steigung auf, wenn die gemessenen Tiefen über der Leistung P aufgetragen werden (rechtes Diagramm in Bild 5.2). Daraus ist zu schließen, dass – zumindest bei dieser Geschwindigkeit – die Einschweißtiefe im Wesentlichen mit der Leistung skaliert. Eine stärkere Fokussierung hat zwar positiven Einfluss, jedoch weit weniger stark als die Leistung.

Anders verhält sich der Einfluss der Fokussierbarkeit beim Schweißen von Stahlwerkstoffen. Bei höheren Geschwindigkeiten skaliert die Tiefe mit dem Strahlparameterquotienten P/d_f . Hier lässt sich also eine Steigerung der Fokussierbarkeit direkt in eine proportionale Zunahme der Einschweißtiefe umsetzen [88]. Ähnliches wird bei Aluminium wegen der hohen Temperaturleitfähigkeit nur bei sehr hohen Schweißgeschwindigkeiten Schweißgeschwindigkeit erwartet. Die Vorteile hoher Fokussierbarkeit beim Laserstrahlschweißen von Stahlwerkstoffen werden in [64], [89] und [90] ausführlich untersucht.

5.1.2 Einfluss der Fokussierbarkeit auf die Schweißnahtqualität

Wie bereits in den Abschnitten zuvor angeführt, sind Schweißnahtfehler wie Prozessporen und Auswürfe auf eine instabile Dampfkapillare zurückzuführen. Durch eine geeignete Prozessführung ist es möglich, die Kapillare zu stabilisieren und Nahtfehler zu reduzieren. Die dabei zum Tragen kommenden Mechanismen wurden im Abschnitt 2.3 erwähnt und können mit der folgenden Abschätzung untermauert werden.

Stabilität der Dampfkapillare

Eine Kapillare ist stabil, wenn in ihrem Inneren ein Kräftegleichgewicht herrscht. Der Dampfdruck muss demnach alle Kräfte, die ein Schließen der Dampfkapillare bewirken könnten, ausgleichen. Befindet sich die Kapillarwand im Kräftegleichgewicht, so muss folgende Gleichung erfüllt sein:

$$p_{abl} = p_{\sigma} + p_g + p_{dy} . \quad (5.4)$$

Der Ablationsdruck p_{abl} muss dem Druck p_{σ} , der aus der Oberflächenspannungskraft resultiert, dem hydrostatischen Druck p_g sowie dem hydrodynamischen Druck p_{dy} entgegenwirken.

Der hydrostatische Druck ist sowohl von der Dichte der Schmelze als auch von der Kapillartiefe abhängig:

$$p_g = \rho \cdot g \cdot t_{kap} . \quad (5.5)$$

Bei Einschweißtiefen von nur wenigen Millimetern ist dieser bis zu zwei Größenordnungen kleiner als der Ablationsdruck und kann deshalb in dieser Betrachtung vernachlässigt werden [3], [91], [92].

Nach [3] herrschen aufgrund der Schmelzbadströmung entlang dem Umfang der Dampfkapillare unterschiedliche Umströmungsgeschwindigkeiten, die zu einem Druckgradienten führen, der die Tendenz hat, die Dampfkapillare zu schließen. Die resultierende Druckdifferenz, der hydrodynamischen Druck, hängt von der Schweißgeschwindigkeit entsprechend

$$\Delta p \sim \rho \cdot v^{3,5} \quad (5.6)$$

ab. Bei geringen Vorschubgeschwindigkeiten kann dieser Beitrag unberücksichtigt bleiben.

Der „Schließdruck“ p_{σ} ist eine Funktion von Oberflächenspannungskoeffizient σ und Kapillarradius r_{kap} :

$$p_{\sigma} = \frac{\sigma}{r_{kap}} . \quad (5.7)$$

Für eine grobe Abschätzung des Stabilitätsverhaltens der Dampfkapillare kann deshalb der Ablationsdruck mit dem durch die Oberflächenspannungskräfte hervorgerufenen Druck bilanziert werden

$$p_{abl} \approx p_{\sigma} . \quad (5.8)$$

Demzufolge ist eine Dampfkapillare dann stabil, wenn die Verdampfungsrate hoch genug ist um den Oberflächenspannungskräften entgegenzuwirken. Um eine Erhöhung der Prozessstabilität herbeizuführen kann man also

- ⇒ den Radius der Kapillare aufweiten, was zu einer Reduktion der Oberflächenspannungskräften führt, oder
- ⇒ bei gegebenem Kapillardurchmesser die Verdampfungsrate so weit erhöhen, dass der dabei entstehende Verdampfungsdruck die Schließungskräfte ausgleichen kann.

Simulationsrechnungen zeigen außerdem, dass bei Stabilitätsbetrachtungen zwischen zwei *Kapillargeometrien* unterschieden werden muss: einer trichterförmigen, weit geöffneten Dampfkapillare, wo der Metaldampf ungehindert austreten kann, sowie einer schlanken Kapillarform, bei der es zu einer Abschnürung kommt [3], [13]. Die Rechnungen und daran anknüpfende Plausibilitätsbetrachtungen zeigen, dass bei einer Kapillare mit lokaler Einschnürung inhärenterweise eine Tendenz zum Kollabieren gegeben ist.

Experimentelle Ergebnisse

In der Literatur werden zahlreiche Untersuchungen beschrieben, wo der Einfluss der Fokussierbarkeit auf die Prozessstabilität analysiert wird. Als Maß für die Stabilität des Schweißprozesses wird dabei die Anzahl der Poren herangezogen. So zeigt eine erste Arbeit zu diesem Thema [13] beispielsweise den Einfluss der Strahlqualität auf die Porenanzahl beim Schweißen von Aluminiumlegierungen mit dem CO₂- Laser.

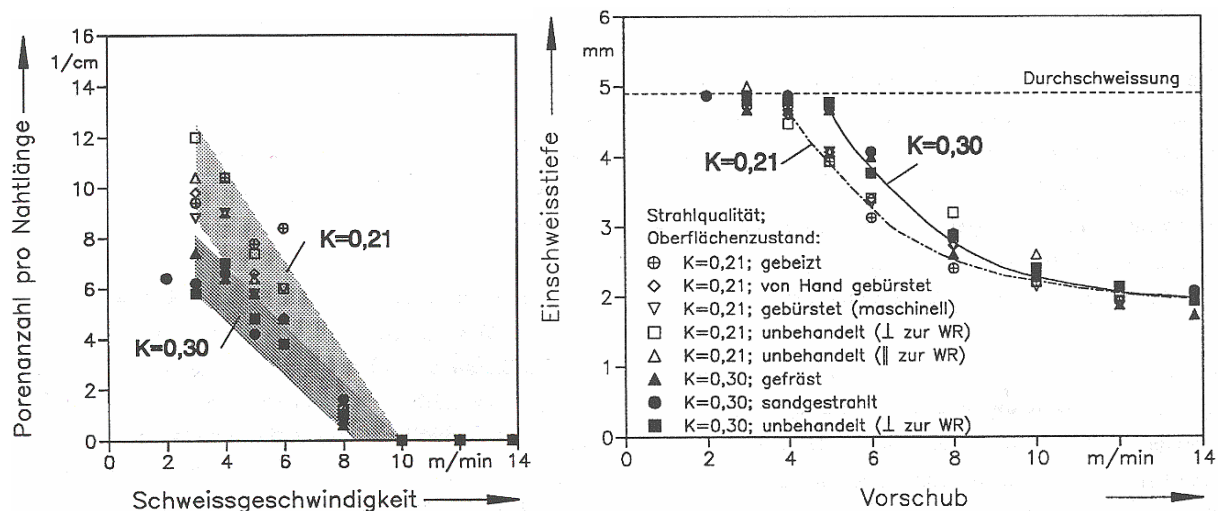


Bild 5.3: Anzahl der Poren pro Nahtlänge (li) und die entsprechende Einschweißtiefe (re) als Funktion der Vorschubgeschwindigkeit und der Strahlqualität K beim Schweißen von AA 6xxx mit dem CO₂- Laser [13].

Ein direkter Vergleich zwischen Laserstrahlquellen mit unterschiedlicher Strahlqualität zeigt, dass mit besserer Fokussierbarkeit (siehe Bild 5.3 links) eine Reduzierung der Porenzahl – bei gleichzeitig höherer Einschweißtiefe (siehe Bild 5.3 rechts) – über

den gesamten Geschwindigkeitsbereich erzielt werden kann. Dass in dem rechten Diagramm die Einschweißtiefen im Bereich hoher Geschwindigkeiten trotz unterschiedlicher Strahlqualität sich nicht mehr unterscheiden, liegt vermutlich an der Prozessführung. Beim Schweißen von Aluminium mit dem CO₂-Laser ist wegen der Gefahr der Plasmaabschirmung auf eine stets genaue Schutzgasatmosphäre zu achten, was bei einer Schweißgeschwindigkeit von bis zu 14 m/min nur mit besonders hohem Aufwand zu gewährleisten ist. Die verschiedenen Datenpunkte zeigen gleichzeitig, dass der Oberflächenzustand keinen Einfluss auf die Entstehung von Prozessporen hat.

Die in [23] beschriebenen Untersuchungen deuten ebenfalls darauf hin, dass eine bessere Fokussierbarkeit zu einer Stabilisierung des Schweißprozesses führt. Verwendet wurden in diesen Versuchsreihen lampengepumpte Nd:YAG- Laser mit unterschiedlicher Strahlqualität. Eingesetzt wurde eine Bearbeitungsoptik mit einer Kollimation $f_k = 200$ mm und einer Fokussierlinse $f = 100$ mm, was zu einem Fokusbereich von $d_f = 0,2$ mm bzw. $d_f = 0,3$ mm geführt hat. Aus Bild 5.4 ist zu erkennen, dass bei einem höheren Verhältnis Leistung / Einschweißtiefe die Porenanzahl abnimmt. Außerdem ist bei gleichem Wert P / t die Anzahl der Poren geringer, wenn mit einem Laser besserer Fokussierbarkeit geschweißt wird.

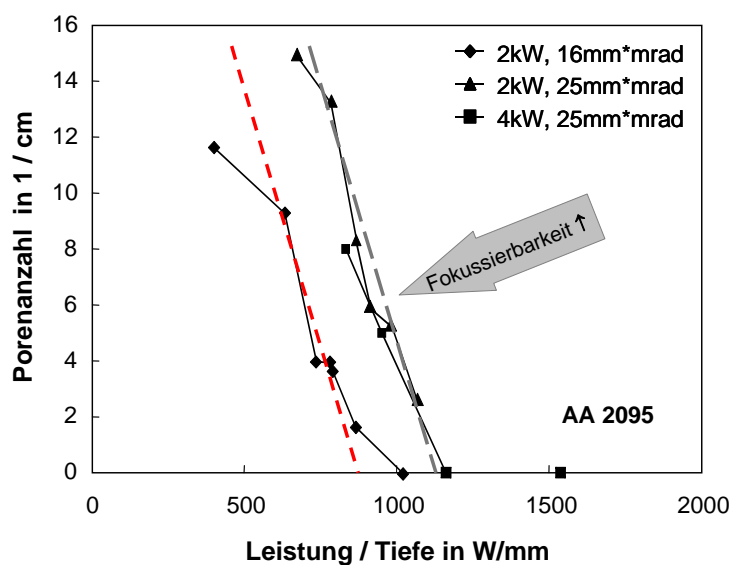


Bild 5.4: Einfluss der Laserleistung pro Schweißnahttiefe auf die Prozessporenanzahl bei verschiedenen Strahlqualitäten und konstanter Fokussierzahl ($F = 2,5$) an einer Legierung der 2000-er Gruppe [23].

Ausgehend von Bild 5.4 wurde eine Versuchsreihe durchgeführt, deren Ziel es war, für die 6000-er Aluminiumlegierung diese Zusammenhänge zu prüfen. Insbesondere sollte der diodengepumpte Scheibenlaser mit dem Strahlparameterprodukt von 6 mm*mrاد in den Vergleich aufgenommen werden.

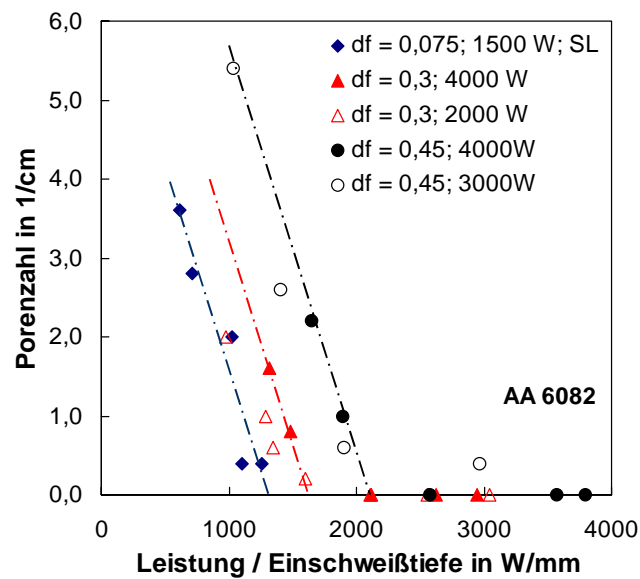


Bild 5.5: Einfluss des Fokussdurchmessers auf die Schweißnahtqualität beim Schweißen von AA 6082. Verwendet wurden ein Nd:YAG-Laser mit 0,6 mm- Faser bei zwei unterschiedlichen Fokussierungen ($f = 100$ mm und $f = 150$ mm) und ein Scheibenlaser (SL) mit 0,15 mm- Faser bei $f = 100$ mm Brennweite.

Bei der 6000-er Aluminiumlegierung ist der Einfluss des Fokussdurchmessers ähnlich zu den Ergebnissen der 2000-er Aluminiumlegierung wie aus Bild 5.5 zu entnehmen ist. Verwendet man eine Strahlquelle besserer Fokussierbarkeit, so kann ein porenfreies Schweißergebnis bereits bei einem niedrigem Verhältnis Leistung / Tiefe erzielt werden. Auf eine andere Art ausgedrückt, es kann bei einem bestimmten angebotenen Wert „ P / t “ mit dem kleineren Fokussdurchmesser ein qualitativ besseres Schweißergebnis erzielt werden.

Allerdings ist diese Darstellungsweise aus Sicht der Anwendung nicht zielführend, da es keine Aussage über die Qualität der Schweißnaht bei einer von der Schweißaufgabe geforderten Mindesteinschweißtiefe liefert. Deshalb ist in Bild 5.6 das gleiche Datenmaterial über der Einschweißtiefe aufgetragen. Zu erkennen ist, dass zum Beispiel bei einer Einschweißtiefe von $t = 2,0$ mm – eine im Karosseriebau häufig vorkommende Aufgabenstellung – die Anzahl der Poren beim Schweißen mit dem Scheibenlaser am höchsten ist. Entgegen dem aus Bild 5.5 erwarteten Verhalten ist die Porosität bei 2 mm Einschweißtiefe – erzielt mit bester Fokussierbarkeit – sehr hoch.

Auf diesen scheinbaren Nachteil wird nachstehend eingegangen. Festzustellen gilt zunächst, dass in beiden Korrelationsformen der Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit implizit enthalten und zu berücksichtigen ist.

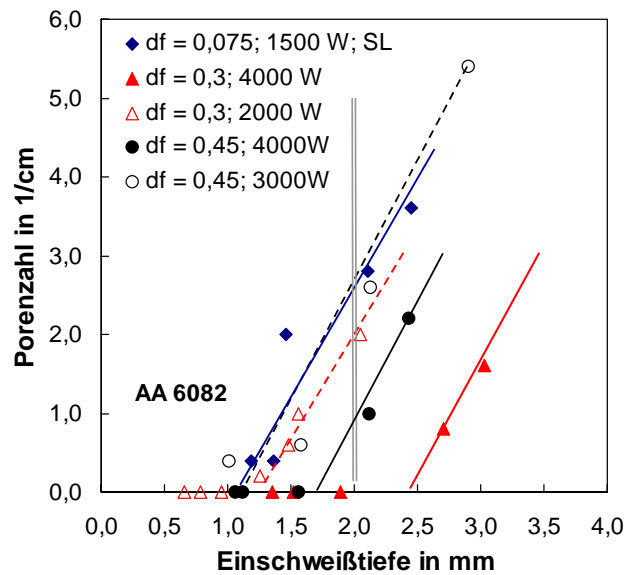


Bild 5.6: Einfluss des Fokussdurchmessers auf die Schweißnahtqualität als Funktion der Einschweißtiefe. Verwendet wurden ein Nd:YAG-Laser mit 0,6 mm- Faser bei zwei unterschiedlichen Fokussierung ($f = 100$ mm und $f = 150$ mm) und ein Scheibenlaser (SL) mit 0,15 mm- Faser bei $f = 100$ mm Brennweite.

In Bild 5.6 ist eine Tendenz zu erkennen, die mit Hilfe des in Gleichung 5. dargestellten Sachverhalts zu erklären ist. Bei gegebenem Fokussdurchmesser ist durch Erhöhung der Laserleistung eine Stabilisierung des Schweißprozesses zu erreichen. Zum einen, weil dadurch die Ablationsrate höher wird und zum anderen, weil bei höherer Leistung die Vorschubgeschwindigkeit, bei welcher die geforderte Einschweißtiefe erreicht wird, gesteigert werden kann. Die höhere Schweißgeschwindigkeit hat unter anderem die Wirkung, dass die Kapillaröffnung sich in Vorschubrichtung nach hinten aufweitet [93], [94], [95] was – erhärtet durch die experimentelle Evidenz der Ergebnisse mittels Doppelfokustechnik – zu einer stabileren Form der Kapillare führen kann. Vergleicht man nun in Bild 5.6 die Kurven gleichen Fokussdurchmessers bei unterschiedlichem Leistungsniveau (leere und ausgefüllte Symbole), so ist deutlich zu erkennen, dass mit höherer Leistung die Porenzahl abnimmt. Deshalb kann man erwarten, dass das Schweißen mit dem Scheibenlaser bei 4 kW Laserleistung zu einer ähnlichen Verbesserung führt. Diese Interpretation stellt jedoch derzeit eine Vermutung dar und es ist noch offen, ob die vom lampengepumpten Nd:YAG- Laser gekannten Verhältnisse auf den Scheibenlaser mit höchster Fokussierbarkeit zu übertragen sind. Die Untersuchungen werden in einer noch zu veröffentlichenden Arbeit [64] aufgenommen und diskutiert.

5.1.3 Fokusmatrix mit dem Scheibenlaser

Wie aus Bild 5.2 zu erkennen ist, ist die Einschweißtiefe beim Schweißen mit dem Scheibenlaser aufgrund seiner noch geringen Ausgangsleistung relativ niedrig. Bei einer maximalen Leistung von $P_L = 1,5 \text{ kW}$ wurden trotz einem Fokusdurchmesser von nur $d_f = 0,1 \text{ mm}$ lediglich etwa 2 mm Tiefe erzielt.

Doppelfokustechnik

In einem ersten Schritt in Richtung Fokusmatrix wird in diesem Kapitel die Doppelfokustechnik mit dem Scheibenlaser beschrieben. Diese Versuche hatten in erster Linie das Ziel, die Leistungssteigerung auszuloten. Insbesondere galt es zu prüfen, ob es Möglichkeiten gibt, eine effiziente Strahladdition zu realisieren und wie eine solche auszusehen hat.

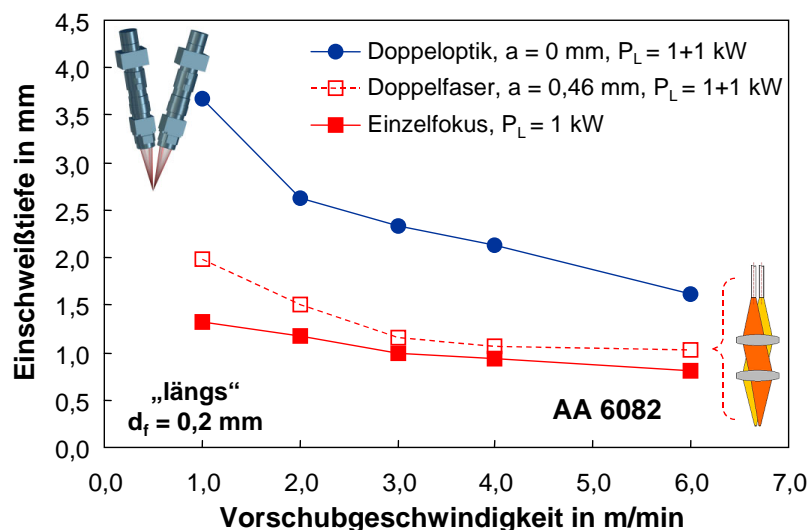


Bild 5.7: Steigerung der Einschweißtiefe durch Addition zweier Scheibenlaser. Doppelfokus unter Verwendung der Doppelfaser beziehungsweise Addition zweier Bearbeitungsoptiken.

Bild 5.7 zeigt die ersten Ergebnisse von Versuchen, bei denen Doppelfokus mit Scheibenlasern untersucht wurden. Die verwendete Doppelfaser mit einem Faserkern-durchmesser von $200 \mu\text{m}$ und einem Faserabstand von $460 \mu\text{m}$ wurde durch eine BEO D35 abgebildet. Der daraus resultierende Brennfleck von $d_f = 0,2 \text{ mm}$ bei einem Fokusabstand von $a = 0,46 \text{ mm}$ erlaubt bei einem Leistungsniveau von insgesamt $2,0 \text{ kW}$ nur eine geringfügige Steigerung der Einschweißtiefe gegenüber dem Einzelfokus mit $1,0 \text{ kW}$. Die Prozesseffizienz ist in diesem Falle äußerst gering.

Durch den Einsatz der „Doppelloptik“ ist es jedoch möglich, bei gleichem Fokus-durchmesser den Fokusabstand zu reduzieren und somit die Leistungserhöhung effek-

tiv umzusetzen (siehe Bild 5.7). Dabei wird als Doppeloptik eine einfache Konstruktion bezeichnet, die aus zwei Bearbeitungsoptiken BEO D35 besteht, wie sie in der Skizze aus Bild 5.7 (li oben) angedeutet ist. Der Fokusabstand wird durch Verschiebung einer der beiden Optiken bewerkstelligt.

