Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

A. Ruß
Schweißen mit dem Scheibenlaser -
Potentiale der guten Fokussierbarkeit

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.

Schweißen mit dem Scheibenlaser – Potentiale der guten Fokussierbarkeit

von Dr.-Ing. Andreas Ruß
Universität Stuttgart

Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

Als Dissertation genehmigt
von der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. 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., 2006

D 93

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

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2006

ISBN 3-8316-0580-7

Printed in Germany

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

Kurzfassung der Arbeit

Die Vorteile der hervorragenden Fokussierbarkeit des Scheibenlaser lassen sich auf verschiedene Art und Weise nutzen. In Rahmen dieser Arbeit wurde untersucht, wie sich die Verkleinerung des Fokusdurchmessers auf den Schweißprozess auswirkt.

Das Laserstrahlschweißen lässt sich in die Prozessformen Wärmeleitungsschweißen und Tiefschweißen einteilen. Der Übergang von der einen Prozessform zur anderen wird als Schwelle bezeichnet, deren Lage mit dem Strahlparameterquotienten P/d_f korreliert. Da sich die Schwelle für kleinere Fokusdurchmesser in Richtung niedrigeren Laserleistungen verschiebt, ist insbesondere beim Tiefschweißen von Dünnblechen eine gute Fokussierbarkeit von großer Bedeutung. Des Weiteren wird mit steigendem Vorschub eine gute Fokussierbarkeit immer wichtiger. Beim Folienschweißen lassen sich diese Vorteile nutzen, da ein kleiner Fokusdurchmesser zu einem stabilen Schweißprozess bei extremen Vorschubgeschwindigkeiten führt.

Mit kleiner werdendem Fokusdurchmesser kann bei ansonsten gleichen Prozessparametern die Einschweißtiefe gesteigert werden. Diese Aussage gilt für Fokusdurchmesser $d_f \geq 200$ µm. Die Verkleinerung auf 150 µm bringt nur eine geringfügige Steigerung der Einschweißtiefe mit sich, eine weitere Verkleinerung führt sogar zu einem Absinken der Einschweißtiefe. Da keine Plasmaabschirmung vorhanden ist, kann dies nicht die Ursache für die Verringerung der Einschweißtiefe sein. Diese scheinbare Effizienzgrenze bei dem Fokusdurchmesser 150 µm kann aber durch die Verringerung des Divergenzwinkels des fokussierten Strahls überschritten werden

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass ein kleiner Divergenzwinkel für den Schweißprozess vorteilhaft ist und einer guten Fokussierbarkeit somit große Bedeutung zukommt. Eine weitere Steigerung der Fokussierbarkeit des Scheibenlasers lässt auch in Zukunft eine Erweiterung des Prozessfensters sowie die Erschließung neuer Anwendungsgebiete erwarten.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung der Arbeit 5
Inhaltsverzeichnis 7
Formelzeichen und Abkürzungen 9
Extended Abstract 13
1 Einleitung 16
1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit 16
1.2 Aufbau der Arbeit 17
2 Grundlagen des Laserstrahlschweißens 19
2.1 Strahlqualität und Fokussierbarkeit 19
2.2 Fokussierung von Laserstrahlung 21
2.3 Absorption der Laserstrahlung 24
2.4 Verfahrensprinzip des Laserstrahlschweißens 26
2.4.1 Wärmeleitungsschweißen 27
2.4.2 Tiefschweißen 29
2.4.3 Erstarrung des Schweißgutes 32
2.5 Wirkungsgrade beim Laserstrahlschweißen 34
2.5.1 Einkoppelgrad 34
2.5.2 Thermischer Wirkungsgrad 36
2.5.3 Prozesswirkungsgrad 38
3 Systemtechnik, Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung 39
3.1 Hochleistungs-Festkörperlaser 39
3.1.1 Lampengepumpte Stablaser 39
3.1.2 Diodengepumpter Scheibenlaser 40
3.2 Strahlführung und -formung 41
3.3 Prozessadapter 42
3.4 Versuchsaufbau und -durchführung 46
4 Übergang vom Wärmeleitungs- zum Tiefschweißen: die Schwelle 48
4.1 Grundlagen 48
4.2 Schwelle bei Aluminiumlegierungen 52