Des weiteren führt eine stärkere Fokussierung, mittels einer 1:2 Abbildung beispielsweise, ebenfalls zu einer Verbesserung der Prozesseffizienz beim Schweißen mit der Doppelfaser und dem Scheibenlaser [87]. Dabei haben der kleinere Fokusbereich und der geringere Fokusabstand, die sich durch den kleineren Abbildungsmaßstab ergeben, bei $P_L = 1,0 + 1,0$ kW eine höhere Effizienz zur Folge.

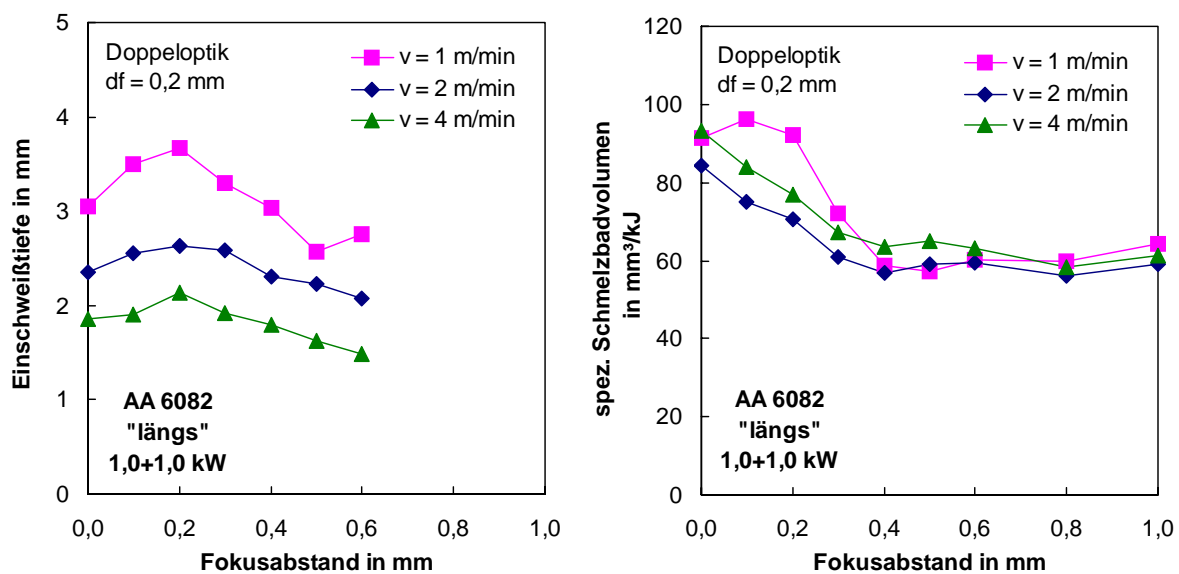


Bild 5.8: Einfluss des Fokusabstandes auf die Einschweißtiefe beim Schweißen mit der Doppeloptik. Verwendet wurden dabei zwei Scheibenlaser in der Längsanordnung.

Beim Schweißen mit der Doppeloptik konnte geprüft werden, wie sich die Dampfkapillare beim Einsatz zweier sehr kleiner Foki verhält. In Bild 5.8 ist zu sehen, dass erst ab $a = 0,2$ mm mit steigendem Fokusabstand die Einschweißtiefe abnimmt. Die größere Tiefe bei $a = 0,2$ mm im Vergleich zu $a = 0,0$ mm ist nicht gänzlich verstanden, ein Hinweis könnte jedoch die Intensitätsverteilung im Inneren der Kapillare sein: aufgrund der winkelig angeordneten Laserstrahlen ist ihr Schnittpunkt – und damit der Punkt höchster Leistungsdichte – unterhalb der Werkstückoberfläche (Bild 4.9). Dies führt, wie im Kapitel 4.1.2 bereits erwähnt, zu einer Erhöhung der Einschweißtiefe.

Die Messkurven in Bild 5.8 können zwar nicht vollständig das Verhalten der Kapillare aufschlüsseln, daraus folgt jedoch, dass unter diesen Umständen bei $a = 0,4$ mm noch eine gemeinsame Kapillare herrscht, die sich ab $a = 0,5$ mm allmählich zu trennen beginnt. Dies wird vor allem im rechten Diagramm aus Bild 5.8 sehr deutlich.

Analog zu den im Kapitel 4.1.1 beschriebenen Ergebnissen kennzeichnet der Übergang der Kurven zu einem waagerechten Verlauf die Trennung der Dampfkapillare. Dieser Sachverhalt deutet demnach auf einen stabilen Prozess bis zu $a = 0,4$ mm hin, was sich in den Ergebnissen in den folgenden Kapiteln noch deutlicher zeigen wird.

Fokusmatrixtechnik

Setzt man die Steigerung der Fokussierbarkeit in eine entsprechende Reduzierung der verwendeten Faserkerndurchmesser um, so lässt sich unter Beibehaltung des Gesamt-Außendurchmessers eine Fokusmatrix aufbauen, die zum einen über Faserbündelung eine einfache Skalierung zu höheren Leistungen erlaubt und dabei zum andern die Möglichkeit einer flexiblen Strahlformung schafft.

Die Ergebnisse aus Kapitel 4.1.1 haben gezeigt, dass durch unterschiedliche Fokusanordnungen und Fokusabstände das Schweißergebnis hinsichtlich Einschweißtiefe und Prozesswirkungsgrad stark beeinflusst werden kann. Die Form der Dampfkapillare hat unmittelbare Auswirkung auf den Einkoppelgrad und damit auf die Effizienz des Schweißprozesses. Zudem ist der Verlust an Effizienz durch Wärmeleitung nicht zu vernachlässigen. Untersuchungen haben gezeigt, dass unterschiedliche Fokusanordnungen und Fokusabstände auch zu unterschiedlichen thermischen Wirkungsgraden führen. Gerade bei Aluminium, ein Werkstoff mit sehr hoher Wärmeleitfähigkeit, kann man möglicherweise durch bestimmte Anordnung der Foki eine Reduktion Wärmeleitungsverluste erreichen.

Um die Fokusmatrix genau und detailliert untersuchen zu können, wurde am IFSW die in Bild 3.13 dargestellte „Fokusmatrixoptik“ konstruiert [90]. Dieser Aufbau erlaubt auf eine sehr einfache und flexible Art unterschiedlichste Anordnungen der Einzelfoki bei verschiedenen Fokusabständen zu untersuchen. Für die Anordnung der Foki gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten. Da jedoch die Untersuchung aller Möglichkeiten den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, wurden lediglich repräsentative Varianten herausgegriffen. Bild 5.9 soll die untersuchten Anordnungen verdeutlichen. Die hieraus resultierenden Erkenntnisse haben anschließend zu dem Bau der „Quattrofaser“ geführt.

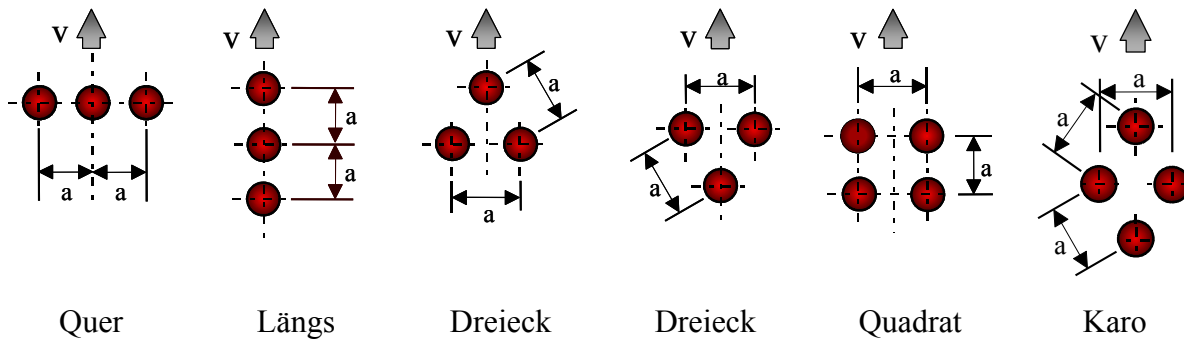


Bild 5.9: Untersuchte Anordnungen und Orientierungen der Fokusmatrix relativ zum Vorschub bei Fokusabstand a .

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in den Diagrammen in Bild 5.10 zusammengefasst. Die Versuche wurden mit Fokusabständen zwischen $a = 0 \text{ mm}$ und $a = 0,6 \text{ mm}$ durchgeführt. Mit dem Fokusabstand $a = 0,2 \text{ mm}$ und $a = 0,4 \text{ mm}$ sind alle oben gezeigten Anordnungen untersucht worden. Bild 5.10 zeigt, dass die unterschiedliche Orientierung der Foki bezüglich der Vorschubrichtung zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führt.

Vergleicht man die beiden Diagramme in Bild 5.10, so ist ein sehr deutlicher Abfall der Einschweißtiefe mit steigendem Fokusabstand zu erkennen. Bei einer Einzelleistung der Laserstrahlen von $P_L = 1,0 \text{ kW}$ führt eine Erhöhung des Fokusabstandes sehr schnell zu einer Reduktion des Einkoppelgrades. Analog Bild 5.8 ist auch hier das „Kreuzen“ der Einzelstrahlen der Grund, warum in Superposition die Einschweißtiefe geringer ist als bei $a = 0,2 \text{ mm}$.

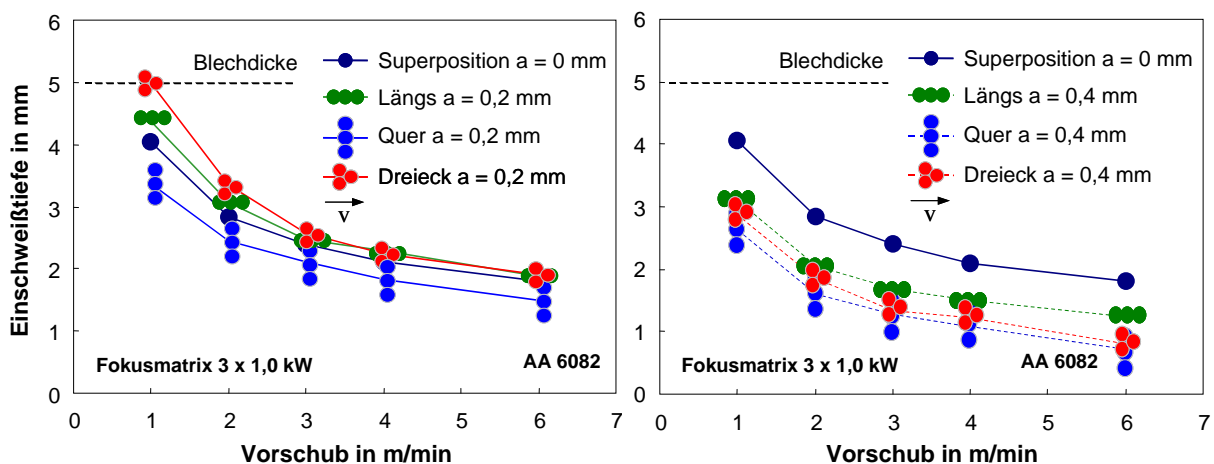


Bild 5.10: Einschweißtiefenvergleich verschiedener Dreifachanordnungen bei $a = 0,2$ und $a = 0,4 \text{ mm}$ mit der Referenz in Superposition (AA 6082, $P_L = 3 \times 1,0 \text{ kW}$, $d_f = 0,2 \text{ mm}$).

Es stellte sich heraus, dass bei $a = 0,2 \text{ mm}$ die sogenannte *Dreiecksanordnung* über den gesamten Geschwindigkeitsbereich die höchsten Einschweißiefen erreicht. Hier kann davon ausgegangen werden, dass eine gemeinsame, annähernd runde Kapillaröffnung vorliegt, die aufgrund der Nähe der einzelnen Laserstrahlen zu einem vergleichsweise hohen Einkoppelgrad führt. Die *Queranordnung* hingegen war bezüglich der Einschweißtiefe die ineffizienteste Anordnung. Hier ist von einer sehr weit geöffneten Dampfkapillare auszugehen, was einen niedrigen Einkoppelgrad zur Folge hat. Zudem trifft jeder Einzelstrahl auf kaltes Material und jeder erzeugt für sich ein „eigenes“ Schmelzbad. Im Gegensatz dazu folgt in der *Längsanordnung* ein Laserstrahl dem anderen. Die Energie des vorlaufenden Strahls kann somit zu einer Erhöhung der Einschweißtiefe genutzt werden. Der „Nutzen“ der vorlaufenden Laser nimmt allerdings mit größer werdendem Fokusabstand ab. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass diese Ergebnisse mit Einzelleistungen von jeweils $1,0 \text{ kW}$ erzielt wurden. Bei höheren Einzelleistungen der Scheibenlaser ist sehr wahrscheinlich mit veränderten Ergebnissen zu rechnen. Erwartet wird, dass bei einer höheren Leistung der einzelnen Laserstrahlen die Effizienz des Schweißprozesses, bedingt durch die größere Einschweißtiefe und den dadurch steigenden Einkoppelgrad, selbst bei $a = 0,4 \text{ mm}$ noch sehr hoch ist.

Die Querschliffe in Bild 5.11 dokumentieren die gute Qualität der Schweißnähte bei verschiedenen Anordnungen, zeigen jedoch auch den schnellen Abfall des Wirkungsgrades bei zu großem Fokusabstand.

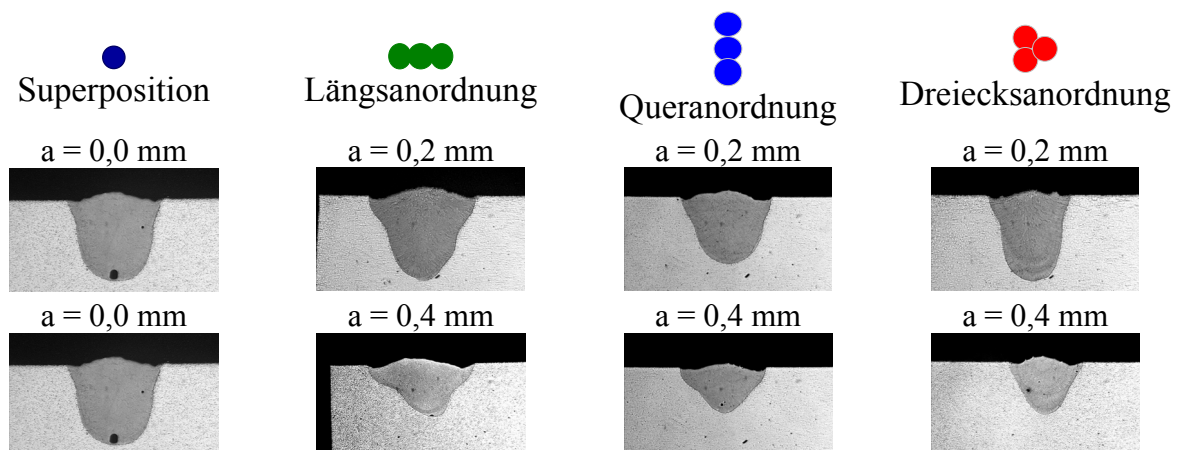


Bild 5.11: Nahtquerschliffe der verschiedenen Anordnungen bei dem Fokusabstand $a = 0,2 \text{ mm}$ und $a = 0,4 \text{ mm}$ (AA 6082, $P_L = 3 \times 1,0 \text{ kW}$, $d_f = 0,2 \text{ mm}$, $v = 2 \text{ m/min}$).

Die Versuche mit vier Einzelfoki haben keine weiteren Erkenntnisse gebracht. Auch in diesen Anordnungen waren die Abstände kleiner $0,4 \text{ mm}$ am effizientesten. Ähnlich wie bei der Dreiecksanordnung ist in der Vierfachanordnung die Längs- und die Quer-

anordnung wenig effektiv. Außerdem hat sich gezeigt, dass die Quadrat- und die Karoanordnung bei gleichem Fokusabstand keinen signifikanten Unterschied in der erzielten Einschweißtiefe aufweisen – ein interessanter Aspekt, der vor allem bei industriellen Anwendungen Richtungsunabhängigkeit gewährleistet (siehe Bild 5.12).

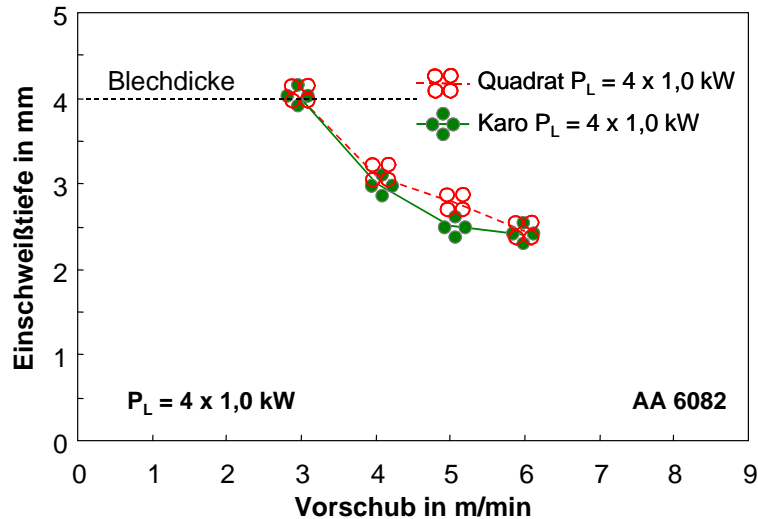


Bild 5.12: Richtungsunabhängigkeit der Orientierung relativ zum Vorschub bei unterschiedlicher Ausrichtung des „Quadrats“ - im Diagramm als *Quadrat* und *Karo* bezeichnet. (AA 6082, $P_L = 4 \times 1,0$ kW, $d_f = 0,2$ mm, $v = 2$ m/min).

Schweißen mit der Quattrofaser

Die mit Hilfe der Fokusmatrixoptik gewonnenen Erkenntnisse haben zum Bau der Quattrofaser (siehe Bild 3.4) geführt. Diese Mehrfachfaser besteht aus vier einzelnen 200µm- Fasern, die im Quadrat angeordnet sind. Bedingt durch das Coating der einzelnen Fasern beträgt der Abstand Fasermittelpunkt zu Fasermittelpunkt jeweils $a = 460$ µm. Dabei werden die vier Glasfasern in einen gemeinsamen Faserendstecker integriert, der zusammen mit einer Standardfokussieroptik verwendet werden kann. Jedes der Faserenden wird somit durch die Bearbeitungsoptik entsprechend dem Abbildungsverhältnis abgebildet.

Das Diagramm in Bild 5.13 zeigt die erzielten Einschweißtiefen. Die Größenverhältnisse bei 100 mm bzw. 150 mm Fokussierung sind der Skizze rechts zu entnehmen. Die gestrichelte Linie markiert dabei den Fokussdurchmesser, der bei einer 600µm-Faser eines lampengepumpten Systems bei gleicher Abbildung am Werkstück resultiert. Deutlich wird in diesen Skizzen, dass aufgrund des hier gegebenen Fasercoatings die Umhüllende der Einzelspots die Dimension des Brennflecks bei Verwendung einer 600µm- Faser stets überschreiten.

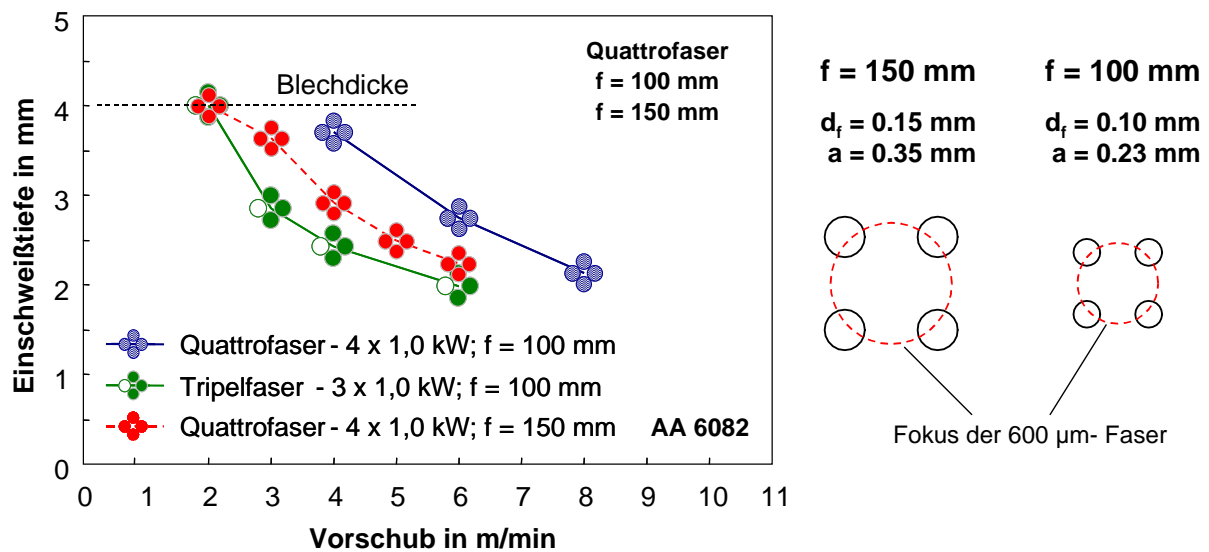


Bild 5.13: Einschweißtiefe als Funktion der Geschwindigkeit für 100, bzw. 150 mm Brennweite. Zum Vergleich Dreifachfokus bei 100 mm Brennweite.

Der Unterschied zwischen den Ergebnissen von Tripelfaser – bei welchen nur drei der vier Fasern mit Leistung beaufschlagt wurden – und Quattrofaser ist in dem Diagramm deutlich zu erkennen. Die um ein Kilowatt höhere Gesamtleistung führt bei gleicher Fokussierung in zu einer deutlichen Steigerung der Einschweißtiefe. Wird die Vierfachanordnung bei einer Abbildung 1:1,33 (Brennweite $f = 150 \text{ mm}$) verwendet, ist der Unterschied aufgrund niedriger Intensität nicht mehr so augenfällig, wie die im Diagramm aus Bild 5.13 gestrichelt dargestellte Kurve verdeutlicht. Außerdem ist, wie in der Skizze dargestellt, der Abstand a zwischen den einzelnen Foki im Falle der starken Fokussierung ebenfalls kleiner. Im Wesentlichen gilt: größere Fokusabstände sowie größere Fokusdurchmesser führen bei gleicher Gesamtleistung zu einer Reduzierung der Einschweißtiefen.

Die Qualität der bis zu diesem Zeitpunkt dargestellten Schweißergebnisse und die Tatsache, dass durch den Einsatz der Quattrofaser eine sehr effiziente „Fokusmatrix“ gefunden wurde, die zudem relativ zum Vorschub richtungsunabhängig ist, hat dazu motiviert eine eingehendere Prüfung dieser Technik durchzuführen.

5.2 Hohe Qualität und Effizienz gleichzeitig – Schweißen mit der Fokusmatrix

Die Fokusmatrix- Versuche haben gezeigt, dass durch den Einsatz von diodengepumpten Scheibenlasern Vorteile hinsichtlich der Prozessführung zu erwarten sind. Allerdings ist diese Technologie noch sehr aufwändig, sodass ein Vergleich mit der Einzelfokustechnik und der Doppelfokustechnik zeigen soll, ob die Vorteile der neuen Technik den höheren Aufwand rechtfertigen. Die zentrale Frage dieses Kapitels lautet demnach: Wo steht die Fokusmatrixtechnik im Vergleich zu den heute schon eingesetzten Verfahren wie zum Beispiel die Einzel- oder Doppelfokustechnik?





Verfahren	Symbol	Bezeichnung	Dimension am Werkstück	erzeugt durch
Einzelfokus		EF	$d_f = 0,45 \text{ mm}$	Einzelfaser
Fokusmatrix		FM	$d_f = 0,15 \text{ mm}$ $a = 0,35 \text{ mm}$	Quattrofaser
Doppelfokus		DF	$d_f = 0,45 \text{ mm}$ $a = 0,45 \text{ mm}$	Einzelfaser Strahlteilung
Doppelfokus		DF	$d_f = 0,45 \text{ mm}$ $a = 0,75 \text{ mm}$	Einzelfaser Strahlteilung

Tabelle 5.2: Untersuchte Laserschweißverfahren: Skizze, Bezeichnung, Maße auf der Werkstückoberfläche und Art der Realisierung.

Um diese Frage zu beantworten, wurde ein breit angelegtes Versuchsprogramm aufgestellt. Dieses Programm sollte anhand von verschiedenen Aluminiumlegierungen bei absolut identischen Randbedingungen abgearbeitet werden. Die Erklärung der Verfahren, deren Bezeichnung, Maße auf der Werkstückoberfläche und eine maßstabsgerechte Skizze sind der Tabelle 5.2 zu entnehmen. Der Einzelfokus wird durch die Abbildung der 600µm- Faser eines lampengepumpten Nd:YAG-Lasers generiert. Bei den Versuchen mit der Doppelfokustechnik wurde die Methode der Strahlteilung angewandt, wobei zwei verschiedene Strahlteiler verwendet wurden (siehe auch Kapitel 2.3). Bei dem Einsatz der 600µm- Faser und einer Bearbeitungsoptik mit einem Abbildungsmaßstab $M_A = 1:1,33$ – die in der Automobilindustrie am häufigsten eingesetzte Bearbeitungsoptik – führt die Strahlteilung zu dem Fokusabstand von $a = 0,45 \text{ mm}$ bzw. $a = 0,75 \text{ mm}$, wobei der Durchmesser der einzelnen Foki $d_f = 0,45 \text{ mm}$ beträgt.

Um eine gute Vergleichbarkeit zu erhalten, wurden die Schweißverfahren an Blindnähten bei identischen Prozessparametern durchgeführt, wobei kein Zusatzwerkstoff verwendet wurde. Die Blechdicke betrug 4 mm, der Geschwindigkeitsbereich wurde zwischen 4 m/min und 10 m/min variiert. Als Schutzgas kam bei allen Versuchen Argon bei einem Volumenstrom von 15 l/min zum Einsatz (siehe auch [96]).

5.2.1 Schweißen von Aluminium Knetlegierungen

Die Fügeverfahren werden in diesem Abschnitt bezüglich ihrer Leistungsfähigkeit sowie der Qualität der Schweißnaht miteinander verglichen. Hierbei liegt das Hauptaugenmerk auf Einschweißtiefe, Vorschubgeschwindigkeit und der dabei resultierenden Porosität.

Bild 5.14 zeigt, dass die Einschweißtiefen, die mit der Einzelfokustechnik (EF) erzielt wurden, über den gesamten Geschwindigkeitsbereich am höchsten sind. Das bei der in dieser Anordnung kleinsten Kapillaröffnung resultierende Aspektverhältnis führt zu hohen Einkoppelgraden und damit zu großen Einschweißtiefen. Die Kurven der Versuche mit der Doppelfokustechnik (DF) liegen aufgrund der geringeren Effizienz (siehe Abschnitt 4.1.1) unterhalb denen der Einzelfokustechnik. Mit größer werdendem Fokusabstand (Bifokal 0,5) nimmt die Einschweißtiefe weiter ab.

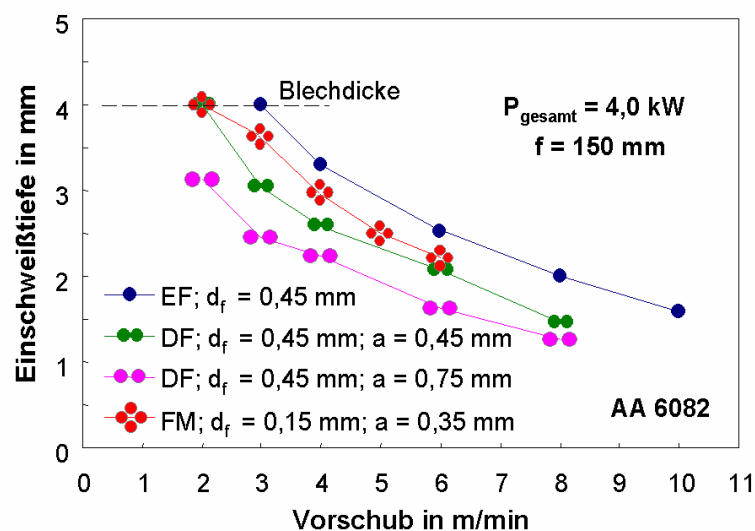


Bild 5.14: Schweißen von Aluminium AA 6082 mit verschiedenen Schweißtechniken: Einzelfokus (EF), Doppelfokus (DF) und Fokusmatrix (FM) bei 4,0 kW Gesamtleistung und der Brennweite $f = 150$ mm.

Die Einschweißtiefen, die mit der Fokusmatrixtechnik (Quattrofaser) erreicht wurden, liegen über den Werten der Doppelfokustechnik und nur knapp unterhalb der Einzelfokustechnik. Dieser Sachverhalt ist dadurch bedingt, dass der Abstand zwischen den

einzelnen Spots bei der Mehrfachfaser – konstruktiv bedingt – noch zu groß ist, um den Wirkungsgrad der Einzelfokustechnik zu erreichen: die im Vergleich zur Einzelfokustechnik größere Kapillaröffnung führt zu geringfügig niedrigeren Einkoppelgraden und damit zu kleineren Einschweißtiefen. Analog lässt sich auch die im Vergleich zum Doppelfokus höhere Effizienz begründen.

Weitere Vorteile der Fokusmatrixtechnologie offenbaren sich bei dem Vergleich der Schweißnahtqualität. Vor allem der „zielorientierte“ Vergleich bei gleicher geforderter Einschweißtiefe (siehe Bild 5.15) zeigt die Vorteile der Fokusmatrix sehr deutlich: gute Schweißnahtqualität ist bei gleichzeitig hoher Schweißgeschwindigkeit möglich.

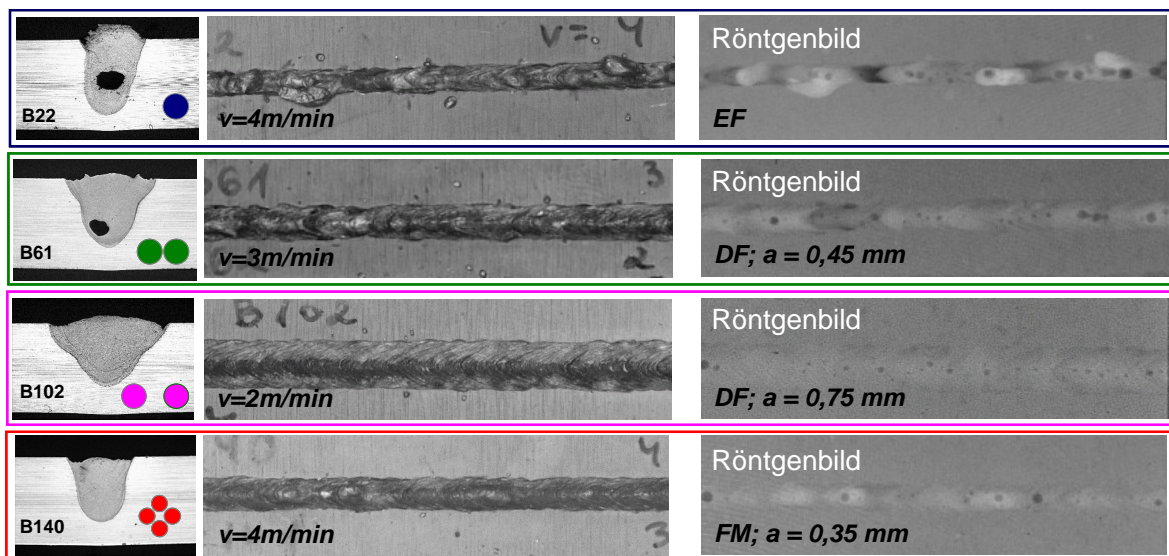


Bild 5.15: Vergleich der Schweißnahtqualität bei $3 \pm 0,2$ mm Einschweißtiefe. Aluminiumlegierung AA 6082 bei jeweils 4,0 kW Gesamtleistung und $f = 150$ mm.

Unter den oben genannten Bedingungen zeigt die Fokusmatrix das beste Ergebnis. Die Geschwindigkeit liegt, wie auch bei der EF- Technik, bei 4 m/min. Das Schweißergebnis unterscheidet sich jedoch deutlich. Die Probe B22 in Bild 5.15 hat eine unregelmäßige Oberraupe, und ein Auswurf ist auf diesem Bild ebenfalls zu erkennen. Das Röntgenbild zeigt, dass im Inneren der Schweißnaht große Poren vorhanden sind. Im Gegensatz dazu ist die Oberraupe der Probe B140 (Fokusmatrix) fehlerfrei, und die Anzahl der Poren in der Schweißnaht ist gering. Die qualitativ besten Ergebnisse bei dieser Einschweißtiefe wurden mit der Doppelfokustechnik bei großem Fokusabstand produziert, die Schweißgeschwindigkeit war hier jedoch sehr gering (2 m/min). Die sehr hohe Wärmeleitfähigkeit des geschweißten Legierungstyps führt dazu, dass der Einfluss der Fokuskonfiguration deutlich zu sehen ist. Der stark v-förmig ausgeprägte Nahtquerschnitt deutet auf hohe, dreidimensionale Wärmeleitverluste hin.

Der Vergleich der verschiedenen Schweißtechniken wurde auch an einer Aluminiumlegierung der 5000-er Gruppe durchgeführt. Die gemessenen Einschweißtiefen sind in Bild 5.16 wiedergegeben. Grundsätzlich herrschen sehr ähnliche Verhältnisse wie bei der Legierung AA 6082. Die geringere Wärmeleitfähigkeit dieser Legierung (siehe Tabelle 3.1) führt jedoch dazu, dass die Differenz zwischen den einzelnen Kurven geringer ausfällt. Außerdem sind aufgrund der niedrigeren Wärmeleitungsverluste die Einschweißtiefen höher als bei AA 6082.

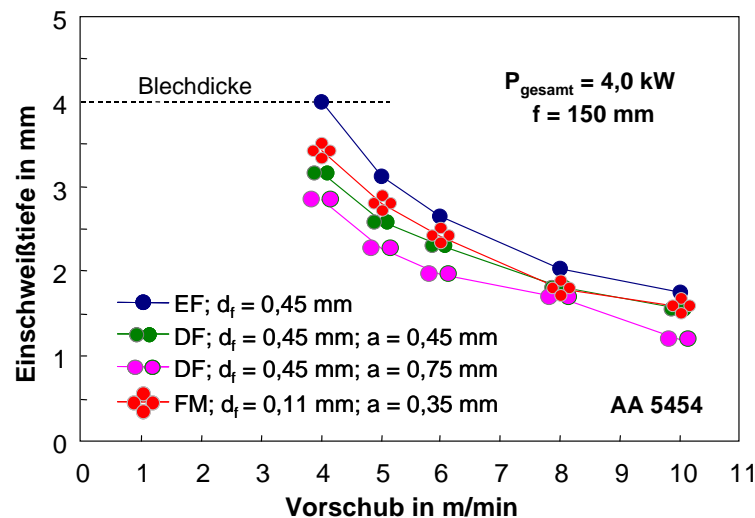


Bild 5.16: Schweißen von Aluminium AA 5454 mit verschiedenen Schweißtechniken: Einzelfokus (EF), Doppelfokus (DF) und Fokusmatrix (FM) bei 4,0 kW Gesamtleistung und der Brennweite $f = 150$ mm.

Der relativ hohe Magnesiumgehalt dieser Legierungen führt während dem Laserstrahlschweißen zu einem sehr instabilen Verhalten. Prozessporen und Schmelzbadauswürfe treten, verglichen mit dem Schweißergebnis der 6000-er Legierung, häufiger auf. Den positiven Einfluss der Fokusmatrixtechnik dokumentiert das Bild 5.17, wo die Röntgenbilder der Schweißnähte bei gleicher Vorschubgeschwindigkeit gegenübergestellt sind. Während die Probe A 24 (EF- Technik) zahlreiche Prozessporen und Schmelzauswürfe zeigt, ist beim Schweißen mit der Fokusmatrixtechnik nur geringe Porosität zu verzeichnen. Auswürfe konnten hier nicht festgestellt werden. Selbst die Ergebnisse der DF- Technik (Probe A 45) weisen bei niedrigerer Einschweißtiefe eine höhere Porenzahl auf als die Probe A 110.

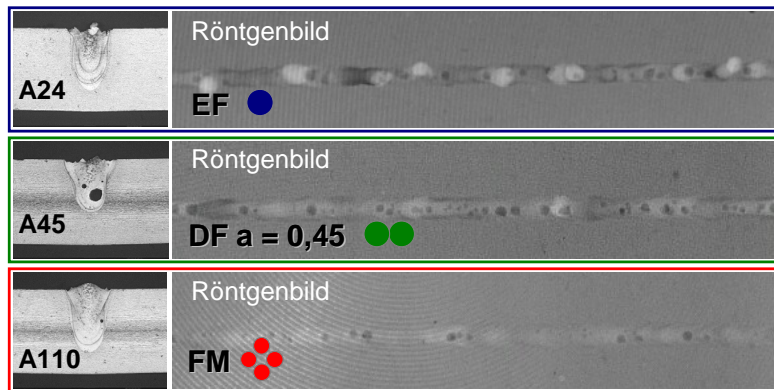


Bild 5.17: Aluminiumlegierung AA 5454: Vergleich der Schweißnahtqualität bei konstanter Vorschubgeschwindigkeit $v = 5 \text{ m/min}$, jeweils $4,0 \text{ kW}$ Gesamtleistung und einer Brennweite $f = 150 \text{ mm}$.

Die bessere Qualität der Nähte, die mit der Fokusmatrixtechnik geschweißt wurden, ist reproduzierbar und konnte beim Schweißen verschiedener Legierungen nachgewiesen werden. Die Erklärung dieses Sachverhalts ist in den Skizzen in Bild 5.18 veranschaulicht. Vergleicht man die Einzelfokustechnik mit der Fokusmatrixtechnik, so kann man bei gleicher Vorschubgeschwindigkeit in erster Näherung von nahezu identischen Kapillaren ausgehen. Die Gesamtlaserleistung beträgt in beiden Fällen $P_{\text{gesamt}} = 4,0 \text{ kW}$.

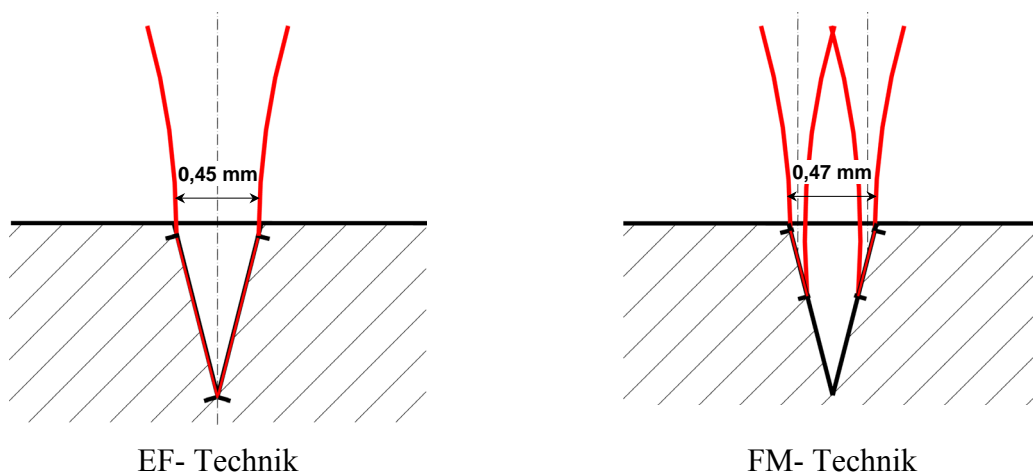


Bild 5.18: Skizze der Dampfkapillare und der einfallenden Laserstrahlen beim Schweißen mit der Einzelfokustechnik (li) beziehungsweise mit der Fokusmatrixtechnik (re).

Da man auch beim Schweißen mit der Fokusmatrix von einer gemeinsamen Dampfkapillare ausgehen kann (siehe Abschnitt 5.1.3 und Bild 5.8), ist in beiden Fällen die Öffnung der Dampfkapillare sehr ähnlich. Der Unterschied liegt, wie in Bild 5.18 angedeutet, in der Art, wie die geometrische Wechselwirkung zwischen Laserstrahl und Kapillarwand stattfindet, also wie die Kapillare geöffnet wird bzw. geöffnet bleibt.

Während die von den Oberflächenspannungskräften hervorgerufenen Schließkräfte in beiden Fällen näherungsweise gleich sind, unterscheiden sich die in der Kapillare re-

sultierenden Verläufe der Ablationsdrücke. Bei der Einzelfokustechnik wird die Leistung von der gesamten Mantelfläche der Kapillare absorbiert. Im Gegensatz dazu ist die Auftrefffläche beim Schweißen mit der Fokusmatrix dank der geringen Fokushdurchmesser – grob geschätzt – etwa halb so groß, was zu höheren Verdampfungsraten führt. Der Öffnungsdruck der Dampfkapillare ist im oberen Bereich folglich höher und ein Kollaps unwahrscheinlicher (geht man von den Porenentstehungsmodellen in [3], [38], [97], und [98] aus, so ist genau dies der Bereich, von wo aus die Abschnürung der Kapillare zu einer Porenbildung führt). Ein Sachverhalt, der im Übrigen auch die Argumente liefert, weshalb beim Schweißen mit defokussiertem Einzelspot die Prozessstabilität niedriger ist, als beim Schweißen mit der Doppelfokustechnik (siehe Abschnitt 4.1.2).

5.2.2 Schweißen von Aluminium Druckguss

Die in Bild 5.19 gezeigten Versuche mit Aluminium- Druckgussbauteilen sind analog zu den Schweißversuchen mit Aluminium-Knetlegierung durchgeführt worden. Dabei wurde das 2 mm dicke Druckgussbauteil (GD- AlSi10MgMn) mit einem 1,15 mm dicken Blech der Legierungsgruppe AA 6xxx im Überlapp verschweißt. Die Schweißgeschwindigkeit wurde so eingestellt, dass eine sichere Durchschweißung gewährleistet ist (siehe auch [99]). Außerdem ist die Anbindebreite in der Fügeebene als festigkeitsrelevantes Maß von Bedeutung. Demnach wurden die Schweißverbindungen auch hinsichtlich dieser Eigenschaft untersucht, wobei hier das Mindestmaß der Anbindebreite in der Fügeebene auf 1,15 mm festgesetzt worden ist, was der Blechdicke des dünneren Fügepartners entspricht.

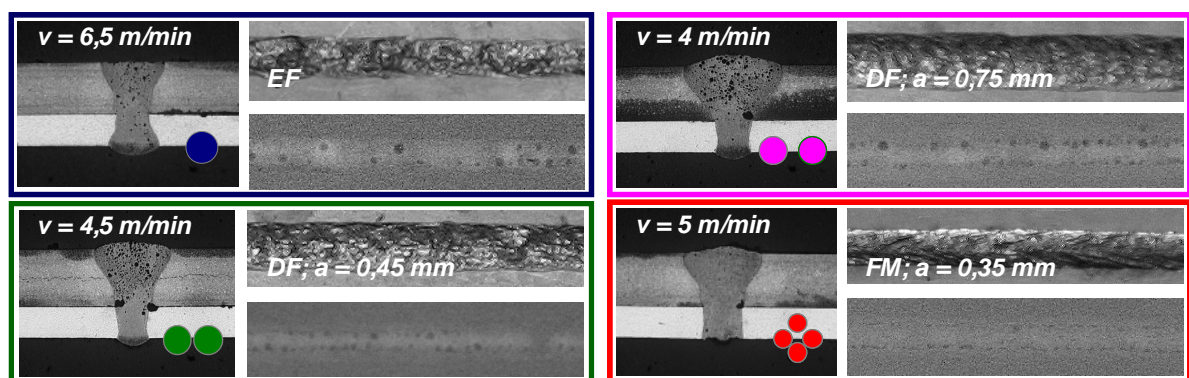


Bild 5.19: Porosität beim Schweißen einer Überlappverbindung von Aluminium- Druckguss ($s = 2,0 \text{ mm}$, oben) mit Aluminium- Blech ($s = 1,15 \text{ mm}$, unten) bei verschiedenen Laserschweißverfahren ($P_{\text{gesamt}} = 4,0 \text{ KW}$).