4.2.1 Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit 57
4.2.2 Einfluss des Schutzgases 59
4.3 Schwelle bei Stahlwerkstoffen 59
4.3.1 Vertiefende Betrachtung zur Schwelle anhand von Edelstahl 61
4.3.2 Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit und deren Bedeutung für das Hochgeschwindigkeitsschweißen 64
4.3.3 Einfluss des Schutzgases 66
4.4 Vergleich der Werkstoffe 67
4.5 Synopsis 71
5 Schweißen mit dem Scheibenlaser 74
5.1 Einfluss der Fokussierbarkeit 74
5.1.1 Einleitende Betrachtungen zum Schweißen mit sehr kleinen Fokusdurchmessern 75
5.1.2 Variation des Fokusdurchmessers 76
5.1.3 Einfluss des Fokusdurchmessers auf die Nahtform 85
5.1.4 Variation des Divergenzwinkels 95
5.1.5 Potential guter Fokussierbarkeit 101
5.1.6 Variation der Fokuslage 102
5.1.7 Nahtqualität 108
5.1.8 Synopsis 109
5.2 Folienschweißen 111
5.2.1 Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit 112
5.2.2 Reduzierung der Foliendicke 118
5.2.3 Übertragung auf eine Überlappverbindung 121
5.2.4 Anhebung der Schmelze und Humping 123
5.2.5 Synopsis 127
6 Zusammenfassung und Ausblick 129
7 Literaturverzeichnis 133

Formelzeichen und Abkürzungen

B	Laserstrahlabhängiger Faktor (beam)
BEO	Bearbeitungsoptik
cw	Dauerstrich (continuous wave)
LLK	Lichtleitkabel
M	materialabhänger Faktor (material)
Nd	Neodym
OR	Nahtoberraupe
RB	Röntgenbild
REM	Rasterelektronenmikroskop
SL	Scheibenlaser
SPP	Strahlparameterprodukt
TS	Tiefschweißen
Ü	Übergangsbereich
V	geschwindigkeitsabhängiger Faktor (velocity)
WLS	Wärmeleitungsschweißen
Y	Yttrium
YAG	Yttrium-Aluminium-Granat
Yb	Ytterbium

α	1/m	Absorptionskoeffizient
A	-	Absorptionsgrad
A_F	-	Aspektverhältnis Fokus
A_N	-	Aspektverhältnis Naht
β	-	Abbildungsmaßstab
b	mm	Nahtbreite
c_p	kJ/kg K	Wärmekapazität
δ	m	Diffusionslänge
D	mm	Rohstrahldurchmesser auf der Linse
d	mm	Durchmesser der Strahltaille

d_0	mm	Durchmesser der Strahltaille (Grundmode)
d_f	µm	Fokusdurchmesser
d_k	mm	Kerndurchmesser einer Glasfaser
E	W/mm^2	Leistungsdichte
E_{abs}	W/mm^2	absorbierte Leistungsdichte
E_0	W/mm^2	mittlere Leistungsdichte im Fokus
F	mm^2	Fläche
F	-	Fokussierzahl
F	mm^2	Nahtquerschnitt
$F_{d\theta}$	$(mm \cdot mrad)^{-1}$	Fokussierbarkeit
f_f	mm	Brennweite Fokussierlinse
f_k	mm	Brennweite Kollimationslinse
γ	°	Öffnungswinkel der Schweißspritzer
h_s	kJ/kg	Schmelzenthalpie
κ	m^2/s	Temperaturleitfähigkeit
κ	-	Absorptionsindex
K	-	Strahlpropagationsfaktor, K-Zahl
λ	m	Wellenlänge
λ_{th}	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
l_α	m	Absorptionslänge
M^2	-	Beugungsmaßzahl
η_A		Einkoppelgrad
η_{Pr}	-	Prozesswirkungsgrad
η_{th}	-	thermischer Wirkungsgrad
n	-	Brechungsindex
Pe	-	Péclet-Zahl
P_L	W	Laserleistung
$P_{L,abs}$	W	absorbierte Laserleistung
$P_{L,ges}$	W	gesamte eingestrahlte Laserstrahlung
P_L/d_f	kW/mm	Strahlparameterquotient
P_S	kW	Schwellleistung
$\dot{p}_{2d,e}$	W/m^2	mittlere Wärmestromdichte über eine ebene Oberfläche
$\dot{q}_{2d,w}$	W/m^2	mittlere Wärmestromdichte über die Kapillarwand
θ	mrad	Divergenzwinkel
θ_0	mrad	Divergenzwinkel (Grundmode)

θ_f	°	Divergenzwinkel des fokussierten Laserstrahls
θ_k	°	Divergenzwinkel des kollimierten Laserstrahls
ρ	kg/m^3	Dichte
R	-	Reflexionsgrad
r	mm	Radialer Abstand der Orte konstanter Leistungsdichte
r_f	mm	Fokusradius
σ	N/m	Oberflächenspannungskoeffizient
T	-	Transmissionsgrad
T	K	Temperatur
T_{max}	K	maximale Temperatur
T_s	K	Schmelztemperatur
T_V	K	Verdampfungstemperatur
t	s	Zeit
t	mm	Einschweißtiefe
t_{min}	mm	minimale Einschweißtiefe
v	m/min	Vorschubgeschwindigkeit
v_S	m/s	Strömungsgeschwindigkeit im Schmelzbad
w	mm	Strahlradius
w_0	mm	Strahlradius im Fokus
x	mm	Ortskoordinate
X		normierte Leistung
y	mm	Ortskoordinate
Y		normierte Geschwindigkeit
z	m	Ortskoordinate
z	mm	Strahlausbreitungsrichtung
z	mm	Fokuslage
z_{Kap}	mm	Tiefe der Dampfkapillare
z_{Rf}	mm	Rayleighlänge

Extended Abstract

With the first generation of diode pumped solid state lasers, the pump lamps were replaced by pump diodes, but crystal geometry and cooling technology remained unchanged. Thus, it was possible to obtain both a higher efficiency and a marginally better focusability at the same time. However, it follows that with this geometry, although the thermal lensing effect is reduced by virtue of the diode pumping, the effect cannot be eliminated. For a distinct improvement of the efficiency and, in particular, of the beam quality new laser concepts are, therefore, required. The most promising representative of the solid state laser of the latest generation, which in principle permits the realization of an optimum focusability even with high laser power, is the thin disk laser.

The advantages of a better focusability can be put to use in a couple of ways. On the one hand, one can achieve a significant reduction of the focus diameter by using the same focal length optics, or on the other hand, an increased working distance at the same focus diameter. Although thin disk lasers of the multi-kilowatt class are about to be introduced in industry, the effects of smaller focus diameters on the welding process have not largely found attention. Yet it is especially the process understanding which is the prerequisite for a successful, economic use of the thin disk laser in industrial production engineering. With this document, the base for an enlarged process understanding shall be created for laser beam welding with small focus diameters, in order to extend existing or new application areas.

Laser beam welding can be divided up into the process forms heat conduction welding and keyhole welding. The transition from one process form to the other is called threshold, the value of which correlates with the beam parameter ratio P/d_f. With laser beam welding of aluminium alloys, the welding depth rises abruptly at the threshold due to the formation of a keyhole what is characteristic for deep penetration or keyhole welding. With the focus diameter getting smaller, the threshold moves in the direction of smaller laser power values. Since the laser power determines the meltable volume, the sudden increase of the welding depth is lower for a smaller laser power. This means that for welding thin sheets, a good focusability is of considerable importance. Above the threshold value, the welding depth scales for small welding speeds with the laser power, for large ones ($\geq$ 6 m/min) with the beam parameter ratio. With increasing welding speed, the focusability is, therefor, of greater significance.

In principle, steel materials and aluminium alloys behave alike, but slightly altered conditions arise due to the different material properties. With steel, the threshold lies at smaller values. With low laser power just above the threshold value, the keyhole opening is large compared to its depth (small aspect ratio), which leads to a lower energy coupling and, thus, no rapid rise of the welding depth at the threshold. This regime, compared to keyhole welding (at high P/d_f) is called transition zone, lying between heat conduction welding and keyhole welding. Nevertheless, since a keyhole has already been formed, the transition regime can be assigned to the process mode of keyhole welding. At high welding speeds the threshold value is no longer clearly distinctive (even with aluminium alloys), so that a transition regime is also present in this case.

The aspect ratio at the threshold depends on the material properties. This means that the keyhole welding cannot be determined by a certain aspect ratio. The process efficiency is best suited for that.

With standard components for focusing, the good focusability of the thin disk laser allows a small focus diameter of 75 µm. It could be proved that, even with a very high power density, there are no plasma effects in the interaction. Therefore, no shielding gas is required from a process-technological point of view, provided that an oxidation of the welded seam can be accepted.

With a decreasing focus diameter, the welding depth can be increased with otherwise identical process parameters. It was shown that this statement applies to focus diameters of ≥ 200 µm, only. The reduction to 150 µm brings about only an insignificant increase of the welding depth, a further reduction even leads to a reduced welding depth. Thus, a process limit is apparently arising at a focus diameter of 150 µm.

The reduction of the focus diameter to values below 200 µm also brings along a change of seam geometry. As a cause for the two effects, the divergence angle of the focussed laser beam was identified. With stronger focussing, i.e., a larger divergence angle, the shape of the isophots changes. With steel, the keyhole as well as the weld pool show a close similarity with them. Aluminium, in principle, shows the same behaviour, but due to other material properties and other coupling conditions the geometry of the weld seam is changed.

With today's focusability, very small focus diameters can be achieved only with a strong focussing, so that the Rayleigh-length is very small. The variation of the focus position has shown that between the focus position on the work-piece surface and

1 mm in the work-piece, the welding depth approximately remains the same or can even be increased by about 10%. If the focus lies deeper in the work-piece or above the work-piece surface, the welding depth will strongly decrease. The depth change percentage is identical for the same divergence angle and for a small angle lower than in case of a large one. Therefore, a better focusability is advisable, also with regard to the variation of the focus position. Another improvement of the focusability has a positive effect in this case as well, above all, if the divergence angle can be further reduced.

Even with small focus diameters, no increased porosity can be determined with view to the large focus diameters in spite of the very large aspect ratio. With a small focus diameter, the arising process pores are very small due to the more slim keyhole.

Furthermore, a small focus diameter and thus a good focusability is of great importance for welding of thin metal foils. A keyhole welding process could be realized safely with foil thicknesses smaller than 300 µm.