Dargestellt ist in Bild 5.19 für jedes Verfahren jeweils ein Querschliff, ein Foto der Nahtoberfläche, sowie ein Röntgenbild der Schweißnaht. Um von gleichen Verunreini-

gungen im Inneren des Gussbauteils ausgehen zu können, wurden alle Proben von exakt derselben Stelle der Bauteile entnommen.

In den Querschliffen sind zwei Arten von Poren zu erkennen: fein über den Querschnitt (insbesondere des Gussmaterials) verteilte Wasserstoffporen und Poren, die in erster Linie in der Ebene zwischen den beiden Fügepartnern zu finden sind. Die Querschliffe der gesamten Versuchsreihe zeigen, dass die Porosität (Flächenanteil der Poren an der Nahtfläche) hauptsächlich von der Menge des aufgeschmolzenen Gussmaterials abhängt. Die höchste Schweißgeschwindigkeit wird mit dem Einzelfokus (EF) erreicht. Bei $v = 6,5 \text{ m/min}$ ist die Wasserstoffporosität sehr gering, der Schweißprozess ist hier jedoch unregelmäßig, die Prozessstabilität gering. Bei der Doppelfokustechnik (DF) ist je nach Fokusabstand eine sehr regelmäßige Nahtoberraupe zu erkennen. Die aufgrund niedriger Schweißgeschwindigkeit breitere Naht weist jedoch eine höhere Wasserstoffporosität auf. Dies ist in erster Linie damit begründet, dass bei kleinem Vorschub viel Gusswerkstoff aufgeschmolzen wird, was zu einem erhöhten Porenvorkommen führt. Auch haben wegen der langsameren Erstarrung des aufgeschmolzenen Nahtvolumens die Bläschen mehr Zeit zu wachsen, wobei ein Ausgasen der Poren bei dieser Schweißgeschwindigkeit noch nicht möglich ist. Analog zum Schweißen der Aluminium- Knetlegierungen zeigt die Fokusmatrix (FM) gute Qualität bei gleichzeitig hoher Effizienz.

Außer den kleinen, fein verteilten Wasserstoffporen sind in dem Röntgenbild vor allem am Rande der Naht große Poren zu beobachten. Der schrittweise durchgeführte Aufschliff hat gezeigt, dass diese Poren hauptsächlich in der Fügeebene zu finden sind. Herstellungsbedingt ist die Gusschuttschicht von dem auf Kohlenwasserstoffbasis aufgebauten Formtrennmittel verunreinigt. Diese Verunreinigungen setzen beim Schweißen Gase frei, die dann zu vermehrtem Porenvorkommen führen.

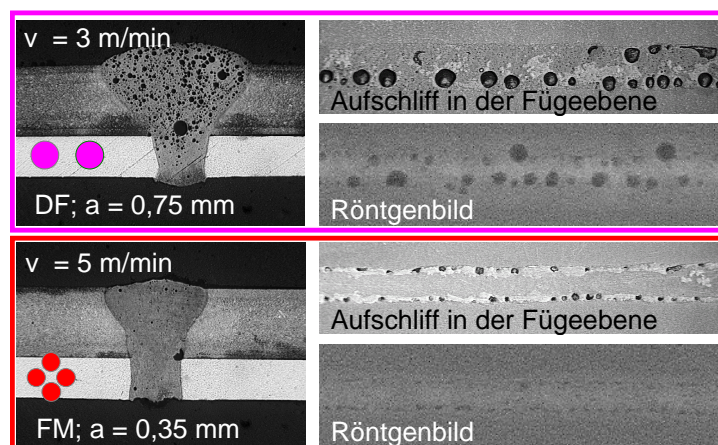


Bild 5.20: Poren in der Fügeebene bei langsamer bzw. bei hoher Vorschubgeschwindigkeit.

Eine weitere Ursache für die Entstehung dieser Porenart ist die sich im Spalt befindliche Luft. Wird das Bauteil während dem Schweißprozess erwärmt, so kann die sich ausdehnende Luft in Richtung Spannstelle nicht entweichen, was zu einem Eindringen in das schmelzflüssige Nahtvolumen führen kann. Die Untersuchungen zeigen, dass eine geringere Wärmebelastung des Bauteils durch höhere Schweißgeschwindigkeiten zu einer kleineren Porosität in der Fügeebene führt, wenn auch eine vollständige Vermeidung nicht möglich ist (siehe Bild 5.20).

5.3 Modifikation des Schweißens mit der Fokusmatrix

In diesem Abschnitt soll aufgezeigt werden, wie der Schweißprozess mittels Fokusmatrix modifiziert werden kann, welche Möglichkeiten dabei bestehen und mit welchen Schwierigkeiten gerechnet werden muss.

5.3.1 Nahtglättung

Mit der Fokusmatrixtechnik kann durch Variation der Fokusanordnungen und der individuellen Leistungen die Intensitätsverteilung an die Bearbeitungsaufgabe angepasst werden. In den folgenden Versuchen wird diese Anpassungsmöglichkeit zur Glättung der Nahtoberraupe durch einen nachlaufenden, defokussierten Laserstrahl ausgenutzt. Durch den nachlaufenden Strahl soll das beim Aluminiumschweißen sehr unruhige Schmelzbad stabilisiert und somit der Entstehung von Nahtfehlern vorgebeugt werden. Vor allem bei größeren Abständen des defokussierten Strahls zur „schweißenden“ Anordnung, werden durch wiederholtes Aufschmelzen Nahtfehler wie z.B. Einbrandkerben, Schmelzauswürfe und unregelmäßige Nahtoberraupe minimiert beziehungsweise beseitigt.

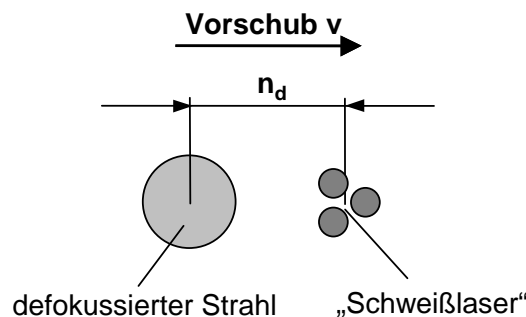


Bild 5.21: Anordnung der Laserstrahlen bei den Versuchen zur Nahtglättung mittels eines defokussierten Laserstrahls.

Zum Einsatz kam bei diesen Untersuchungen die in Bild 3.13 (re) abgebildete Fokussmatrixoptik. Die in allen Richtungen mögliche Verstellbarkeit dieser Konstruktion erlaubt neben dem Einstellen unterschiedlichster Anordnungen auch die Höhenverstellung einzelner Fokussieroptiken. Somit können die in den vorigen Abschnitten dargestellten Vorzüge des Schweißens mit der Fokussmatrixtechnik weiter ausgebaut werden.

Die Laserleistung der drei zur Erzeugung der Schweißnaht verwendeten Laser betrug jeweils 1 kW, die des defokussierten Strahls 1,5 kW. Als Fokusanordnungen der „Schweißlaser“ wurde die Superpositions-, die 0,2 mm- und die 0,4 mm Dreiecksanordnung verwendet. Die Einschweißungen erfolgten in AlMgSi1-Bleche mit einer Dicke von 4 mm. Der als Nachlauf n_d bezeichnete Abstand des defokussierten Lasers von der Mitte der Fokusanordnung der „Schweißlaser“ wurde in den Versuchsreihen in 1 mm Schritten von 0 bis 7 mm erhöht. Die Versuchsreihen wurden für jede Fokusanordnung jeweils mit einer Defokussierung des zur Glättung verwendeten vierten Lasers von 4, 7 und 10 mm durchgeführt (siehe auch [100]). Dabei wird die nachlaufende Bearbeitungsoptik in z-Richtung um den entsprechenden Wert nach oben verschoben. Um ein gutes Ergebnis zu erzielen, ist dabei je nach eingestellter Schweißgeschwindigkeit eine Defokussierung zu wählen, bei welcher die gesamte Nahtbreite von dem defokussierten Strahl abgedeckt wird.

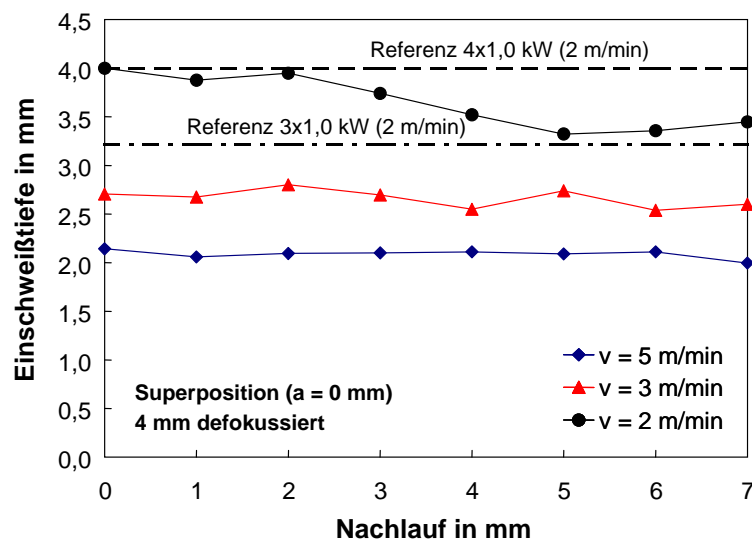


Bild 5.22: Einschweißtiefe als Funktion des Abstandes n_d des nachlaufenden, um 4 mm defokussierten Laserstrahls bei der Superpositionsanordnung (AA 6082).

Um die Wirkung beziehungsweise den Einfluss des defokussierten Lasers abschätzen zu können, wurden Referenzversuche mit den Anordnungen ohne defokussierten Laser und Versuche, bei denen alle vier Laser auf Superposition ($a = 0$ mm) eingestellt waren, durchgeführt. In Bild 5.22 sind die Einschweißkurven dieser Referenzversuche als gestrichelte Linien für $v = 2,0$ m/min dargestellt. Zudem sind die Einschweißtiefe

über dem Nachlauf des um 4 mm defokussierten Laserstrahls wiedergegeben. Daraus wird deutlich, dass durch den defokussierten Laserstrahl die Einschweißtiefen bei größer werdendem Nachlauf n_d abnimmt. Bei einem Nachlauf von mehr als 2 mm steuert der defokussierte Laser jedoch fast keine Energie mehr zur Erzeugung der Schweißnaht bei – er schmilzt lediglich das vorhandene Nahtvolumen teilweise wieder auf –, wodurch die erzielte Einschweißtiefe dort konstant verläuft. Des Weiteren kann man dem Diagramm den mit steigender Schweißgeschwindigkeit sinkenden Einfluss des nachlaufenden defokussierten Strahls entnehmen. So wird bei einer Schweißgeschwindigkeit von $v = 5$ m/min auch bei geringem Nachlauf n_d keine Erhöhung der Einschweißtiefe erzielt.

Diese Zusammenhänge sind in ähnlicher Form auch für die anderen Fokusanordnungen gültig, wobei die Wirkung des nachlaufenden Strahls mit zunehmender Defokussierung aufgrund der geringer werdenden Leistungsdichte weiter abnimmt.

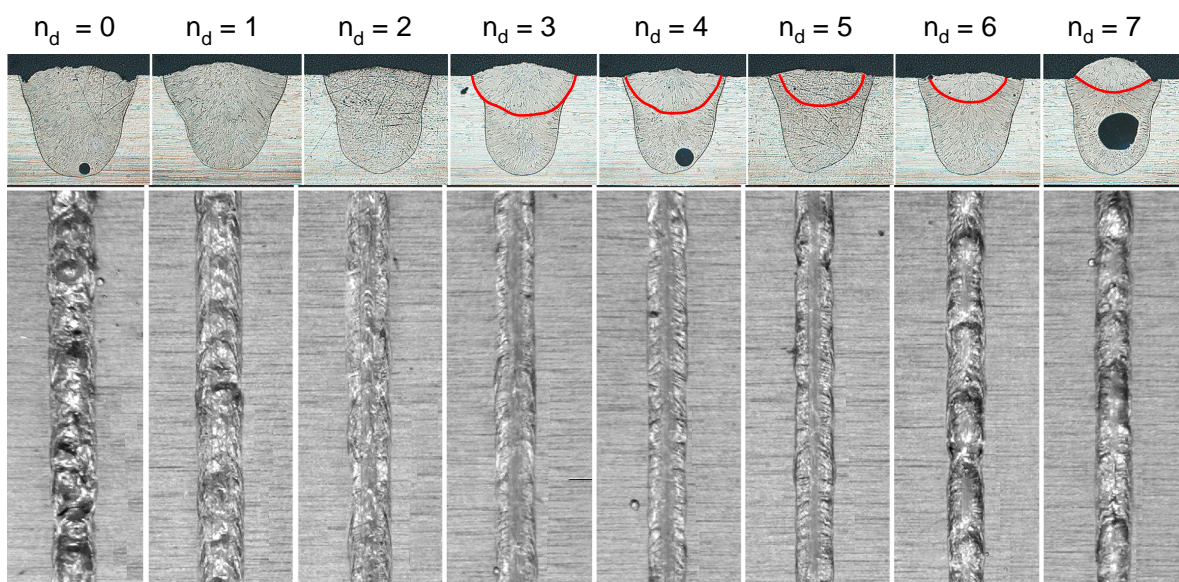


Bild 5.23: Querschliffe und Oberrauten der, mit der $a = 0,2$ mm Dreiecksanordnung bei einer Defokussierung des nachlaufenden Strahls von 7 mm und einer Vorschubgeschwindigkeit von $v = 5$ m/min erzeugten Nähte.

Wie aus Bild 5.23 und Bild 5.24 ersichtlich wird, ist die Steigerung der Qualität der Nahtoberraupe durch den überlagerten bzw. nachlaufenden, defokussierten Laserstrahl stark von dessen Abstand n_d zu der Anordnung der „Schweißlaser“ abhängig. Die ideale Position des defokussierten Lasers, bei dem die höchsten Nahtqualitäten erreicht werden, hängt weiterhin stark von der gewählten Vorschubgeschwindigkeit und der eingestellten Defokussierung ab.

Der Nachlauf ist bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten klein einzustellen, da die Abkühlungsrate höher ist und die Erstarrung des Nahtvolumens demzufolge schneller

abläuft. Bei zu großem Nachlauf kann die Energie des defokussierten Laserstrahls die bereits abgekühlte Naht nicht wieder aufschmelzen (siehe Bild 5.23, $n_d = 7$ mm). Die in den Querschliffen aus Bild 5.23 nachgezeichneten Linien sollen den wiederaufgeschmolzenen Bereich klarer sichtbar machen.

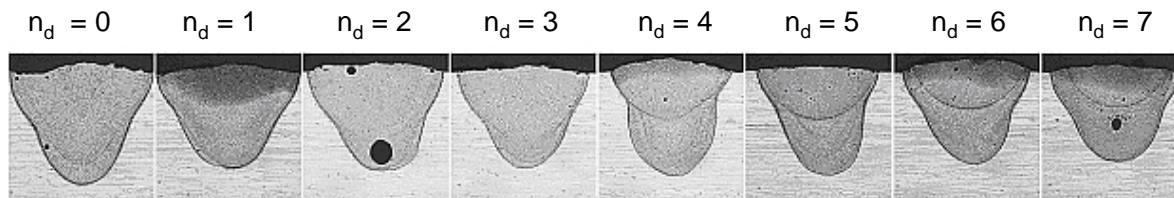


Bild 5.24: Querschliffe der mit der 0,2 mm Dreiecksanordnung bei einer Defokussierung des nachlaufenden Strahls von 7 mm und einer Vorschubgeschwindigkeit von $v = 2$ m/min erzeugten Schweißnähte.

Bei geringen Schweißgeschwindigkeiten ist die entstehende Schweißnaht breit, sodass eine Defokussierung gewählt werden muss, welche die gesamte Nahtbreite abdeckt. Aufgrund der langsameren Abkühlraten kann hier der Nachlauf größer eingestellt werden. Bild 5.24 zeigt die Querschliffe bei $v = 2$ m/min und einer Defokussierung von 7 mm. Die Bilder veranschaulichen, dass bis zu einem Nachlauf von $n_d = 5$ mm der defokussierte Laserstrahl die gesamte Nahtoberfläche wiederaufschmelzen kann, sodass eine glatte, kerbenfreie Naht erzielt werden kann.

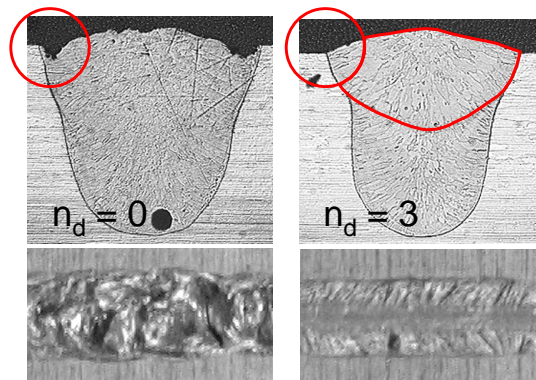


Bild 5.25: Schlechte ($n_d = 0$ mm, links) und gute Qualität der Schweißnaht ($n_d = 3$ mm, rechts) bei der 0,2 mm Dreiecksanordnung und einer Defokussierung des nachlaufenden Laserstrahls von $n_d = 7$ mm ($v = 5$ m/min).

Im Bild 5.25 ist das schlechteste ($n_d = 0$ mm) und das beste ($n_d = 3$ mm) erzielte Ergebnis aus der Bilderfolge in Bild 5.23 vergrößert dargestellt. Die Nahtoberfläche bei $n_d = 3$ mm weist eine gleichmäßige Oberfläche und einen sehr glatten Übergang zur Blechoberfläche auf.

Die statische und vor allem die dynamische Festigkeit einer Schweißverbindung wird durch ungleichmäßige Nahtoberrauten und schlechte Übergänge zwischen Schweißnaht und Blech (Einbrandkerben), die bei der Belastung zur Kerbwirkung führen, erheblich beeinträchtigt [101], [102]. Aufgrund des glatten Übergangs und der guten Nahtoberfläche weist die Naht in Bild 5.25 rechts deshalb bezüglich der Festigkeit sehr viel günstigere Eigenschaften als auf die linke Naht [103]. Vor allem bei dynamisch hochbeanspruchten Bauteilen [104] besitzt deshalb ein Verfahren, welches eine im Prozess integrierte Nahtglättung möglich macht, ein hohes Einsatzpotential.

5.3.2 Zentrale Drahtzufuhr

Die Zufuhr von Zusatzwerkstoff ist vor allem beim Schweißen von Aluminiumlegierungen der 6000-er Gruppe notwendig, um Heißrisse vermeiden zu können. Häufig wird jedoch Zusatzwerkstoff auch bei anderen Legierungstypen und Werkstoffen eingesetzt, um die Spaltüberbrückbarkeit oder, im Falle von Kehlnähten am Überlapp, den Füllgrad der Naht zu verbessern. In der Regel wird das Zusatzmaterial in Form von Draht dem Prozess „schleppend“, das heißt dem Laserstrahl vorlaufend, oder „stechend“, dem Laser folgend, zugeführt. Diese Anordnung führt jedoch dazu, dass bei Anwendungen, wo zwei- oder dreidimensionale Konturen zu schweißen sind, der Bearbeitungskopf stets der Schweißrichtung nachgeführt werden muss. Diese Anforderung kann in vielen Anwendungsfällen nicht oder nur unter schwierigen Bedingungen umgesetzt werden.

In diesem Kapitel wird ein Versuchsblock beschrieben, der die grundsätzliche Realisierbarkeit einer zentralen Zusatzdrahtzufuhr prüft. Diese Anordnung der Drahtzufuhr hätte bei der Prozessführung den Vorteil der *Richtungsunabhängigkeit*. Dazu wird die Stabilität des Schweißprozesses und die dabei erzielte Nahtqualität bei verschiedenen Verfahrensparametern untersucht. Zum Einsatz kam dabei die in Bild 3.15 abgebildete Fokusmatrixoptik mit zentraler Drahtzufuhr.

Da die Richtungsunabhängigkeit bei der Bearbeitung angestrebt ist, wurden die Versuche bei unterschiedlicher Orientierung der „Quadrat“ Anordnungen (siehe Bild 5.9), die hinsichtlich der Bearbeitungsrichtung symmetrisch ist, durchgeführt.

In den zuvor diskutierten Versuchen zur Fokusmatrixtechnik (Kapitel 5.1.3) hat sich gezeigt, dass Fokusabstände größer als $a = 0,4 \text{ mm}$ zu niedrigen Wirkungsgraden führen. Da der Durchmesser des verwendeten Zusatzdrahtes $1,2 \text{ mm}$ beträgt, muss der

Fokusabstand jedoch möglichst groß gewählt werden, um ein zu frühzeitiges Abschmelzen des Drahtes zu verhindern.

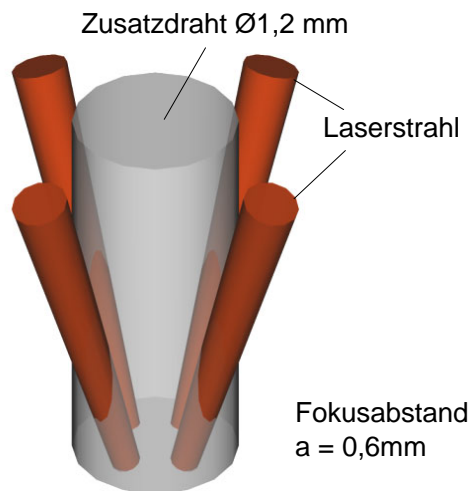


Bild 5.26: Größenverhältnis des Zusatzdrahtes und der Quadratanordnung mit $a = 0,6$ mm.