All in all, a good focusability respectively beam quality is important for the welding process. The reduction of the divergence angle of the focussed laser beam has a positive effect on this in particular. For a further improvement of the focusability in the welding process there is still a potential, which makes us expect further improvements and the development of new application areas in future.

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit

In den vergangenen Jahren haben sich Hochleistungslaser zu einem für die industrielle Fertigungstechnik sehr wichtigen Werkzeug entwickelt. Obwohl die heutigen lampengepumpten Festkörperlaser im Vergleich zu CO_2-Lasern teurer sind, eine geringere Fokussierbarkeit und einen geringeren Wirkungsgrad aufweisen, wächst die Anzahl ihrer industriellen Anwendungen beständig. Ausschlaggebend hierfür ist die kurze Wellenlänge der Festkörperlaser: Der Laserstrahl kann mit Hilfe von Glasfasern zum Werkstück transportiert werden, was eine höhere Flexibilität und bessere Zugänglichkeit sowie geringere Kosten für die Handhabungstechnik mit sich bringt. Des Weiteren ergeben sich durch die im Vergleich zum CO_2-Laser kürzere Wellenlänge einige prozesstechnische Vorteile wie z.B. höherer Absorptionsgrad bei metallischen Werkstoffen und Unempfindlichkeit gegenüber laserinduziertem Plasma. Die Verfügbarkeit ausgereifter Hochleistungs-Festkörperlaser ist die wesentliche Voraussetzung für die Anwendung der Lasertechnologie in der industriellen Fertigung. Einige wichtige Anwendungsgebiete erfordern jedoch eine höhere Laserleistung und/oder eine bessere Fokussierbarkeit als diese Geräte sie heute bieten. So sind z.B. für die geforderten hohen Einschweißtiefen im Getriebe- und Aggregatebau eine höhere Laserleistung bzw. eine bessere Fokussierbarkeit für die Umsetzung des Remote-Schweißens mit Festkörperlasern wünschenswert.

Mit der Verfügbarkeit von Diodenlasern zum Pumpen der Festkörperlaser und getrieben durch Bedürfnisse des Marktes, zielen die neuesten Entwicklungen auf dem Gebiet der Hochleistungs-Festkörperlaser auf die Verringerung der oben erwähnten Nachteile geringe Fokussierbarkeit und schlechter Wirkungsgrad ab. Der aussichtsreichste Vertreter der Festkörperlaser neuester Generation, der auch bei hohen Laserleistungen die Realisierung bester Fokussierbarkeit prinzipiell erlaubt, ist der Scheibenlaser.

Die Vorteile besserer Fokussierbarkeit können auf verschiedene Weise genutzt werden. Eine bessere Fokussierbarkeit führt zum einen bei gleichbleibender Fokussierung zu einem kleineren Fokusdurchmesser oder zum anderen bei gleichbleibendem Fokusdurchmesser zu einer Vergrößerung des Arbeitsabstandes. Obwohl Scheibenlaser der

Multikilowatt-Klasse sich kurz vor der industriellen Einführung befinden, sind die Einflüsse kleiner Fokusdurchmesser auf den Schweißprozess weitgehend unbekannt. Aber gerade ein vertieftes Prozessverständnis ist die Grundvoraussetzung für einen erfolgreichen, wirtschaftlichen Einsatz des Scheibenlasers in der industriellen Fertigungstechnik. Mit dieser Arbeit soll die Basis für das Prozessverständnis beim Laserstrahlschweißen mit kleinen Fokusdurchmessern geschaffen werden, um die Erweiterung bestehender bzw. die Erschließung neuer Anwendungsgebiete zu ermöglichen.

1.2 Aufbau der Arbeit

Ausgehend von der Zielsetzung dieser Arbeit leitet sich das Vorgehen und der Aufbau ab. Zunächst werden in Kapitel 2 die für diese Arbeit wichtigen Grundlagen des Laserstrahlschweißens aufgeführt und die verschiedenen Verfahrensvarianten diskutiert. Allerdings kommt bei dieser Arbeit ausschließlich die sogenannte Einstrahltechnik zum Einsatz, bei der nur ein Laserstrahl zum Schweißen eingesetzt wird.

In Kapitel 3 werden die prinzipielle Funktionsweise von Hochleistungs-Festkörperlasern sowie die Unterschiede der verschiedenen Laserkonzepte erläutert und deren wichtigste Eigenschaften miteinander verglichen. Des Weiteren wird die speziell zum Laserstrahlschweißen erforderliche Systemtechnik (Bearbeitungsoptiken, Prozessadapter) kurz beschrieben.

Trotz langjähriger Forschung und vielfältiger Anwendungen ist der Einfluss der Fokussierbarkeit auf den Übergang vom Wärmeleitungs- zum Tiefschweißen keineswegs Allgemeingut bei Prozessentwicklern. In Kapitel 4 werden deshalb zunächst die hierfür wichtigen Grundlagen erarbeitet und diese dann anhand experimenteller Untersuchungen an Aluminium und Stahl verifiziert und die Einflüsse der Fokussierbarkeit diskutiert.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit bildet in Kapitel 5 das Schweißen mit dem Scheibenlaser. Es werden anhand von Blindschweißungen in verschiedene Stahlwerkstoffe sowie in eine Aluminiumlegierung die Einflüsse des Fokusdurchmessers auf die Nahtkenngrößen Einschweißtiefe, Nahtbreite und -querschnittsfläche sowie Prozesswirkungsgrad und Nahtform diskutiert. Es wird aufgezeigt, wie mit Hilfe einer guten Fokussierbarkeit die Prozessgrenzen erweitert werden können.

Das Folienschweißen war aufgrund der bis dato geringen Fokussierbarkeit von cw-Festkörperlasern bisher gepulsten Lasersystemen bzw. anderen Schweißverfahren vor-

behalten. In Kapitel 5 wird aufgezeigt, wie die Vorteile der guten Fokussierbarkeit zum Hochgeschwindigkeitsschweißens dünner Folien genutzt werden können. Hiermit können neue Anwendungsgebiete für den Scheibenlaser erschlossen werden.

Zum Abschluss werden in Kapitel 6 die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst.

2 Grundlagen des Laserstrahlschweißens

Schweißen wird nach DIN 1910-1 [1] definiert als das Vereinigen von Werkstoffen in der Schweißzone unter Anwendung von Wärme und/oder Kraft mit oder ohne Schweißzusatz. Die zum Schweißen erforderliche Energie wird von außen zugeführt. DIN 1910-2 [2] teilt die Schweißverfahren ein nach dem Zweck des Schweißens in Verbindungs- und Auftragsschweißen und nach dem physikalischen Ablauf des Schweißens in Press- und Schmelzschweißen [3]. Das Laserstrahlschweißen ist ein Vertreter der Schmelzschweißverfahren, bei dem die für das Aufschmelzen erforderliche Wärme durch Umwandlung energiereicher Strahlung beim Auftreffen auf bzw. Eindringen in das Werkstück entsteht [2]. Bei dieser Arbeit kommen ausschließlich kontinuierlich (cw) betriebene Hochleistungsfestkörperlaser zum Einsatz. Das Laserstrahlschweißen mit diesen Lasern kann in die Verfahrensvarianten Wärmeleitungs- und Tiefschweißen eingeteilt werden, worauf in Kapitel 2.4 eingegangen wird. In diesem Kapitel werden die für das Laserstrahlschweißen mit Festkörperlasern wichtigen Grundlagen kurz behandelt.

2.1 Strahlqualität und Fokussierbarkeit

Ein aus der Laserstrahlquelle kommender Laserstrahl ist durch den Divergenzwinkel[1] θ und den Durchmesser[2] der Strahltaille d_0 gekennzeichnet. Das Produkt dieser beiden Größen wird als Strahlparameterprodukt (SPP)

$$SPP = \frac{d_0 \cdot \theta_0}{4} \tag{2.1}$$

bezeichnet, dessen Wert während der gesamten Propagation – auch beim Durchgang durch (nicht fehlerbehaftete) optische Elemente zur Strahlumlenkung bzw. -fokussierung – erhalten bleibt [4]. Die physikalische Grenze ist durch

[1] Als Divergenzwinkel wird der gesamte Öffnungswinkel des fokussierten Laserstrahls verwendet.

[2] Den Durchmesser der Strahltaille, auch Fokusdurchmesser genannt, begrenzt bei einem rotationssymmetrischen Laserstrahl die Kreisfläche, innerhalb derer 86% der Laserleistung enthalten sind.

$$(SPP)_{00} = \frac{\lambda}{\pi} \tag{2.2}$$

gegeben, was dem Wert des Gauß'schen Grundmode entspricht. Bei Hochleistungsfestkörperlasern führen Einflüsse des laseraktiven Mediums, wie z.B. ein Temperaturgradient quer zur Strahlausbreitungsrichtung, zu einer Vergrößerung des Strahlparameterprodukts [4]. Diese Verschlechterung der „Strahlqualität" spiegelt sich in dem Strahlpropagationsfaktor K, auch K-Zahl genannt, wider. Sie ist definiert als Verhältnis zwischen den Strahlparameterprodukten des Gauß'schen Grundmodes und des realen Laserstrahls [4]:

$$K = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \frac{4}{d \cdot \theta}. \tag{2.3}$$