In Bild 5.26 ist das Größenverhältnis von Fokusdurchmesser ($d_f = 0,15$ mm), dem Fokusabstand ($a = 0,6$ mm) und dem Durchmesser des Zusatzdrahtes ($d_d = 1,2$ mm) dargestellt. Aus der schematischen Darstellung wird ersichtlich, dass selbst mit einem Fokusabstand $a = 0,6$ mm der zugeführte Draht schon weit oberhalb der Werkstückoberfläche vom Laserstrahl getroffen und dadurch angeschmolzen wird. Dieser Sachverhalt wird bei kleinerem Fokusabstand verschärft.



Bild 5.27: Beispiel einer Nahtoberraupe mit dazugehörigem Längsschliff der Schweißnaht mit un stetiger Tropfenbildung des Zusatzmaterials (Schweißrichtung von links nach rechts).

Der Verlauf der Einschweißtiefe bei Parametern mit Tropfenbildung kann anhand von Nahtlängsschliffe und den dazugehörigen Nahtoberraupen veranschaulicht werden (siehe Bild 5.27). Da der Draht oberhalb der Werkstückoberfläche abzuschmelzen beginnt, bildet sich zunächst ein immer größer werdender Tropfen, der die Laserstrahlen zunehmend „abschattet“. Dem Prozess steht nicht mehr die gesamte Laserenergie zur Verfügung und im gleichen Maße, wie der Tropfen an Größe zunimmt, reduziert sich die Einschweißtiefe. Erreicht der Tropfen eine bestimmte Größe, löst er sich vom Drahtende und tropft in das Schmelzbad. Außerdem kann man im Bereich der Tropfen

an der Farbe der Schmelze (durch den hohen Siliziumanteil des Zusatzdrahtes ist die erstarrte Schmelze dort heller) erkennen, dass dort fast keine Durchmischung des Grundwerkstoffs mit dem zugeführten Draht erfolgt.

Grundsätzlich können zwei Wege eingeschlagen werden, um ein unstetiges Abtropfen des Zusatzmaterials zu verhindern:

- ⇒ den Fokusabstand so weit zu vergrößern, dass der Zusatzdraht von den Laserstrahlen nicht mehr gestreift wird,
- ⇒ oder, bei kleinem Fokusabstand die Fördergeschwindigkeit des Zusatzdrahtes zu erhöhen.

Letzteres kann jedoch eine Abschattung der Laserstrahlen nicht vermeiden, was zu einer drastischen Abnahme der Einschweißtiefe führen wird.

Im Folgenden sind die erzielten Ergebnisse dargestellt, wobei die Laserleistung $4 \times 1,0 \text{ kW}$ betrug. In der Auswertung der Versuche wird für jede Schweißvorschubgeschwindigkeit eine Referenz ohne Zusatzdraht, eine Einschweißung bei einer Drahtzufuhrgeschwindigkeit, bei der gerade noch ein gutes Schweißergebnis erzielt wurde und ein aufgrund einer zu niedrigen Drahtzufuhrgeschwindigkeit schlechtes Ergebnis dargestellt. Zur Beurteilung der Einschweißungen wurden Querschliffe angefertigt, die in Bild 5.28 und Bild 5.29 jeweils neben der entsprechenden Nahtoberraupe abgebildet sind. Da durch die Unregelmäßigkeit der Einschweißung der schlechten Ergebnisse kein repräsentativer Querschnitt ausgewählt werden kann, wurden von diesen keine Querschliffe angefertigt.

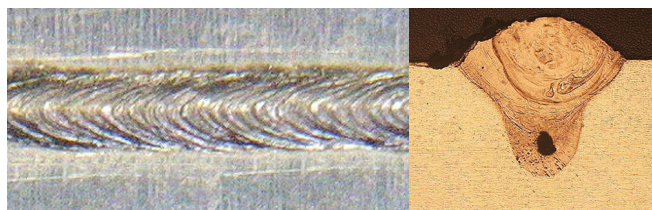


Bild 5.28: Fehlende Durchmischung bei sehr hohem Drahtvorschub und kleinem Fokusabstand ($P_L = 4 \times 1,0 \text{ kW}$, $a = 0,4 \text{ mm}$, $v = 4 \text{ m/min}$, $v_D = 5 \text{ m/min}$)

Ausgehend von einem Fokusabstand von $a = 0,4 \text{ mm}$, wo der Prozess noch relativ effizient ist und die Einschweißtiefen für eventuelle Applikationen noch ausreichend sind (siehe Abschnitt 5.1.3), wurde der Einfluss der Drahtfördergeschwindigkeit auf das Abschmelzverhalten untersucht.

Zur Erzielung guter Schweißergebnisse wurden bei $a = 0,4 \text{ mm}$ sehr hohe Drahtvorschubgeschwindigkeiten benötigt. Wie aus Bild 5.28 zu erkennen ist, wird dadurch

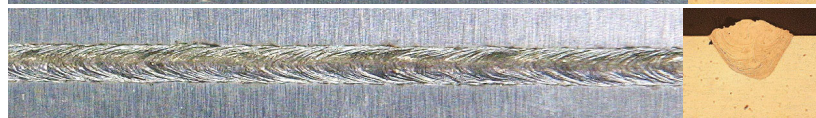
beim Schweißvorgang keine Durchmischung des aufgeschmolzenen Grundwerkstoffs mit dem zugeführten Draht erreicht. Durch die hohe Geschwindigkeit wird der Zusatzwerkstoff nach dem Aufschmelzen durch die vom Laser zugeführte Energie nur noch auf die Nahtoberraupe „aufgesetzt“. Zudem ist aufgrund der Abschattung der Laserleistung durch den Zusatzdraht die Einschweißtiefe sehr gering. Eine schleppende Anordnung des Zusatzwerkstoffes wäre zwar nicht richtungsunabhängig, würde jedoch bei korrekter Justage den Laser nicht abschatten, was zu vergleichsweise höheren Einschweißtiefen führen würde.

Bei größerem Fokusabstand konnten diesbezüglich bessere Ergebnisse erzielt werden. Die Fotos in Bild 5.29 zeigen den Einfluss der Drahtfördergeschwindigkeit auf das erzielte Schweißergebnis anhand von zwei eingestellten Schweißvorschubgeschwindigkeiten. Dabei wird ersichtlich, dass unter diesen Bedingungen ein Mindestdrahtvorschub gewählt werden muss, sodass ein Abtropfen des Zusatzmaterials vermieden werden kann. Ein zu hohes v_D führt analog zu der in Bild 5.28 gezeigten Schweißnaht zu einer „aufgesetzten“ Nahtoberraupe und fehlender Durchmischung des Zusatzmaterials mit dem Grundwerkstoff.

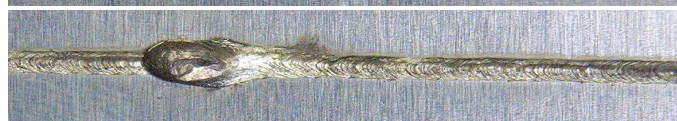
$v = 6,0 \text{ m/min}$
--- ohne Draht



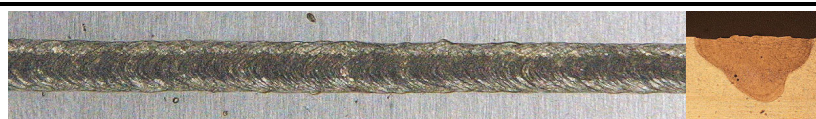
$v = 6,0 \text{ m/min}$
 $v_D = 4,0 \text{ m/min}$



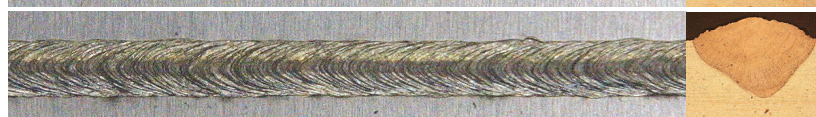
$v = 6,0 \text{ m/min}$
 $v_D = 4,5 \text{ m/min}$



$v = 3,0 \text{ m/min}$
--- ohne Draht



$v = 3,0 \text{ m/min}$
 $v_D = 3,5 \text{ m/min}$



$v = 3,0 \text{ m/min}$
 $v_D = 3,0 \text{ m/min}$



Bild 5.29: Einfluss der Drahtfördergeschwindigkeiten auf das Schweißergebnis bei Fokusabstand $a = 0,6 \text{ mm}$, gezeigt bei zwei Schweißgeschwindigkeiten $v = 6,0 \text{ m/min}$ und $v = 3,0 \text{ m/min}$ ($P_L = 4 \times 1,0 \text{ kW}$).

Alle Ergebnisse dieser Versuchsreihen zeigen, dass die minimal mögliche Drahtvorschubgeschwindigkeit, bei der gerade noch gute Schweißergebnisse erzielt werden,

unabhängig von der Vorschubgeschwindigkeit des Schweißprozesses ist. Bei konstanter Laserleistung und festem Drahtdurchmesser ist sie lediglich eine Funktion des Fokusabstandes. Bei den 0,6 mm-Anordnungen liegt diese Grenze bei ca. 3,5 – 4 m/min, bei den 0,4 mm-Anordnungen bei ca. 4,5 – 5 m/min.

Eine zentrale Drahtzufuhr ist diesen Untersuchungen zufolge möglich und kann bei speziell eingestellten Bedingungen zu sehr guten, regelmäßigen Schweißnähten – mit aufgrund der „Abschattung“ sehr niedrigen Einschweißtiefe – führen. Allerdings wird auch die zur Zeit noch sehr niedrige Leistung der Scheibenlaser sehr deutlich. Ein höheres Leistungsniveau könnte dazu führen, dass der Fokusabstand dem Drahtdurchmesser besser angepasst werden kann. Außerdem kann bei einer höheren Einzelleistung der Laserstrahlen eine Dreifachanordnung – beispielsweise in Form eines gleichmäßigen Dreiecks – zur Richtungsunabhängigkeit des Schweißprozesses mit Zusatzwerkstoff führen.

5.4 Weiteres Einsatzpotential von Scheibenlaser und Multifokustechnik

Laserstrahlquellen höchster Fokussierbarkeit können über die im Rahmen dieser Arbeit schwerpunktmäßig untersuchten Aufgaben hinaus in sehr vielfältiger Weise eingesetzt werden. Weiterführende Arbeiten am Institut für Strahlwerkzeug haben gezeigt, dass die hohe Fokussierbarkeit des diodengepumpten Scheibenlasers dem Werkzeug Laser neue Aufgaben erschließen kann.

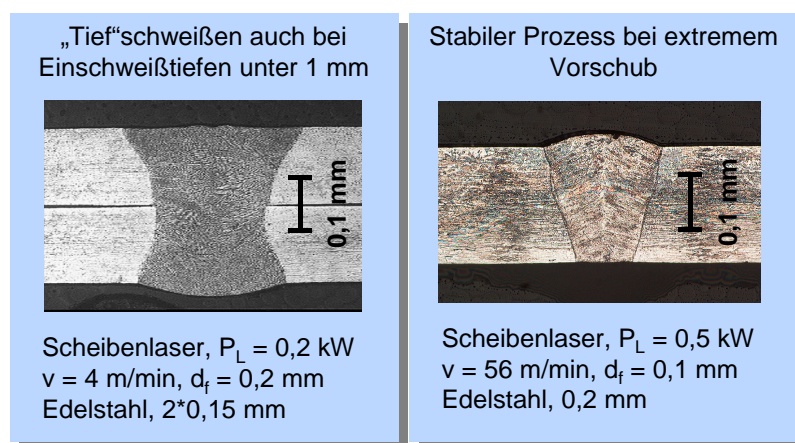


Bild 5.30: Beispiele für vorteilhafte Anwendung stark fokussierbarer Laserstrahlen [88].

Das prozesssichere Schweißen dünnster Stahlbleche mit Vorschubgeschwindigkeiten von bis zu 56 m/min (siehe Bild 5.30) [88], [90], [64] und das Scannerschweißen [105], [106], [107] sind nur zwei der interessantesten Beispiele hierfür.

5.4.1 Die simultane Vielpunkttechnik

Der Einsatz der Fokusbrixtechnik – im weitesten Sinne – mit dem Scheibenlaser bietet darüber hinaus weitere Ansatzpunkte, welche die Flexibilität dieser Technologie hervorhebt. Starke Fokussierung erlaubt schlanke Nähte. Mit kleiner werdendem Fokussdurchmesser wird jedoch auch das maximal überbrückbare Spaltmaß geringer. Insbesondere beim Schweißen von Stumpfstoßen sind deshalb die Genauigkeitsansprüche an die Spanntechnik sehr hoch.

Die wohl bekanntesten Beispiele für Anwendungen mit hohen Anforderungen an den Schlankheitsgrad der Naht sind im Getriebebau zu finden. Hier, aber auch zum Beispiel bei Anwendungen im Flugzeugbau und beim Rohrschweißen, kann die erforderliche Lage- und Fügetoleranz eingehalten und das Potential, das sich durch starke Fokussierbarkeit ergibt, voll ausgenutzt werden. Durch Entwicklung gut fokussierbarer CO₂-Laser konnte das Getriebeschweißen für die Lasertechnik gewonnen werden. Allerdings ist man nun beim CO₂- Laser sehr nahe an die nicht zu überschreitende physikalische Grenze der maximal erreichbaren Strahlqualität gelangt. Bei YAG- Lasern liegt diese Grenze aufgrund der kürzeren Wellenlänge zehnfach höher [86]. Tatsächlich erreicht wurde bisher im Kilowattbereich selbst mit Scheibenlasern nur ein Zwanzigstel des Maximalwerts.

Da der Nahtaspekt (Verhältnis Tiefe zu Breite der Naht) mit der Fokussierbarkeit anwächst [108], wird das Schweißen von Getriebeteilen dem Scheibenlaser in Zukunft weitere Anwendungen eröffnen. Dabei spielt auch der geringere Energieeintrag, der beim Schweißen mit besserer Fokussierbarkeit umgesetzt werden kann (siehe auch Abschnitt 5.1.1), eine wesentliche Rolle. Insbesondere rotierende Wellen und Naben erfordern beste Rundlaufeigenschaften, die derzeit beim Schweißen nur durch eine nachgeschaltete mechanischen Bearbeitung (Richten, Drehen oder Schleifen) zu erzielen sind. Hauptursache des Verzugs ist die beim umlaufenden Schweißen unsymmetrisch in das Bauteil eingebrachte Energie. Die daraus resultierenden Verzüge führen dann zu einer Unwucht. Gelingt es nun, mittels mindestens drei simultan in Umfangsrichtung schweißender Laserstrahlen derartige rotationssymmetrische Bauteile zu verschweißen, so erzielt man eine über den Umfang symmetrische Verteilung der laserinduzierten Spannungen und Wärmeverzüge.

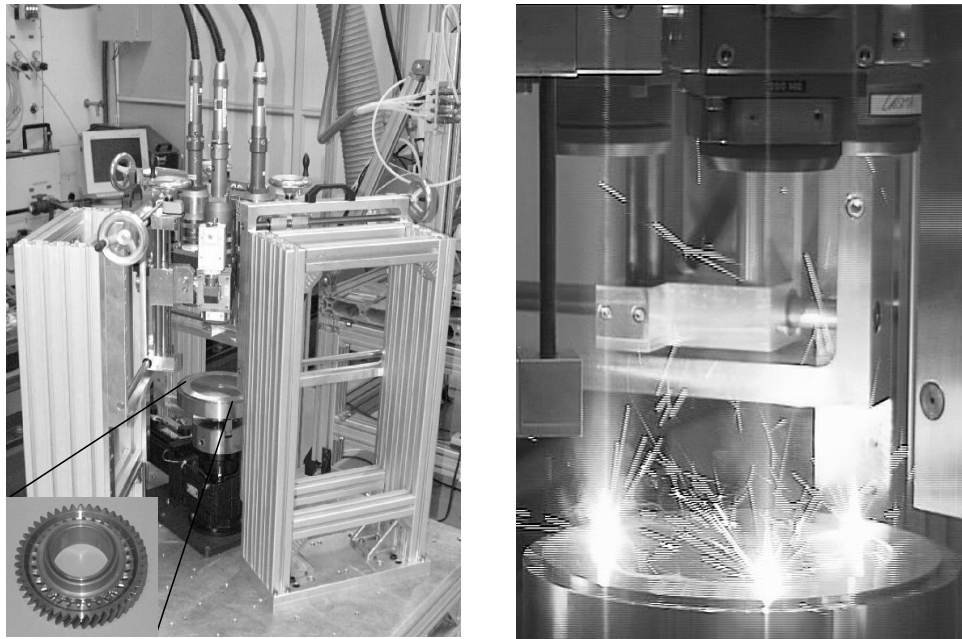


Bild 5.31: Vielpunktanlage zum Schweißen rotationssymmetrischer Bauteile (li) im Einsatz mit drei Scheibenlaser und 3 x 1,0 kW (re).

In enger Zusammenarbeit mit einem Industriepartner [109] wurde hierzu eine variable Versuchseinrichtung aufgebaut. Dabei wurden drei in allen Richtungen verstellbare Bearbeitungsoptiken so angeordnet, dass je nach Anforderung mit einem, zwei, oder drei Laserstrahlen unter verschieden einstellbaren Winkeln geschweißt werden kann (siehe Bild 5.31). Das Bauteil wird mit einer hochgenauen Rotationsachse unter den Laserstrahlen hinweg rotiert. Eine speziell entwickelte Ansteuerung sorgt dabei dafür, dass die Laser gleichzeitig ein- und ausgeschaltet werden und dass Leistungsrampen sowie Bahngeschwindigkeit präzise programmiert werden können. An Versuchsträgern konnte bereits gezeigt werden, dass sich die symmetrische Energieeinbringung in einer deutlichen Verbesserung der Rund- und Planlaufeigenschaften widerspiegelt.

Eine abschließende Bewertung des Verfahrenspotenzials ist derzeit nicht möglich, da die maximal verfügbare Strahlleistung von 1,5 kW am Werkstück nicht ausreichend ist, um die geforderten Einschweißiefen mit hinreichend hoher Bearbeitungsgeschwindigkeit zu erzielen. Höhere Ausgangsleistungen der Scheibenlaser sind für derart anspruchsvolle Schweißanwendungen zwingend notwendig.

5.4.2 Schweißen von beschichteten Stahlblechen

Beim Laserstrahlschweißen von Stahl treten, im Gegensatz zu Aluminium, selten Qualitätsprobleme auf. Höhere Gehalte an Kohlenstoff sind problematisch, da aufgrund

der hohen Ertsarrungsgeschwindigkeiten eine Aufhärtung in der Schweißnaht stattfindet, wobei Erstarrungsrisse entstehen können.

Sehr problematisch ist jedoch das Überlappschweißen von zinkbeschichteten Stahlblechen. Heutzutage werden aus Korrosionsgründen im Stahl-Karosseriebau fast ausschließlich verzinkte Feinbleche eingesetzt. Die Verdampfungstemperatur der Zinkbeschichtung (ca. 907 °C) liegt deutlich niedriger als die Schmelztemperatur des Stahles (1530 °C). Beim Schweißprozess wird dadurch im Bereich der Schweißnaht und in den wärmebeeinflussten Bereichen, die über die Verdampfungstemperatur des Zinks erhitzt werden, die Zinkbeschichtung verdampft. Durch die explosionsartige Volumenzunahme des verdampfenden Zinks entsteht ein sehr unruhiger Prozess und damit eine durch Schmelzbadauswürfe und Poren deutlich reduzierte Nahtqualität (siehe Bild 5.32).

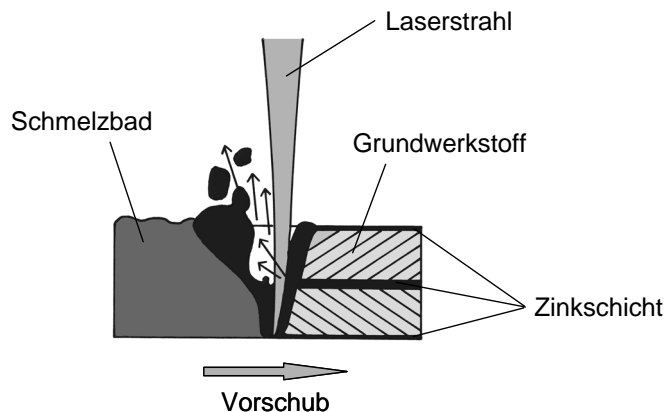


Bild 5.32: Überlappschweißen beschichteter Bleche. Durch Austritt des verdampfenden Zinks entstehen Schweißnahtfehler.

Während die Zinkschicht auf der oberen und unteren Seite des Überlappstoßes den Schweißprozess nur geringfügig beeinflussen (der Zinkdampf kann ungehindert verdampfen) führt die Beschichtung in der Fügeebene zu erheblichen Qualitätseinbußen. Der in der Zwischenlage gebildete, nach der Verdampfung unter hohem Druck stehende Zinkdampf entweicht explosionsartig durch die Kapillare bzw. das aufgeschmolzene Material. Bei diesem unkontrollierten Austritt werden große Mengen an Material aus dem Schmelzbad ausgeworfen. Da die Zeit bis zum Verschluss der Kapillaröffnung nicht für einen vollständigen Austritt des Zinkdampfes ausreicht, entstehen in der erstarrenden Schmelze zusätzlich zu den Löchern auch Poren. In Bereichen der Wärmeeinflusszone, die durch Wärmeleitung erst verzögert die Verdampfungstemperatur des Zinks erreicht, kann auch nach Verschluss der Kapillaröffnung noch Zinkdampf entstehen. Durch das seitliche Einströmen dieses Dampfes in die Schmelze können im Bereich des Stoßes der Bleche große Blasen entstehen.