Werte für die K-Zahl liegen im Bereich von $0 < K \leq 1$, wobei $K = 1$ den besten Wert darstellt. Die K-Zahl ermöglicht den Vergleich der Strahlqualität verschiedener Laserstrahlquellen gleicher Wellenlänge. Im englischsprachigen Raum ist die Beugungsmaßzahl M^2 gebräuchlich, für die gilt:

$$M^2 = \frac{1}{K}. \tag{2.4}$$

Damit gilt allgemein für das Strahlparameterprodukt eines realen Laserstrahls

$$SPP = \frac{\lambda}{\pi} \cdot M^2. \tag{2.5}$$

Eine höhere Strahlqualität ist durch ein kleineres Strahlparameterprodukt gekennzeichnet. Um eine bessere Strahlqualität mit einem größeren Wert zum Ausdruck zu bringen, wird in [5] und [6] der Begriff der Fokussierbarkeit eingeführt. Unter Fokussierbarkeit $F_{d\theta}$, die über das inverse Strahlparameterprodukt

$$F_{d\theta} = \frac{1}{SPP} = \frac{\pi}{M^2 \cdot \lambda}. \tag{2.6}$$

festgelegt ist, wird somit die Eigenschaft eines Laserstrahls verstanden, sich gut fokussieren zu lassen. Eine bessere Fokussierbarkeit ist gleichbedeutend mit einer höheren Strahlqualität und einem kleineren Strahlparameterprodukt.

2.2 Fokussierung von Laserstrahlung

Die in Kapitel 2.1 beschriebenen festen Eigenschaften einer Laserstrahlquelle können nicht durch optische Elemente zur Fokussierung bzw. Strahlumlenkung verändert werden [4]. Im Folgenden werden die für die Fokussierung eines realen Laserstrahls wichtigsten Zusammenhänge diskutiert, siehe dazu Bild 2.1. Eine ausführliche Herleitung der nachfolgend diskutierten Formeln ist z.B. in [4] enthalten.

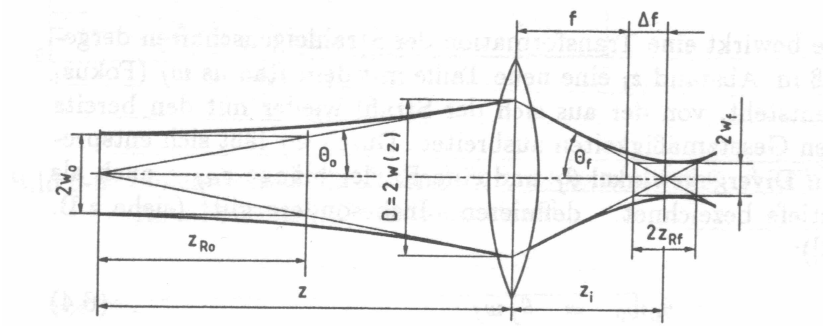

Bild 2.1: Wichtige Größen bei der Fokussierung eines Laserstrahls[3] [4].

Das Strahlparameterprodukt bleibt, wie bereits erwähnt, während der Fokussierung konstant

$$\frac{d_0 \cdot \theta_0}{4} = \frac{d_f \cdot \theta_f}{4}, \tag{2.7}$$

woraus sich der Fokusdurchmesser d_f in guter Näherung durch

$$d_f \approx SPP \cdot 4F = \frac{4\lambda}{\pi} \cdot M^2 \cdot F = \frac{4F}{F_{d\theta}} \tag{2.8}$$

bestimmen lässt. Die in Gleichung (2.8) enthaltene Fokussierzahl F ist als Quotient aus der Brennweite f_F der Fokussierlinse und dem Durchmesser D des Laserstrahls auf der Fokussierlinse gegeben:

$$F = \frac{f_F}{D}. \tag{2.9}$$

[3] Es ist anzumerken, dass in dieser Skizze der Divergenzwinkel θ als halber Öffnungswinkel des fokussierten Laserstrahls verwendet wird. Zur Berechnung des Strahlparameterprodukts wird im Gegensatz dazu der ganze Öffnungswinkel verwendet.

Eine weitere, für das Laserstrahlschweißen interessante Größe ist die Rayleighlänge z_{Rf}, die sich zu

$$z_{Rf} = \frac{4 \cdot \lambda}{\pi} \cdot M^2 \cdot F^2 = \frac{4 \cdot F^2}{F_{d\theta}} \tag{2.10}$$

bzw. mit Gleichung (2.8) zu

$$z_{Rf} = d_f \cdot F \tag{2.11}$$

ergibt. Innerhalb der Rayleighlänge vergrößert sich der Fokusdurchmesser um den Faktor $\sqrt{2}$. Die doppelte Rayleighlänge wird auch als Tiefenschärfe bezeichnet. Eine große Rayleighlänge ist für einen Schweißprozess sehr wichtig, da sich innerhalb von z_{Rf} eine Bahnungenauigkeit der Bearbeitungsmaschine in Strahlrichtung nicht negativ auf den Schweißprozess auswirkt [4]. Aus den Gleichungen (2.7), (2.8), (2.9) und (2.11) lassen sich für die Fokussierung folgende wichtige Aussagen ableiten (der Strahldurchmesser D auf der Fokussierlinse wird dabei konstant gehalten):

- Eine stärkere Fokussierung (kleinere Fokussierbrennweite f_F bzw. kleinere Fokussierzahl F) führt zu einem kleineren Fokusdurchmesser bei einem gleichzeitig größeren Divergenzwinkel sowie einer kleineren Rayleighlänge.

- Eine bessere Fokussierbarkeit – gleichbedeutend mit einer besseren Strahlqualität bzw. einem kleineren Strahlparameterprodukt – des Laserstrahls führt bei gleicher Fokussierzahl F zu einem kleineren Fokusdurchmesser bei gleichem Divergenzwinkel. Allerdings ist die Rayleighlänge, bedingt durch den kleineren Fokusdurchmesser, ebenfalls kleiner.

- Bei gleichem Fokusdurchmesser d_f führt eine bessere Fokussierbarkeit zu einer größeren Fokussierzahl, einem kleineren Divergenzwinkel und einer größeren Rayleighlänge. Mit der größeren Fokussierzahl lässt sich der Arbeitsabstand vergrößern, was für einen industriellen Einsatz von entscheidender Bedeutung sein kann.

- Mit einer besseren Fokussierbarkeit kann der Durchmesser D des kollimierten Rohstrahls reduziert werden. Damit kann mit einer schlankeren Bearbeitungsoptik ein Fokusdurchmesser gleicher Dimension erzielt werden, wodurch sich die Zugänglichkeit in Bauteilstrukturen verbessert.

Diese Aussagen sind in Bild 2.2 grafisch zusammengefasst.

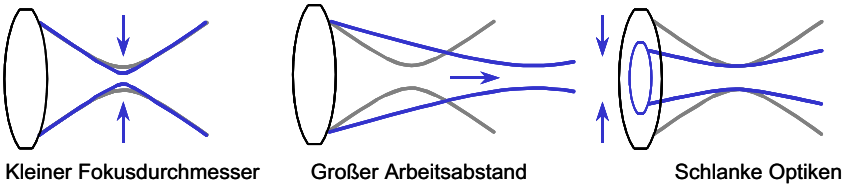

Bild 2.2: Systemstechnische Vorteile einer besseren Fokussierbarkeit [7, 8].

Beim Laserstrahlschweißen mit Hochleistungsfestkörperlasern werden zur Strahlführung Lichtleitkabel mit einem an das Strahlparameterprodukt angepassten Glasfaser-Kerndurchmesser d_k eingesetzt. Den schematischen Aufbau einer zum Schweißen verwendeten Bearbeitungsoptik zeigt Bild 2.3.

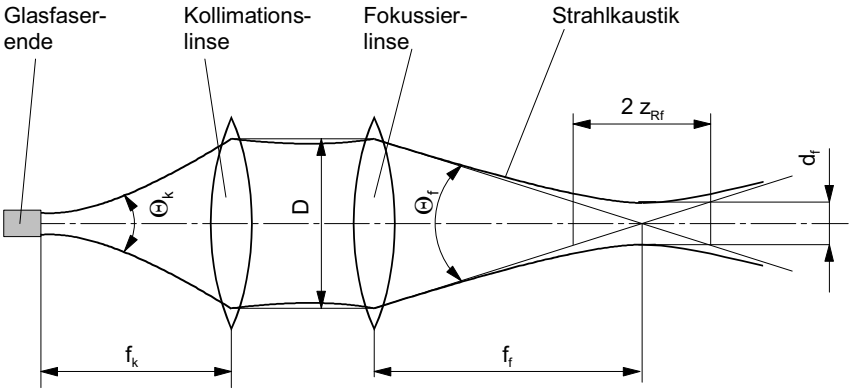

Bild 2.3: Schematischer Aufbau einer Bearbeitungsoptik für das Laserstrahlschweißen [9].

Das Glasfaserende ist in der Brennebene der Kollimationslinse angeordnet. Der aus der Glasfaser austretende, divergierende Laserstrahl wird kollimiert und mit Hilfe der Fokussierlinse auf das Werkstück abgebildet. In der Brennebene der Fokussierlinse ergibt sich ein Bild des Faserendes. Mit Hilfe der Gesetzmäßigkeiten der geometrischen Optik ergibt sich der Abbildungsmaßstab β zu

$$\beta = \frac{f_f}{f_k} = \frac{d_f}{d_k}, \tag{2.12}$$

woraus der Fokusdurchmesser d_f am Werkstück nach

$$d_f = \frac{f_f}{f_k} \cdot d_k \tag{2.13}$$

folgt. Bei der Verwendung von Lichtleitkabeln kann eine bessere Strahlqualität des Laserstrahls durch Verwendung eines kleineren Kerndurchmessers genutzt werden. Bei gleichem Abbildungsverhältnis bzw. gleicher Fokussierzahl ergibt sich damit ein kleinerer Fokusdurchmesser. Divergenzwinkel und Rayleighlänge verhalten sich dabei in der oben beschriebenen Weise.