Eine in der industriellen Praxis sehr häufig angewendete Strategie, einen Druckaufbau des in der Zwischenlage entstehenden Zinkdampfs und den dadurch auftretenden explosionsartigen Austritt zu verhindern, besteht in der künstlichen Erzeugung eines Spaltes [110], [111]. Dieser durch Distanzstücke oder mechanische Einprägungen erzeugte Spalt ermöglicht das seitliche Abströmen des zwischen den Blechen verdampfenden Zinks, wodurch ein ruhigerer Prozess und gute Nahtqualitäten erreicht werden können.

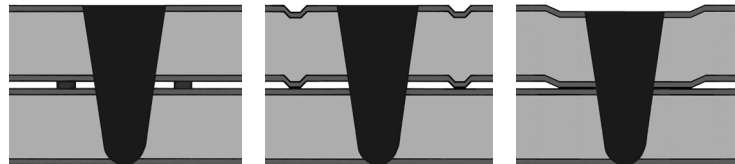


Bild 5.33: Künstlich erzeugte Entgasungsspalte durch eingebrachte Distanzstücke oder Einprägungen [110].

Die für die Erzeugung einer qualitativ guten Naht notwendige Spaltweite hängt dabei von der Blechdicke, von der Beschichtungsstärke und -art, der Laserleistung, dem Strahldurchmesser und der Vorschubgeschwindigkeit ab. Übliche Spaltweiten liegen im Bereich von ca. 0,1 bis 0,2 mm. Nachteilig ist bei diesem Verfahren der hohe Aufwand für die Erzeugung eines über die Schweißstrecke konstanten Spaltes und der dazu benötigte zusätzliche Arbeitsgang. Darüber hinaus ist beim Überlappschweißen ein Spalt normalerweise unerwünscht, da durch diesen die Festigkeit der Schweißnaht reduziert wird.

Im folgenden Abschnitt sollen Strategien zum Schweißen von verzinkten Blechen diskutiert werden, welche sich aufgrund der Vorteile des Scheibenlasers ergeben.

Schweißen bei hoher Vorschubgeschwindigkeit

Der einfachste Weg eine Verbesserung der Schweißnahtqualität zu erreichen könnte das *Schweißen bei sehr hohen Vorschüben* sein. Durch den Einsatz von Laserstrahlquellen höchster Fokussierbarkeit kann die Wärmeeinbringung in das Bauteil (siehe Abschnitt 5.1.1, [88], [90] und [86]), und damit die Menge des verdampfenden Zinks, reduziert werden. Wird die höhere Fokussierbarkeit in eine Steigerung der Schweißgeschwindigkeit umgesetzt, kann der wärmebeeinflusste Bereich reduziert werden. Es verdampft demnach lediglich die Zinkschicht, die unmittelbar von der Schweißnahtbreite erfasst wird. Sollten mit diesen Einstellungen die Anbindebreite in der Fügeebene den Festigkeitsanforderungen nicht genügen, so können beispielsweise zwei Nähte in unmittelbarer Nähe zueinander geschweißt werden (siehe Bild 5.34).

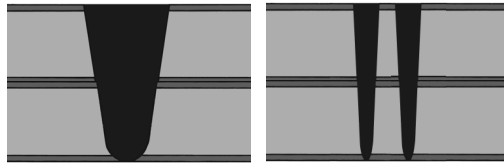


Bild 5.34: Reduzierung der wärmebeeinflussten Zone – und damit der verdampfenden Zinkbeschichtung – durch den Einsatz des Scheibenlasers beim Schweißen mit sehr hoher Vorschubgeschwindigkeit. Notwendiger Anbindequerschnitt wird durch mehrere nebeneinander angeordnete Nähte generiert.

Der Erfolg dieses Ansatzes konnte leider im Rahmen dieser Arbeit nicht nachgewiesen werden, da die maximale Ausgangsleistung des Scheibenlasers auf 1,5 kW begrenzt war. Damit sind beim Schweißen von Karosserieblechen, mit typischerweise 2 x 0,8 mm Blechstärke nur 3 – 4 m/min Vorschub in Durchschweißung zu realisieren. Um eine minimale Wärmebelastung des Bauteiles und minimale Verdampfung der Zinkschicht zu erreichen, ist diese Geschwindigkeit jedoch zu gering. Durch den Einsatz eines Scheibenlasers mit einer Leistung von beispielsweise $P_L = 4,0 \text{ kW}$ sind in diesem Blechdickenbereich Schweißgeschwindigkeiten von bis zu $v = 15 \text{ m/min}$ zu erwarten. Es ist demnach zu prüfen, ob bei diesen hohen Vorschubgeschwindigkeiten die Wärmebelastung des Bauteils so gering ist, dass die Menge des verdampfenden Zinks nicht mehr ausreicht, um die Schweißnahtqualität herabzusetzen.

Doppelfokus mit Scheibenlaser

In den folgenden Versuchsreihen wurde geprüft, ob mit der *Doppelfokustechnik* mit dem Scheibenlaser eine Stabilisierung des Prozesses herbeizuführen ist. Durch den Einsatz der Scheibenlaser soll zum Einen der Wärmeeintrag und damit die Menge des verdampfenden Zinks, reduziert werden zum Anderen wurde versucht, durch die Formung der Kapillare, einen „kontrollierten“ Austritt des Zinkdampfes, und dadurch einen stabileren Prozess, zu erreichen (siehe Skizzen in Bild 5.35).

Die ersten Schweißergebnisse mit den 1,5 kW Scheibenlasern zeigen zwar eine Verbesserung des Schweißergebnisses, die Aufweitung der Kapillare bzw. die Formung der Dampfkapillare alleine konnte jedoch keine poren- und auswurffreie Schweißnähte erzeugen.

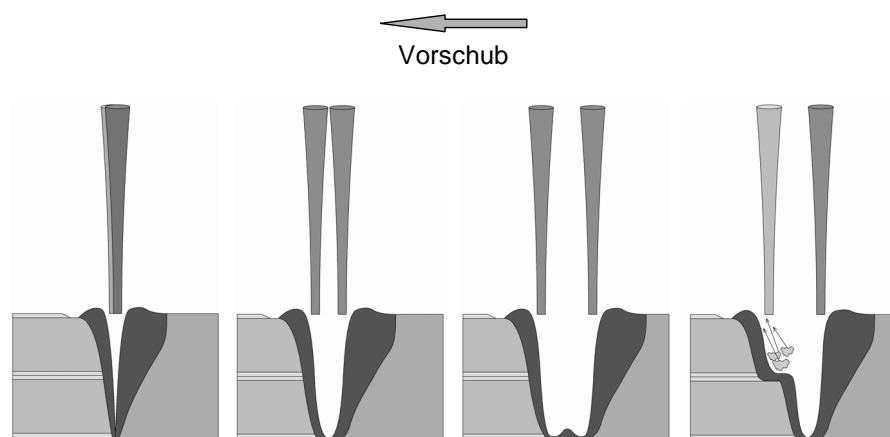


Bild 5.35: Einsatz der Doppelfokusoptik beim Schweißen verzinkter Stahlbleche. Aufweitung und Formung der Dampfkapillare mit dem Ziel einer besseren Entweichung des Zinkdampfes.

Außer dem stufenlos verstellbaren Fokusabstand und der Möglichkeit, die Laserleistung unabhängig voneinander zu variieren, ist es mit Hilfe der Doppelfokusoptik möglich, den Fokusbereich auf dem Werkstück zu verändern. Die Defokussierung kann durch Verstellung der Kollimation der Doppelfokusoptik umgesetzt werden. Dadurch wird der auf dem Werkstück abgebildete Spot von 0,15 mm auf ca. 0,45 mm vergrößert.

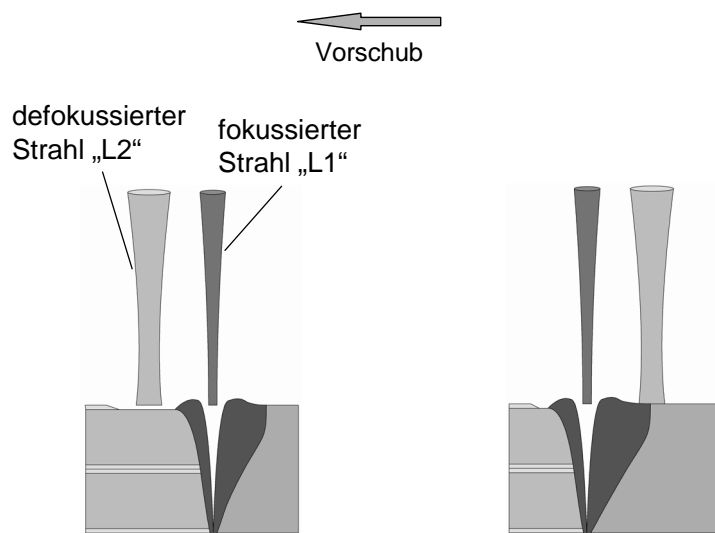


Bild 5.36: Schweißen von beschichteten Blechen mit der Doppelfokusoptik. Anordnung des defokussierten Strahls im Vorlauf (li) und im Nachlauf(re).

Durch einen vorlaufenden, defokussierten Laserstrahl wird versucht, die Zinkbeschichtung im Vorlauf zu verdampfen (Bild 5.36). Da jedoch durch den defokussierten Strahl lediglich die Beschichtung auf der Oberseite der Bleche entfernt werden kann, führt diese Einstellung zu keinen wesentlichen Verbesserungen. Für das Verdampfen der Beschichtungen der Zwischenlage, durch welche die Probleme beim Schweißen

verzinkter Bleche hauptsächlich verursacht werden, ist die Intensität des defokussierten Strahls und die zur Verfügung stehende Einwirkzeit zu gering. Bei den ersten Stichversuchen konnte die in Bild 5.36 rechts gezeigte Anordnung die besten Ergebnisse liefern. Dabei war der hintere Laserstrahl um 8 mm defokussiert und dem eigentlichen Schweißprozess weit nachlaufend angeordnet. Somit konnte dieser Laserstrahl nicht zur Ausbildung der Schweißnaht beitragen, sondern die Nahtoberraupe lediglich wiederaufschmelzen und damit glätten.

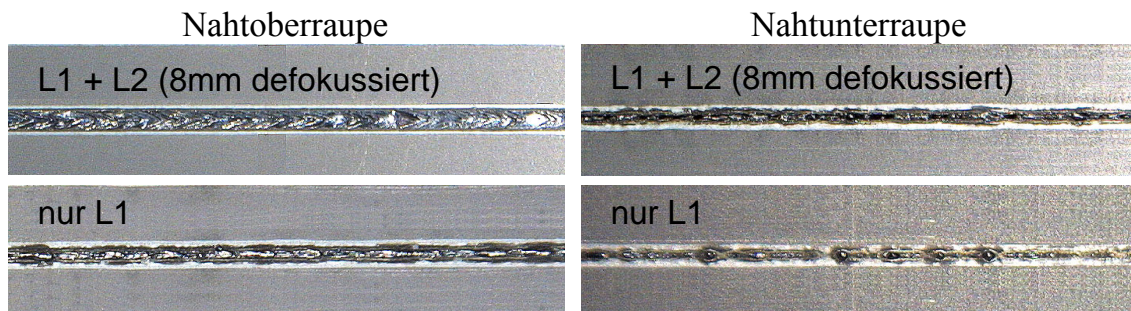


Bild 5.37: Nahtober- und Nahtunterraupen beim Schweißen mit 8 mm defokussiertem Laserstrahl im Nachlauf. Referenz ohne nachlaufenden Laser (Reihe unten).

Weitere Versuche müssen jedoch zeigen, ob diese Verfahrensvarianten den erwünschten Erfolg in jeder Hinsicht bringen. Die noch anstehenden genauen Analysen solcher Schweißversuche bezüglich Poren, statischer und dynamischer Festigkeit bringen erst eine endgültige Aussage über das Potential solcher Schweißverfahren. Auch müssen diese Ansätze mit Scheibenlaser höherer Ausgangsleistung überprüft werden. Jedenfalls haben die in diesem Abschnitt diskutierten Verfahren das weite Einsatzpotential der Laserstrahlquellen mit bester Fokussierbarkeit zumindest andeuten können. Die prozesstechnischen Vorteile dieser Strahlquellen, aber auch die Vorteile hinsichtlich Systemtechnik, und die vielen Kombinationsmöglichkeiten, die sich daraus ergeben, lassen diese Laser für fast alle Anwendungen als geeignet erscheinen.

5.5 Synopsis

Der Einsatz von *Laserstrahlquellen höchster Strahlqualität* bietet Vorteile in vielerlei Hinsicht:

- ⇒ Eine Steigerung der Fokussierbarkeit lässt sich in eine Verschlankeung der optischen Komponenten umsetzen.
- ⇒ Die bessere Fokussierbarkeit des Scheibenlasers kann auch in eine Vergrößerung des Arbeitsabstandes umgesetzt werden. Eine bessere Zugänglichkeit

und geringere Verschmutzung der Optik durch Schmauch und Spritzer sind die Konsequenz.

- ⇒ Die hohe Strahlqualität erlaubt die Verwendung von Glasfasern mit einem Faserkerndurchmesser von nur 150 μm . Das wiederum ermöglicht einen Fokusbereich von lediglich 75 μm auf der Werkstückoberfläche.

Kleine Fokusbereich haben *positive Auswirkungen* auf den Schweißprozess:

- ⇒ Die Schwelle zum Tiefschweißen wird durch kleinere Fokusbereich herabgesetzt. Stabiles Dampfkapillaren-Schweißen von Aluminium ist mit dem Scheibenlaser schon ab 450 W möglich.
- ⇒ Bei geforderter Einschweißtiefe wird dadurch der Wärmeeintrag vermindert, der Bauteilverzug minimiert.
- ⇒ Oberhalb der Schwelle wird die Einschweißtiefe beim Schweißen von Aluminium im Wesentlichen von der Laserleistung bestimmt. Ein kleiner Fokusbereich hat zwar positiven Einfluss, jedoch weit weniger stark – zumindest bei den hier untersuchten Geschwindigkeiten – als die Leistung.

In vielen Untersuchungen wird die bessere Fokussierbarkeit auch mit einer verbesserten *Schweißnahtqualität* in Verbindung gebracht. Dies wird zum einen auf die höhere Leistungsdichte und der damit verbundenen Verdampfungsrate zurückgeführt, andererseits kann mit kleinem Fokusbereich „schneller“ geschweißt werden, was zu einem stabileren Prozess führt. Die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit haben folgende Ergebnisse geliefert:

- ⇒ Die Versuche mit dem lampengepumpten Nd:YAG-Laser zeigen, dass bei gegebenem Fokusbereich eine Erhöhung der Laserleistung zu einer Reduzierung der Poren führt. Dies kann sowohl auf die erhöhte Verdampfungsrate als auch auf die Tatsache zurückgeführt werden, dass mit der höheren Leistung die geforderte Einschweißtiefe bei höheren Geschwindigkeiten erreicht werden kann.
- ⇒ Die Schweißergebnisse mit dem 1,5 kW Scheibenlaser bei einem Fokusbereich von $d_f = 0,075$ mm weisen im Vergleich zu $d_f = 0,3$ und $d_f = 0,45$ mm (Nd:YAG Stablaser) bei vergleichbarer Einschweißtiefe t die höchste Porenzahl auf.

- ⇒ Die Frage, ob beim Schweißen mit $d_f = 0,075$ mm bei einem höheren Leistungsniveau die Porenzahl – analog den Ergebnissen mit dem Nd:YAG-Laser – deutlich reduziert werden kann, ist noch offen. Es ist jedoch zu erwarten, dass dies so sein wird.

Die Versuche mit der *Doppelfokustechnik und dem Scheibenlaser* haben zum einen gezeigt wie eine effiziente Leistungssteigerung zu realisieren ist, zum anderen wie das Kapillarverhalten dabei ist und wo die qualitativ besten Ergebnisse zu erwarten sind.

- ⇒ Eine Leistungsaddition mit der Doppelfokustechnik ist nur bei kleinen Fokusabständen effizient.
- ⇒ Die Dampfkapillare verhält sich ähnlich wie beim Schweißen mit dem lampengepumpten Laser. Die Trennung in zwei separate Dampfkapillaren erfolgt jedoch bei kleineren Fokusabständen.

Die *Fokusmatrix*- Untersuchungen mit drei beziehungsweise vier Laserstrahlen bestätigen die oben zusammengefassten Erkenntnisse.

- ⇒ Ein hoher Prozesswirkungsgrad ist nur bei Fokusabständen von $a < 0,4$ mm zu erreichen.
- ⇒ Die Dreiecksanordnung beziehungsweise die Quadratanordnung ist deutlich effizienter als die entsprechende Längs- und Queranordnung bei vergleichbarem Fokusabstand.
- ⇒ Die Quadratanordnung ist relativ zum Vorschub richtungsunabhängig.

Setzt man die Steigerung der Fokussierbarkeit in eine entsprechende Reduzierung der verwendeten Faserkerndurchmesser um, so lässt sich eine Mehrfachfaser aufbauen, deren Gesamtdurchmesser dem einer einzelnen Faser entspricht.

Der Vergleich von Ergebnissen mit der Fokusmatrix bei $4 \times 1,0$ kW (Yb:YAG- Scheibenlaser) mit jenen der Einzelfokustechnik und der Doppelfokustechnik (beides mit lampengepumpten Nd:YAG- Lasern und einer Gesamtleistung von 4,0 kW) hat die Vorteile dieser Verfahrensvariante gezeigt.

- ⇒ Unter gleichen Bedingungen zeigt die Fokusmatrixtechnik nahezu die gleichen Einschweißiefen wie die Einzelfokustechnik. Im Vergleich zu der Doppelfokustechnik sind die Einschweißiefen deutlich höher.

- ⇒ Eine Gegenüberstellung bei gleicher Einschweißtiefe macht die Vorteile der Fokusbrixtechnik deutlich: sie vereint gleichzeitig hohe Effizienz und hohe Nahtqualität. Bei gleicher Vorschubgeschwindigkeit und Tiefe können mit der Fokusbrix Nähte mit niedriger Porosität und ohne Auswürfe geschweißt werden.
- ⇒ Dies gilt für die Aluminiumlegierungen der 5000-er wie auch der 6000-er Gruppe und kann durch die besondere Leistungsdichtevertelung im oberen Bereich der Dampfkapillare erklärt werden.

Die hohe Effizienz der Fokusbrixtechnik mit dem Scheibenlaser bringt auch Vorteile beim Schweißen von *Aluminiumdruckguss*.

- ⇒ Ein effizienter Schweißprozess führt dazu, dass die geforderte Schweißnahttiefe bei hohem Vorschub erzielt werden. Dies hat zur Folge, dass im Vergleich zu einem ineffizienten Fügeprozess weniger Gussmaterial aufgeschmolzen wird, was zu einer reduzierten Wasserstoffporosität führt. Auch haben die Bläschen wegen der schnelleren Erstarrung des aufgeschmolzenen Nahtvolumens weniger Zeit zu wachsen.
- ⇒ Eine zweite Art von Poren wurde beim Überlappschweißen von Druckgussbauteilen in der Fügeebene festgestellt. Diese von Verunreinigungen in der Gusshaut, aber auch von im Spalt befindlicher Luft verursachte Porenart kann ebenfalls beim Schweißen mit hoher Geschwindigkeit reduziert werden. Dabei sind die Nähte, welche mit der Fokusbrix erzeugt wurden, im Gegensatz zur Einzelfokustechnik sehr regelmäßig und frei von Auswürfen.

Die gute Strahlqualität führt dazu, dass Bearbeitungsoptiken in ihren Baugrößen reduziert werden können. Diese Optiken ermöglichen den Bau von Bearbeitungsköpfen, die eine sehr flexible Kombination von mehreren Optiken erlaubt. Die am IFSW gebaute Fokusbrixoptik zeigt einige Einsatzmöglichkeiten auf:

- ⇒ Durch die Variation der Fokusanordnung und die Möglichkeit, die Fokuslage einzelner Laser zu verstellen, kann die Intensitätsverteilung dem Prozess derart angepasst werden, dass Schweißen und *Nahtglättung* in einem Arbeitsgang durchgeführt werden kann.
- ⇒ Je nach Schweißgeschwindigkeit muss die Position des nachlaufenden Laserstrahls angepasst werden. Bei geringem Vorschub muss dieser weiter defokussiert werden, um eine Abdeckung der gesamten Nahtoberraupe zu ge-

währleisten. Der Nachlauf kann dabei aufgrund der langsameren Abkühlung größer eingestellt werden.

- ⇒ Bei hohen Vorschüben muss der Nachlauf des defokussierten Laserstrahls kleiner sein, während die Fokusslage entsprechend der Nahtbreite angepasst wird.

Aufgrund der relativ zum Vorschub unabhängigen Anordnung der Laserstrahlen kann die Fokusmatrix beim Schweißen von nichtlinearen Konturen eingesetzt werden. Außerdem bietet diese Anordnung der Einzeloptiken die Möglichkeit einer *zentralen Drahtzufuhr*. Beides zusammen führt dazu, dass eine Umorientierung des Schweißkopfes während dem Prozess nicht notwendig ist.

- ⇒ Die Realisierbarkeit der zentralen Drahtzufuhr konnte im Rahmen dieser Arbeit nachgewiesen werden, die einhergehenden Schwierigkeiten wurden beschrieben.
- ⇒ Die Drahtvorschubgeschwindigkeit ist dabei dem eingestellten Fokusabstand anzupassen, sodass ein unstetiges Abtropfen des Zusatzmaterials vermieden wird.

Größere Fokusabstände liefern eine stabile Drahtzufuhr, die Effizienz des Gesamtprozesses ist bei den noch geringen Einzelleistungen der Scheibenlaser sehr niedrig. Selbst eine höhere Einzelleistung der Laserstrahlen wird – solange wesentliche Energieanteile in den Draht eingekoppelt werden – bei dieser Anordnung zu relativ geringen Einschweißtiefen führen.

6 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit war, das Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen zu untersuchen, wobei es galt, die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Parametern zu verstehen und daraus neue Strategien abzuleiten, die ein effizientes Schweißen bei bester Schweißnahtqualität liefern sollen. Vor dem Hintergrund einer potentiellen Anwendung im Automobilbau haben sich die Versuche bezüglich Werkstoff, Einschweißtiefen und Bearbeitungsgeschwindigkeiten an den dort gestellten Anforderungen orientiert.

Ausgangspunkt der Untersuchungen war das Schweißen mit der Doppelfokustechnik unter Verwendung lampengepumpter Nd:YAG-Laser. Bisherige Untersuchungen haben die Doppelfokustechnik zwar als eine sehr effiziente Möglichkeit zur Vermeidung von Prozessporen und Schmelzbadauswürfen beschrieben, aufgrund der komplexen Zusammenhänge konnten jedoch die einzelnen prozessbestimmenden Einflussgrößen nur schwer identifiziert und insbesondere ihr Einfluss auf den Prozesswirkungsgrad nicht bestimmt werden.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit haben die Funktionsmechanismen der Doppelfokustechnik beim Schweißen von Aluminiumwerkstoffen deutlich machen können. Die Versuche mit variablem Doppelfokus haben die Zusammenhänge zwischen dem eingestellten Fokusabstand und dem daraus resultierenden Schweißergebnis sowie der dabei erreichten Leistungsfähigkeit und Effizienz des Prozesses gezeigt.

Durch die Aufweitung der Kapillaröffnung ist es möglich, die Qualität der Schweißnähte deutlich zu verbessern. Bei bestimmten Fokusabständen konnten Nahtfehler fast vollständig vermieden werden. Gleichzeitig hat sich jedoch erwiesen, dass die gezielte Gestaltung der Dampfkapillare auch unmittelbare Auswirkungen auf die Effizienz des Schweißverfahrens hat. Als Folge der Aufweitung der Kapillaröffnung wird das Aspektverhältnis der Kapillare kleiner, was zu einer Reduzierung des Einkoppelgrades führt. Bei sonst gleichen Leistungsdaten nimmt mit größer werdendem Fokusabstand damit die Effizienz und die Einschweißtiefe ab. Eine Erhöhung der Schweißnahtqualität ist demzufolge mit einer Abnahme der Prozesseffizienz verbunden.

Weiterführende Untersuchungen haben außerdem gezeigt, dass es nicht möglich ist, durch eine gezielte Änderung der Energieverteilung gute Schweißnahtqualität bei gleichzeitig hohem Wirkungsgrad zu erzielen. Durch die Änderung der Leistungsverteilung konnte die Einschweißtiefe bei optimalem Fokusabstand zwar erhöht werden, die Porosität stieg jedoch mit einer von einer symmetrischen Leistungsverteilung abweichenden sehr schnell an, der Schweißprozess wurde instabil. Ebenso führte eine Änderung der Leistungsdichte als Folge einer Defokussierung nicht zu den erhofften Verbesserungen. Die Steigerung der Einschweißtiefe durch eine negative Fokuslage fiel nur sehr gering aus, während die Qualität der Schweißnaht dagegen sehr deutlich abnahm.

Die Veränderung der Fokuslage relativ zur Werkstückoberfläche brachte beim Schweißen mit der Einzelfokustechnik ebenso keine Vorteile: der Prozess blieb instabil und wurde mit steigender Defokussierung ineffizienter. Erst bei sehr stark positiver Fokuslage waren qualitativ gute Ergebnisse erzielt worden, allerdings bei sehr niedrigem Vorschub.

Weiterhin wurde analog dem Elektronenstrahlschweißen versucht, die Schweißnahtqualität durch Strahlpendeln zu verbessern. Die Ergebnisse wiesen jedoch unabhängig von der eingestellten Pendelfrequenz eine hohe Porosität auf.

Mit dem Ziel, die Vorteile der Doppelfokustechnik hinsichtlich Schweißnahtqualität zu nutzen, gleichzeitig jedoch höchste Effizienz zu gewährleisten, wurde die Fokusmatrixtechnik mit lampengepumpten Nd:YAG-Lasern untersucht. Aufgrund der großen Kapillaröffnung waren die Schweißergebnisse von hoher Qualität. Bei ähnlichem Leistungsniveau wies die Fokusmatrixtechnik jedoch wegen des niedrigen Einkoppelgrades die geringste Effizienz auf. Interessant waren die Ergebnisse, welche durch Addition von drei Nd:YAG-Lasern bei höchster Laserleistung erzielt wurden. Bei Aluminiumwerkstoffen ließen sich dabei Einschweißtiefen von bis zu 20 mm erreichen, was dem Laserstrahlschweißen sicher neue Einsatzgebiete eröffnen wird.

Im Mittelpunkt der Arbeit stand das Schweißen mit dem diodengepumpten Scheibenlaser. Betrachtet wurden dabei unterschiedlichste Verfahrensvarianten, beginnend mit nur einem Laserstrahl bis hin zum Schweißen mit gleichzeitig vier Laserstrahlen. Hierbei wurde das Potential dieser Verfahren ausgelotet und in einem Vergleich zu anderen Laserschweißtechniken geprüft und bewertet.

Der Einsatz des Scheibenlasers mit hoher Strahlqualität beim Schweißen bringt erhebliche Vorteile mit sich. Dies konnte anhand vieler Versuchsreihen bestätigt werden. So

konnte mit dem diodengepumpten Scheibenlaser unter Beibehaltung des Fokusbereichs entweder mit einer schlanken und sehr kompakten Bearbeitungsoptik geschweißt werden, oder die hohe Fokussierbarkeit des Scheibenlasers konnte in eine Vergrößerung des Arbeitsabstandes umgesetzt werden. Dieses hatte unmittelbare Vorteile was den Schutz der optischen Komponenten und die Zugänglichkeit an engen Fügestellen betraf.

Nutzt man die hohe Strahlqualität um kleinste Fokusbereich zu generieren, so hat dies positive Auswirkungen auf den Prozess. Versuche haben gezeigt, dass die Schwelle zum Tiefschweißen durch kleinere Fokusbereich herabgesetzt wird. Stabiles Dampfkapillaren-Schweißen von Aluminium ist mit dem Scheibenlaser schon ab 450 W möglich. Bei gleichem Schweißergebnis wird dadurch der Wärmeeintrag vermindert und der Bauteilverzug herabgesetzt.

Die Versuche mit dem lampengepumpten Nd:YAG-Laser haben gezeigt, dass bei gegebener Laserleistung eine Reduzierung des Fokusbereichs zu einer Reduzierung der Poren führt. Dies kann sowohl auf die erhöhte Verdampfungsrate als auch auf die Tatsache zurückgeführt werden, dass mit dem kleineren Fokusbereich die geforderte Einschweißtiefe bei höheren Geschwindigkeiten erreicht werden kann. Allerdings konnte dieser Sachverhalt für das Schweißen mit dem Scheibenlaser bei bisher kleinstem realisierten Fokusbereich nicht nachgewiesen werden. Dies lag daran, dass die Ausgangsleistung der Scheibenlaser auf 1,5 kW beschränkt war. Die Schweißgeschwindigkeiten bei festgelegter Einschweißtiefe lagen dadurch bedingt auf einem viel niedrigeren Niveau verglichen mit jenem des 4 kW-lampengepumpten Lasers.

Die ersten Untersuchungen der Fokusbereichstechnik mit dem diodengepumpten Scheibenlaser haben die Grundlagen für das Prozessverständnis und für weitere Entwicklungen geliefert. Effiziente Methoden zur Leistungsaddition und das Verhalten der Dampfkapillare als Funktion des Fokusbereichs konnten hierbei abgeleitet werden.

Der Vergleich der Fokusbereichstechnik mit der Einzelfokustechnik und der Doppelfokustechnik konnte die Vorteile dieser Verfahrensvariante hervorheben. Unter identischen Bedingungen zeigte die Fokusbereichstechnik nahezu die gleichen Einschweißtiefen wie die Einzelfokustechnik. Im Vergleich zu der Doppelfokustechnik waren die Einschweißtiefen deutlich höher. Eine Gegenüberstellung bei gleicher Einschweißtiefe hat die Vorteile der Fokusbereichstechnik verdeutlicht: sie vereint gleichzeitig hohe Effizienz und hohe Qualität der Schweißnähte. Bei gleicher Vorschubgeschwindigkeit und Tiefe konnten mit der Fokusbereichstechnik Nähte auswurffrei und mit niedriger Porosität ge-

schweißt werden. Dies gilt für die Aluminiumlegierungen der 5000-er wie auch der 6000-er Gruppe und kann mit Hilfe der besonderen Leistungsdichteverteilung im oberen Bereich der Dampfkapillare erklärt werden.

Die hohe Effizienz der Fokusmatrixtechnik mit dem Scheibenlaser hat auch Vorteile beim Schweißen von Aluminiumdruckguss gezeigt. Das Schweißen mit der Fokusmatrixtechnik hat dazu geführt, dass die geforderte Schweißnahttiefe bei hohem Vorschub erzielt wurde. Dies hatte zur Folge, dass im Vergleich zu einem ineffizienten Fügeprozess weniger Gussmaterial aufgeschmolzen wird, was zu einer reduzierten Wasserstoffporosität geführt hat.

Die hohe Flexibilität der Fokusmatrixtechnik konnte im Rahmen weiterer Untersuchungen angedeutet werden. Das Laserstrahlschweißen mit gleichzeitiger Nahtglättung hat Schweißnähte von bester Qualität liefern können: Aufgrund des glatten Übergangs und der guten Nahtoberfläche wiesen diese Nähte deshalb bezüglich der Festigkeit sehr günstige Eigenschaften auf. Vor allem bei dynamisch hochbeanspruchten Bauteilen besitzt deshalb ein Verfahren, welches eine im Prozess integrierte Nahtglättung möglich macht, ein hohes Einsatzpotential.

Des weiteren hat die Anordnung der Fokusmatrixoptik die Möglichkeit einer zentralen Drahtzufuhr eröffnet. Die ersten Untersuchungen dazu haben die Machbarkeit der zentralen Drahtzufuhr aufgezeigt und haben erste Erkenntnisse zu diesem Thema geliefert. Als Einsatzmöglichkeiten des Scheibenlasers, welche ein hohes Potential bieten, sind das Schweißen von dünnen Blechen, die simultane Vielpunkttechnik und das Schweißen beschichteter Bleche angedeutet worden.

Insgesamt konnten die Ergebnisse dieser Arbeit zu einem besseren Prozessverständnis beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen beitragen. Die umfangreichen Untersuchungen haben außerdem die sehr vielfältigen Vorteile deutlich gemacht, die durch den Einsatz des Scheibenlasers entstehen. Mit der Fokusmatrix, einer Kombination von vier Scheibenlasern, wurde ein Verfahren vorgestellt, welches effizientes Schweißen bei bester Schweißnahtqualität ermöglicht. Der Vergleich mit anderen Laserschweißtechniken ermöglicht darüber hinaus dem Anwender eine präzise Abwägung der Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahrensvarianten und erleichtert damit die Entscheidung für einen sinnvollen und in der Gesamtheit wirtschaftlichen Einsatz des Werkzeugs Laser.

7 Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] DIN 8593: Fertigungsverfahren Fügen. Fügen durch Schweißen - Einordnung / Unterteilung. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [2] HÜGEL, H.: *Strahlwerkzeug Laser: Eine Einführung*. Teubner Verlag, Stuttgart, 1992.
- [3] BECK, M.: *Modellierung des Lasertiefschweißens*. Universität Stuttgart, Dissertation, 1996. In: Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW. Stuttgart: B. G. Teubner-Verlag, 1996.
- [4] CARSLAW, H. S.; JAEGER, J. C.: *Conduction of Heat in Solids*. 2nd Edition, Oxford: Oxford University Press, 1959.
- [5] GRATZKE, U.; KAPADIA, P. D.; DOWDEN, J.: *Heat conduction in high-speed laser welding*. In: Journal of Applied Physics D., Vol. 24, 1991, S. 2125.
- [6] KLEMENS, P. G.: *Heat balance and flow conditions for electron beam and laser welding*. In: Journal of Applied Physics, Vol. 47, No. 5, 1976, S. 2165.
- [7] ARATA, Y.; MARUO, H.; MIYAMOTO, I.: *Application of laser material processing – Heat flow in laser hardening*. IIW Doc. IV-241-78, IIW Doc 212-436-78, 1978.
- [8] LANDOLT-BÖRNSTEIN: *Numerical data and functional relationships in science and technology*; New Series. Editor in Chief: W. Martienssen. Group VIII, Volume 1: Laser physics and applications. Subvolume C: Laser Applications Edited by R. Poprawe, H. Weber, G. Herzinger. Springer-Verlag, Berlin, 2004.
- [9] DAUSINGER, F.: *Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und Prozesseffektivität*. Universität Stuttgart, Habilitationsschrift 1995. Stuttgart: Teubner Verlag, 1995.

- [10] BECK, M.; DAUSINGER, F.; HÜGEL, H.: *Studie zur Energieeinkopplung beim Tiefschweißen mit Laserstrahlung*. Laser und Optoelektronik **21** (1989) Nr. 3, S. 80.
- [11] DAUSINGER, F.: *Laser-Materialbearbeitung: kostengünstiger durch Steigerung des Einkoppelgrades*. Laser- und Optoelektronik **27** (1995) Nr. 2, S. 54.
- [12] DIN 8528 Blatt 1, 06.73: *Schweißbarkeit – metallische Werkstoffe – Begriffe*.
- [13] RAPP, J.: *Laserschweißbeignung von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Leichtbau*. Universität Stuttgart, Dissertation, 1996. In: Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW. Stuttgart: B. G. Teubner-Verlag, 1996.
- [14] N. N.: ASM Handbook, 1993, S. 380.
- [15] DUDAS, J. H.; COLLINS F. R.: *Preventing weld cracks in high-strength aluminum alloys*. Welding Research Supplement 1966, S. 241.
- [16] BORLAND, J. C.: *Generalized theory of super-solidus cracking in welds (and castings)*. British Weld Journal (1960) S. 508.
- [17] PELLINI, W. S.: *Strain theory of hot tearing*. Foundry 80 (1952) S. 125.
- [18] PROKHOROF, N. N.: *Theorie und Verfahren zum Bestimmen der technologischen Festigkeit von Metallen beim Schweißen*. Schweißtechnik 18 (1968) S. 125.
- [19] SCHINZEL, C.: *Nd:YAG- Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Automobilbau*. Universität Stuttgart, Dissertation, 2002. In: Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW. München, Herbert Utz Verlag, 2002.
- [20] KAMPMANN I.: *Nd:YAG-Laserstrahlschweißen von AlMgSi- und AlMg- Legierungen mit Schweißzusatz*. In DVS-Berichte, Band **162**. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik DVS, 1990.
- [21] HUFNAGEL, W.: *Aluminium Taschenbuch*. 15. Auflage. Düsseldorf: Aluminium Verlag, 1999.

- [22] BINROTH, C.: *Beitrag zur Prozessstabilität beim CO₂-Laserstrahlschweißen von Aluminium mit Zusatzwerkstoff*. Bremen; BIAS, 1995. Universität Bremen, Strahltechnik, Dissertation, 1995 (Bericht aus dem Bremer Institut für angewandte Strahltechnik).
- [23] HEIMERDINGER, C.: *Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen für die Luftfahrt*. Universität Stuttgart, Dissertation, 2003. In: Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW. München: Herbert Utz Verlag, 2003.
- [24] HILBINGER, R. M.: *Heißrissbildung beim Schweißen von Aluminium in Blechrandlage*. Universität Bayreuth, Dissertation, 2001. München: Herbert Utz Verlag, 2001.
- [25] SCHINZEL, C.: *Laserschweißbarkeit von Aluminium-Knet/Guß-Verbindungen mit der Zweistrahltechnik für Spaceframe Anwendungen*. Universität Stuttgart, Diplomarbeit, 1995 (Inst. f. Strahlwerkzeuge: IFSW 95- 59).
- [26] GELLERT, M.: *Wasserstoffporenbildung beim Laserstrahlschweißen von Aluminium*. Naturwissenschaftliche Universität Braunschweig, Dissertation. Aachen: Shaker Verlag 1998.
- [27] AVILOV, V., V.; VICANEK, M.; SIMON, G.: *Thermal diffusion in laser beam welding of metals*. J. Phys. D: Applied Physics vol. 27 (1995) S. 2284.
- [28] THIER, H. *Ursachen der Porenbildung beim Schutzgasschweißen von Aluminium und Aluminiumlegierungen*. Schweißen und Schneiden **25** (11), 1973, S. 491.
- [29] LUTZE, P.: *Gasgehalt und Schweißneigung von Aluminiumdruckguss*. Technische Universität Braunschweig, FB Maschinenbau und Elektrotechnik, Dissertation, 1990.
- [30] NÖRENBERG, K.; RUGE, J.: *Wasserstoffporosität beim Schmelzschweißen von Aluminiumwerkstoffen, Teil II*. Aluminium **68** (1992), Nr. 5, S. 406.
- [31] VON ZENGEN, K.-H.: *Aluminium – neue Gießverfahren und Werkstoffeigenschaften*. In: Ostermann, F.: Aluminium-Werkstofftechnik für den Automobilbau. Ehningen: Expert, 1992 (Kontakt und Studium), S. 119.

- [32] SIMIDZU, H.; YOSHINO, F.; KATAYAMA, S.; MATSUNAWA, A.: *Pulsed Nd:Yag laser spot welding of aluminum alloys*. In: Proceedings of the International Conference on Laser Advanced Material Processing in Science and Application. LAMP, 1992, S. 511.
- [33] WINKLER, R.: *Porenbildung beim Laserstrahlschweißen von Aluminium-Druckguss*. Universität Stuttgart, Dissertation, 2004. In: Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW. München, Herbert Utz Verlag, 2004.
- [34] MATSUNAWA, A.; SETO, N.; KIM, J.; MIZUTANI, M.; KATAYAMA, S.: *Dynamics of keyhole and molten pool in high power CO₂ laser welding*. In: Proceedings of SPIE. Osaka, Japan: SPIE, 1999 (High-Power Lasers in Manufacturing, Bd. 3888).
- [35] TSUKAMOTO, S.; KAWAGUCHI, I.; ARKANE, G.: *Suppression of welding defects in deep penetration CO₂ laser welding*. In: Proceedings of ICALEO, San Diego, 2000, Section C, S. 7.
- [36] KATAYAMA, S.; SETO, N.; MATSUNAWA, A.: *Formation mechanism and reduction methods of porosity in laser welding of stainless steel*. In: Proceedings of ICALEO, San Diego, 1997, Section G, S. 83.
- [37] MATSUNAWA, A.; KIM, J.-D.; KATAYAMA, S.: *Porosity formation in laser welding – mechanisms and suppression methods*. In: Proceedings of ICALEO, San Diego, 1997, Section G, S. 73.
- [38] HOHENBERGER, B.: *Laserstrahlschweißen mit Nd:YAG-Doppelfokustechnik – Steigerung von Prozessstabilität, Flexibilität und verfügbarer Strahlleistung*. Universität Stuttgart, Dissertation, 2003. In: Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW. München: Herbert Utz Verlag, 2003.
- [39] KATAYAMA, S.; SETO, N.; MIZUTANI, M.; MATSUNAWA, A.: *Formation mechanism of porosity in high power YAG Laser welding*. In: Proceedings of ICALEO, San Diego, 2000, Section C, S. 16.
- [40] MÜLLER, M. G.: *Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen durch Auswertung der reflektierten Leistung*. Universität Stuttgart, Dissertation, 2002. In: Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW. München: Herbert Utz Verlag, 2002.

- [41] HOHENBERGER, B.; FAISST, F.: *Laserstrahlschweißen mit der Doppelfokustechnik -Grundlagen und industrielle Anwendung*. In: Stuttgarter Impulse: Technologien für die Zukunft, FTK 2000. Berlin: Springer-Verlag, 2000, S. 276.
- [42] BANAS, C.; DOYLE, B.: *Twin spot laser welding*. US-Patent 4691093, Sept. 1987.
- [43] BANAS, C.: *News from GET – twin spot optics for tube production*. Util's the lasers edge, 1991.
- [44] GRÜNENWALD, B.; SHEN, J.; DAUSINGER, F.; HÜGEL, H.: *Laser cladding with composit powders using pyrometric temperature control and beam combining*. In: Proceedings of the 26th International Symposium on Automotiv Technology and Automation (ISATA), Aachen, 1993. Croydon: Automotiv Automation Limited, 1993, S. 287.
- [45] GLUMANN, C.; RAPP, J.; DAUSINGER, F.; HÜGEL, H.: *Welding with a combination of two CO₂-lasers - advantages in processing and quality*. In: Proceedings of ICALEO, Orlando, 1993, Band **77**, S. 672.
- [46] GLUMANN, C.; RAPP, J.; BEA, M.; DAUSINGER, F.; HÜGEL, H.: *Combination of two high power lasers - a new dimension in laser material processing*. In: Proceedings of the 26th International Symposium on Automotiv Technology and Automation (ISATA), Aachen, 1993. Croydon: Automotiv Automation Limited, 1993, S. 239.
- [47] GLUMANN, C.: *Verbesserte Prozesssicherheit und Qualität durch Strahlkombination beim Laserschweißen*. Universität Stuttgart, Dissertation, 1996. In: Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW. Stuttgart: Teubner-Verlag, 1996.
- [48] NARIKIYO, T. et al: *YAG laser welding with combination of three oscillators*. In: Proceedings of ICALEO, San Diego, 1995, Section C, S. 139
- [49] SARADY, I.; BECK, TH.; BOSTANJOLGLO, G.; RICHTER, K. : *Aluminium welding by beam addition of cw and respectively q-switched multi kW Nd:Yag-lasers*. In: Proceedings of ICALEO, San Diego, 1997, Section G, S. 229.

- [50] DAUSINGER, F.; FAISST, F.; GLUMANN, C.; HACK, R.; IFFLÄNDER, R.: *Effiziente Strahladdition zum Laserstrahlschweißen*. In: Laser und Optoelektronik **27** (4), 1995, S. 45.
- [51] FAIBT, F.; RAPP, J.; SCHINZEL, C.; DAUSINGER, F.; HÜGEL, H.: *Prozeßsicheres Laserschweißen von Aluminiumlegierungen*. 4. Konferenz für Strahltechnik, DVS-Verlag, Halle, 1996.
- [52] DAUSINGER, F.; HACK, R.: *Multi-beam technique to increase power, flexibility and quality*. In: Proceedings of the 6th European Conference on Laser Treatment of Materials (ECLAT '96). Stuttgart: 1996, S. 19.
- [53] DAUSINGER, F.; RAPP, J.; HOHENBERGER, B.; HÜGEL, H.: *Laser beam welding of aluminum: state of the art and recent developments*. In: Proceedings of the International Body Engineering Conference (IBEC '97) on Advanced Technologies & Processes. Stuttgart, 1997, S. 38.
- [54] FABBRO, R.; CHOUF, K.: *Dynamical description of the keyhole in deep penetration laser welding*. Journal of Laser Applications, Vol. **12**, Nr. 4, 2000, S. 142.
- [55] DAUSINGER, F.; HOHENBERGER, B.; SCHINZEL, C.; CHANG, C.-L.: *Laserschweißen von Aluminiumlegierungen - Ein Angebot an den Schienenfahrzeugbau*. In: Vorträge der 3. Fachtagung Fügen und Konstruieren im Schienenfahrzeugbau - SLV Halle, 1999.
- [56] WEICK, J.; BARTEL, W.; STEINMETZ, H.: *Variable geometry of the focus spot and the advantages in production*. In: Proceedings of ICALEO, Orlando, 1996, Section E, S. 183.
- [57] IWASE, T.; SHIBATA, K.; SAKAMOTO, H.; DAUSINGER, F.; HOHENBERGER, B.; MÜLLER, M. G.; MATSUNAWA, A.; SETO, N.: *Real time X-ray observation of dual focus beam welding of aluminium alloys*. In: Proceedings of ICALEO, San Diego, 2000, Section C, S. 26.
- [58] HÜGEL, H.; SEILER, P.; WOLLERMANN-WINDGASSE, R.: *Neue Hochleistungslaser – Entwicklungstendenzen und fertigungstechnische Einsatzpotentiale*. Tagungsband FTK 2000, Springer-Verlag, Berlin, 2000, S. 63.

- [59] GIESEN, A.; VOSS, A.; WITTIG, K.; BRAUCH, U.: *Diodengepumpter Festkörperlaser*. Patentanmeldung, 1993, Patentnummer P 43 22 094.0.
- [60] VOSS, A.; BRAUCH, U.; WITTIG, K.; GIESEN, A.: *Efficient high- power diode-pumped thin- disk Yb:YAG- laser*. In: Proceedings of the 9th Meeting on Optical Engineering in Israel, Tel Aviv, 1994. Bellingham (WA): SPIE Proc. Vol. **2426**, 1995, S. 501.
- [61] STEWEN, C.: *Scheibenlaser mit Kilowatt-Dauerstrichleistung*. Universität Stuttgart, Dissertation. In: Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW. München: Herbert Utz Verlag, 2000.
- [62] GIESEN, A.; BRAUCH, U.; JOHANNSEN, I.; KARSZEWSKI, M.; STEWEN, C.; VOSS, A.: *Diode pumped thin disc high power Yb laser*. In: Conference on Lasers and Electro - Optics - Europe (Technical digest of CLEO-Europe '96), Hamburg. Piscataway (NJ), 1996, S 41.
- [63] RUß, A.: *Untersuchungen zum Nd:YAG- Zweistrahlschweißen mit variablem Fokusabstand und Strahlpendeln*. Diplomarbeit, Universität Stuttgart, Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW 00-19), 2000.
- [64] RUß, A.: *Schweißen mit dem Scheibenlaser – Potentiale der guten Fokussierbarkeit*. Universität Stuttgart. In: Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW. Dissertation in Vorbereitung.
- [65] KOCH, F.; PYZALLA, G.: *Einführung in die Technologie*. Köln-Porz: Stam, 1978.
- [66] N. N.: Aluminium Zentrale (Hrsg.): *Aluminium-Taschenbuch: Band 1 Grundlagen und Werkstoffe*. Düsseldorf: Aluminium-Verlag, 1998
- [67] N. N.: American Society for Metals: *Metals Handbook 9th Edition*. Ohio, American Society for Metals, 1978.
- [68] BUNGARDT, W.; KALLENBACH, R.: *Über den Zusammenhang der thermischen und elektrischen Leitfähigkeit bei Aluminium- und Magnesiumlegierungen*. Metal **4** (1950) S. 317, S. 365.
- [69] DECKER, I.; NÖRENBERG, K.; REHBEIN, D.-H.; RUGE, J.; WOHLFART, H.: *Laserstrahlschweißen von Aluminium und Aluminium-Druckguss*. In Tagungsband

- des Braunschweiger Kolloquiums „Schweißen von Aluminium in Forschung und Praxis“, Braunschweig, 1993, Düsseldorf: DVS, 1993, S. 121.
- [70] MAISENHÄLDER, F.; CHEN, G.; ROTH, G.: *Laserschweißen von Gussaluminium*. In: VDI Technologiezentrum Physikalische Technologien (Hrsg.). Abschlussbroschüre des Projektes „Materialbearbeitung mit CO₂- Laserstrahlen höchster Leistung“. Düsseldorf, 1994, Düsseldorf: VDI, 1994, S. 27.
- [71] WOLFAHRT, H.; DECKER, I.; NÖRENBERG, K.: *Erste Erfahrungen beim Laserschweißen von Aluminiumdruckguss*. Vortragstexte des 2. Weiterbildungsseminar „Fügen von Aluminium“, Neu-Ulm, 1992, Düsseldorf: Aluminium Zentrale, 1992.
- [72] VON ZENGEN, K. H.: *Aluminium – Neue Gießverfahren und Werkstoffeigenschaften*. Aluminium- Werkstofftechnik für den Automobilbau. Ehningen, Expert- Verlag, 1992.
- [73] GREF W.; HOHENBERGER, B.; DAUSINGER, F. HÜGEL, H.: *Energy coupling and process efficiency in double- focus welding with Nd:YAG*. In: Proceedings of ICALEO, Scottsdale, Arizona, USA, 2002, Vol **94**, S. 289.
- [74] GREF, W.; RUß, A.; LEIMSER, M.; DAUSINGER, F.; HÜGEL, H.: *Double focus technique – influence of the focal distance and intensity distribution on the welding process*. In: Proceedings of the International Congress on Laser Advanced Materials processing “LAMP 2002”, First International Symposium on High-Power Laser Macroprocessing, Osaka, Japan. Bellingham (Washington): SPIE Proc., Vol. **4831**, S. 289.
- [75] SCHULTZ, H.: *Elektronenstrahlschweißen*. Düsseldorf: DVS-Verlag, 1989 (Fachbuchreihe Schweißtechnik, Bd. **93**).
- [76] WIESNER, P.: *Technologie des Elektronenstrahlschweißens*. Berlin: VEB Verlag Technik, 1989.
- [77] HEHL, D.: *Die Beeinflussung der Aufschmelz- und Erstarrungsvorgänge beim Elektronenstrahlschweißen durch das Strahlpendeln*. Universität Stuttgart, Institut für Kernenergetik, Dissertation, 1976 (Bericht IKE 3-6).

- [78] MAYER, H.-G.; KÜRI, M.; KOEPPE, A.: *Anwendung der Elektronenstrahl-Ablenktechnik beim Fügen von Bauteilen und zur gezielten Wärmeeinbringung beim Schweißen größerer Wanddicken*. DVS-Bericht **34** (1975) S. 55.
- [79] OTTO, A.; GEISEL, M.; GEIGER, M.: *Nonlinear dynamics during laser beam welding*. In: Proceedings of ICALEO, Orlando, 1996, Section B, S. 30.
- [80] OLFERT, M.; DULEY, W.W.: *Resonant response of the keyhole with beam modulation*. In: Proceedings of ICALEO, Orlando, 1996, Section B, S. 146.
- [81] WATANABE, T.; ICHIJYO, S.; KIM, J. S.: *Suppression of cracks by means of added ultrasonic vibration and/or controlled puls-train in laser spot welding of aluminum alloys*. In: Proceedings of ICALEO, Orlando, 1998, Section F, S. 1.
- [82] CHANG, C.: *Berechnung der Schmelzbadgeometrie beim Laserstrahlschweißen mit Mehrfokustechnik*. Universität Stuttgart, Dissertation. In: Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW. München: Herbert Utz Verlag, 2000.
- [83] RAMSAYER, R.: *Experimentelle Bestimmung der Wirkungsgrade beim Nd:YAG-Zweistrahlschweißen von Aluminium und Stahl*. Studienarbeit, Universität Stuttgart, Institut für Strahlwerkzeuge, IFSW 00-15, 2003.
- [84] GREF, W.; RUß, A.; LEIMSER, M.; DAUSINGER, F.: *Multi focus technique – methods to enhance welding performance, process quality and flexibility*. In: Lasers in Manufacturing (LIM) 2003 (Proc. of the Second International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, München, 2003). Stuttgart: AT-Fachverlag, 2003, S.209.
- [85] HOHENBERGER, B.; CHANG, C.; SCHINZEL, C.; DAUSINGER, F.; HÜGEL, H.: *Laser welding with Nd:YAG-multi-beam technique*. In: Proceedings of ICALEO, San-Diego, 1999, Vol **87**, Section D, S. 167.
- [86] DAUSINGER, F.; GREF, W.: *Braucht man zum Schweißen starke Fokussierbarkeit?* Tagungsband der Stuttgarter Lasertage (SLT'01), Stuttgart, 2001. Stuttgart, 2001, S.22.

- [87] GREF, W.; RUB, A.; LEIMSER, M.; DAUSINGER, F.; HÜGEL, H.: *Thin disc laser – a new tool for welding*. In: Proceedings of „Lasers in Manufacturing“. Fellbach, AT-Fachverlag, 2001.
- [88] DAUSINGER, F. GREF, W.; RUB, A.: *Festkörperlaser zum Schweißen: Präziser Strahl schafft neue Potenziale*. Laser Magazin, 2002, Nr.4, S. 20.
- [89] RUB, A.; GREF, W.; LEIMSER, M.; DAUSINGER, F.; HÜGEL, H.: *High speed welding of metal sheets with thin disk laser*. In: Lasers in Manufacturing (LIM) 2003 (Proc. of the Second International WLT- Conference on Lasers in Manufacturing, München, 2003). Stuttgart: AT-Fachverlag, 2003, S.229.
- [90] RUB, A.: *Hochpräzises Strahlwerkzeug Scheibenlaser*. Laser Magazin, 2001, Nr. 6, S. 24.
- [91] KROOS, J.; GRATZKE, U.; SIMON, G.: *Towards a self-consistent model of the keyhole in penetration laser beam welding*. Journal of Applied Physics, Nr. 26, 1993, S. 474.
- [92] CHO, M. H.; FARSON, D.; LEE, J. Y.; YOO, C. D.: *Laser weld keyhole dynamics: simulation and experiment*. In Proceedings of the 11. Internat. Conference on Computer Technology in Welding, Columbus, USA. National Institute of Standards and Technology, Special Publication Band 973 (2002) S. 289.
- [93] FABBRO, R.; CHOUF, K.: *Keyhole behavior for deep penetration laser welding*. In: Proceedings of ICALEO, San Diego, 1999, Section D, S. 92.
- [94] SEMAK, V.V.; WEST, J.C.; HOPKINS, J.A.; MCCAY, T.D.: *Shape and position of keyhole during laser welding*. In: Proceedings of ICALEO, Orlando, 1997, S. 544.
- [95] KAPLAN, A.: *A model of deep penetration laser welding based on calculation of the keyhole profile*. Journal of Physics D: Applied Physics, 1994, Band 27, S. 1805.
- [96] GREF, W.: *Innovativer Leichtbau durch energiereduziertes Fügen mit Lasersystemen neuester Generation (LEICHTER)*. Universität Stuttgart, Abschlußbericht

- des IFSW zum gleichnamigen Verbundforschungsprojekt des BMBF (Förderkennzeichen: 13N7458), 2002.
- [97] KAPLAN, A.; MITZUTANI, M.; KATAYAMA, S.; MATSUNAVA, A.: *On the mechanism of pore formation during keyhole laser spot welding*. In: Lasers in Manufacturing (LIM) 2003 (Proc. of the Second International WLT- Conference on Lasers in Manufacturing, München, 2003). Stuttgart: AT-Fachverlag, 2003, S.186.
- [98] TSUKAMOTO, S.; KAWAGUCHI, I.; ARAKANE, G.; HONDA, H.: *Keyhole behavior in high power laser welding*. In: Lasers in Manufacturing (LIM) 2003 (Proc. of the Second International WLT- Conference on Lasers in Manufacturing, München, 2003). Stuttgart: AT-Fachverlag, 2003, S.251.
- [99] WEBERPALS, J.: *Laserstrahlschweißen von Aluminium-Druckguss – ein Vergleich der Fokusmatrix mit der Einzel- bzw. Doppelfokustechnik*. Studienarbeit, Universität Stuttgart, Institut für Strahlwerkzeuge, IFSW 03-08, 2003.
- [100] FROSCHMEIER, T.: *Fokusmatrix – höchste Flexibilität durch den Einsatz von Lasern bester Strahlqualität*. Studienarbeit, Universität Stuttgart, Institut für Strahlwerkzeuge, IFSW 03-11, 2003.
- [101] NORM PREN ISO 13919-2: 1999: *Schweißen – Elektronen- und Laserstrahl-Schweißverbindungen – Richtlinie für Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten – Teil 2: Aluminium und seine schweißgeeigneten Legierungen*.
- [102] PROKHOROV, N. N.: *Theorie und Verfahren zum Bestimmen der technologischen Festigkeit von Metallen beim Schweißen*. Schweißtechnik **18** (1968), Nr.1, S. 8.
- [103] MATTHES, K.-J.; LÜBECK, K.-H.; LANZENDÖRFER, G.: *Einfluss von Unregelmäßigkeiten (Imperfektionen) der Stumpfnäht auf das Schwingfestigkeitsverhalten schmelzgeschweißter Aluminium-Dünnblech-Verbindungen ($t < 3\text{mm}$)*. In: Deutscher Verband für Schweißtechnik (Hrsg.): Schweißkonstruktionen 1997 (DVS-Berichte, Bd. **187**). Braunschweig: DVS-Verlag, 1997, S. 74.
- [104] MÜLLER-HUMMEL, P.; LANG, R.; FRESTL, S.: *Einsatz der Doppelfokustechnik beim Laserstrahlschweißen von Flugzeugstrukturkomponenten*. Tagungsband der Stuttgarter Lasertage (SLT'01), Stuttgart, 2001, S. 27.

- [105] DEBSCHÜTZ, K.; BECKER, W.; BERNHARDT, R.; MANN, K.: *New laser application potential through robot-guided remote laser welding*. In: 3th European Conference and Exhibition, „Automotive Circle International“ Bad Nauheim, 2002. tci – Technik & Kommunikation Verlags GmbH, Berlin, 2002.
- [106] MANN, K.; HUTFLESS, J.; RUß, A.: *Mit dem Scheibenlaser zu neuen Anwendungen*. Tagungsband der Stuttgarter Lasertage (SLT'03), Stuttgart, 2003, S. 71.
- [107] KLASSEN, M.: *Schweißen von KFZ- Leichtbaukomponenten mit Lasersystemen neuester Generation*. Lasersysteme für den innovativen Leichtbau. VDI- Verlag, Optische Technologien, Band 2, Düsseldorf, 2003
- [108] DAUSINGER, F.: *Potentials of diode-pumped laser systems for macro-manufacturing technology from scientific point of view*. In: 4th European Conference and Exhibition, „Automotive Circle International“ Bad Nauheim 2003. tci – Technik & Kommunikation Verlags GmbH, Berlin, 2003.
- [109] STEINMETZ, H.; STEINICKE, M.: *Energiereduziertes Fügen mit Lasersystemen neuester Generation im Powertrain*. Lasersysteme für den innovativen Leichtbau. VDI- Verlag, Optische Technologien, Band 2. Düsseldorf, 2003
- [110] RADAJ, D.; KOLLER, R.; DILTHEY, U.; BUXBAUM, O.: *Laserschweißgerechtes Konstruieren*. Fachbuchreihe Schweißtechnik, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf : DVS-Verlag, 1994.
- [111] XIE, J.; DENNEY, P.: *Galvanized steel joined with lasers*. Welding Journal, New York, Band 80 (2001) Nr. 6, S. 59.

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW) der Universität Stuttgart.

Ganz herzlich möchte ich mich bei meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.- Ing. Helmut Hügel bedanken, der schon zu frühen Zeiten den Grundstein für diese Arbeit gelegt hat. Dank seiner mitreißenden Art Vorlesungen zu gestalten habe ich erst realisiert, dass Maschinenbau zu studieren auch unheimlich Spaß machen kann.

Weiterer Dank gebührt Prof. Dr. rer. nat. Siegfried Schmauder für das Interesse an meiner Arbeit und für die Übernahme des Mitberichts.

Bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. Friedrich Dausinger möchte ich mich für die Unterstützung und Förderung, aber auch für das mir entgegengebrachte Vertrauen bedanken.

Meinen Zimmerkollegen Markus Leimser und Andreas Ruß möchte ich für die schöne und sehr produktive gemeinsame Zeit danken. Auch den Kollegen der Mikrobearbeitung und Prozessüberwachung, die einen sehr positiven Beitrag für meine fachliche Horizont-erweiterung geleistet haben – vielen Dank. Stellvertretend für die zahlreichen Studenten die mich unterstützt haben möchte ich mich bei Andrey Andreev bedanken. Außerdem möchte ich mich für die Unterstützung der Kollegen aus Technik und Werkstatt bedanken, ohne deren Hilfe viele meiner Experimente gescheitert wären.

Nicht zuletzt gilt mein herzlicher Dank meiner Frau Edith. Ihre Unterstützung und Geduld waren die Basis zur zügigen und stressfreien Bearbeitung des Manuskripts.

Schließlich möchte ich an dieser Stelle meinen Eltern Hildegard und Wilhelm Gref ganz herzlich danken. Grundlage für das Entstehen dieser Arbeit war ihre unabdingbare und langjährige Unterstützung.

Stuttgart, im August 2005

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

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

Forschungsberichte des IFSW von 1992 bis 1999 erschienen im Teubner Verlag, Stuttgart

Zoske, Uwe

Modell zur rechnerischen Simulation von Laserresonatoren und Strahlführungssystemen
1992, 186 Seiten, ISBN 3-519-06205-4

Gorriz, 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 längsgeströimte CO₂-Laser
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 längsgeströimten 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

Griebsch, Jürgen

Grundlagenuntersuchungen zur Qualitätssicherung beim gepulsten Lasertiefschweißen
1996, 133 Seiten, ISBN 3-519-06220-8

Krepulat, Walter

Aerodynamische Fenster für industrielle Hochleistungslaser
1996, 144 Seiten, ISBN 3-519-06221-6

Xiao, Min

Vergleichende Untersuchungen zum Schneiden dünner Bleche mit 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

Laserschweißbeignung 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 Mo-lybdän
1998, 163 Seiten, ISBN 3-519-06236-4

Hack, Rüdiger

System- und verfahrenstechnischer Vergleich von Nd:YAG- und CO₂-Lasern im Leistungsbereich bis 5 kW
1998, 165 Seiten, ISBN 3-519-06237-2

Krupka, René

Photothermische Charakterisierung optischer Komponenten für Hochleistungslaser
1998, 139 Seiten, ISBN 3-519-06238-0

Pfeiffer, Wolfgang

Fluiddynamische und elektrophysikalisch optimierte Entladungsstrecken für CO₂-Hochleistungslaser
1998, 152 Seiten, ISBN 3-519-06239-9

Volz, Robert

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

Bartelt-Berger, Lars

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

Müller-Hummel, Peter

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

Rohde, Hansjörg

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

Huonker, Martin

Strahlführung in CO₂-Hochleistungslasersystemen zur Materialbearbeitung
1999, 121 Seiten, ISBN 3-519-06244-5

Callies, Gert

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

Schubert, Michael E.

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

Kern, Markus

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

Raiber, Armin

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

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

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

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

Schittenhelm, Henrik

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

Stewen, Christian

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

Schmitz, Christian

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

Karszewski, Martin

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

Chang, Chin-Lung

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

Haag, Matthias

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

Bahn Müller, Jochen

Charakterisierung gepulster Laserstrahlung zur Qualitätssteigerung beim Laserbohren
2000, 138 Seiten, ISBN 3-89675-851-9

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 Laserpräzisionsabtrags von Stahl
2002, 138 Seiten, ISBN 3-8316-0137-2

Erhard, Steffen

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

Contag, Karsten

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

Krastel, Klaus

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

Staud, Jürgen

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

Schinz, 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-Doppelfokustechnik – Steigerung von Prozeßsicherheit, Flexibilität 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

Evaluiert eines Messverfahrens zur genauen Bestimmung des Reflexionsgrades optischer Komponenten
2003, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0274-3

Joachim Radtke

Herstellung von Präzisionsdurchbrüchen in keramischen 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 Metallen mit kurz- und ultrakurzgepulsten Lasern
2004, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0372-3

Guido Hergenhan

Kohärente Kopplung von Vertikalemittern – Systemkonzept und experimentelle Verifizierung
2004, 115 Seiten, ISBN 3-8316-0376-6

Klaus Goth

Schweißen von Mischverbindungen aus Aluminiumguß- 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 Präzision 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 Aluminiumgusslegierungen mittels Laserstrahlung
2004, 173 Seiten, ISBN 3-8316-0460-6

Thomas Fuhrich

Marangoni-effekt beim Laserstrahl-tiefschweißen von Stahl
2005, 163 Seiten, ISBN 3-8316-0493-2

Daniel Müller

Pulsenergiestabilität bei regenerativen Kurzpulsverstärkern im Scheibenlaserdesign
2005, 172 Seiten, ISBN 3-8316-0508-4

Jiancun Gao

Neodym-dotierte Quasi-Drei-Niveau-Scheibenlaser: Hohe Ausgangsleistung und Frequenzverdopplung
2005, 148 Seiten, ISBN 3-8316-0521-1