2.3 Absorption der Laserstrahlung

Eine Grundvoraussetzung für den wirtschaftlichen Einsatz des Strahlwerkzeugs Laser ist die Übertragung eines möglichst großen Teils seiner Energie auf das zu bearbeitende Werkstück. Absorptionsgrad A und Absorptionskoeffizient α sind hierbei die bestimmenden Größen.

Trifft Laserstrahlung der Leistungsdichte E auf eine metallische Oberfläche, wird ein von Einfallswinkel, Polarisation, Wellenlänge und Werkstoff abhängiger Anteil der Laserstrahlung absorbiert. Hat das Werkstück eine hinreichende Dicke (d.h. Transmissionsgrad T = 0), wird der nicht absorbierte Anteil der Laserstrahlung reflektiert. Der Absorptionsgrad A ist definiert als Verhältnis der absorbierten Laserleistung $P_{L,abs}$ bzw. Leistungsdichte E_{abs} zur eingestrahlten Laserleistung $P_{L,ges}$ bzw. Leistungsdichte E bei einmaliger Wechselwirkung zwischen Strahl und Materie:

$$A = \frac{P_{L,abs}}{P_{L,ges}} = \frac{E_{abs}}{E}. \tag{2.14}$$

In Bild 2.4 ist der Verlauf des Absorptionsgrades bei Raumtemperatur mit senkrechtem Strahleinfall über der Wellenlänge aufgetragen. Bei der Wellenlänge eines Nd:YAG-Lasers (λ = 1,06 µm) ist der Absorptionsgrad von Stahl ($\approx$ 35%) um ein vielfaches größer als bei Aluminiumwerkstoffen ($\approx$ 5%). Durch die Temperaturabhängigkeit der Materialeigenschaften kann es zu einer Veränderung des Absorptionsgrades kommen. Beispielsweise führt eine Temperaturerhöhung bei Aluminiumlegierungen zu einer Absorptionserhöhung, wobei bei Verdampfungstemperatur ein Absorptionsgrad von etwa 15% erreicht wird [10]. Dagegen ist die Temperaturabhängigkeit bei Stahlwerkstoffen eher gering [10].

In den meisten Fällen der Laserstrahl-Bearbeitungsprozesse trifft der Laserstrahl nicht senkrecht, sondern z.T. unter einem sehr großen Winkel auf die Werkstoffoberfläche auf (siehe Kapitel 2.4.2). Der Absorptionsgrad ist in diesen Fällen auch vom Einfallswinkel sowie der Polarisation des Laserstrahls abhängig [4]. Bei linear paralleler Pola-

risation (d.h. einer Schwingungsebene der elektrischen Feldstärke parallel zur Vorschubrichtung) des Laserstrahls eines Festkörperlasers ergibt sich ein starker Anstieg des Absorptionsgrades, bis bei einem Brewsterwinkel von etwa 80° das Maximum erreicht wird [4]. Wird zur Laserstrahlführung ein Lichtleitkabel verwendet, ist der Laserstrahl aufgrund der Vielfachreflexionen innerhalb der Glasfaser depolarisiert, wodurch die winkelabhängige Absorptionserhöhung im Vergleich zu linear senkrechter Polarisation geringer ist.

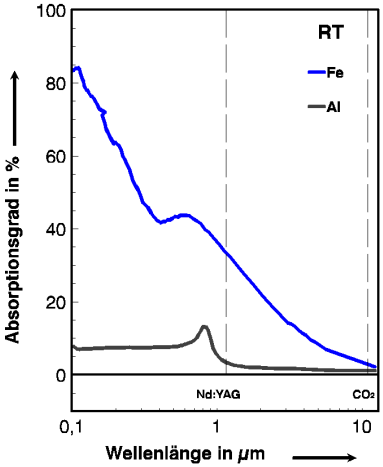

Bild 2.4: Absorptionsgrad in Abhängigkeit der Wellenlänge für Aluminium und Stahl bei Raumtemperatur und senkrechtem Strahleinfall [10].

Die auf das Werkstück auftreffende Leistungsdichte E wird entsprechend Absorptionsgrad A, Reflexionsgrad R und Transmissionsgrad T aufgeteilt:

$$E = A \cdot E + R \cdot E + T \cdot E \,. \tag{2.15}$$

Der Verlauf des absorbierten Anteils der Leistungsdichte E innerhalb des Werkstücks wird durch das Beer'sche Gesetz

$$E(z) = A \cdot E \cdot e^{-\alpha \cdot z} \tag{2.16}$$

beschrieben. Der Absorptionskoeffizient α ergibt sich aus den Materialeigenschaften Brechungsindex n und Absorptionsindex κ sowie der Wellenlänge λ zu

$$\alpha = \frac{4 \cdot \pi \cdot n \cdot \kappa}{\lambda} \,. \tag{2.17}$$

Die Strecke z, nach welcher die absorbierte Leistungsdichte im Werkstück auf 1/e abgenommen hat, wird als Absorptionslänge l_α bezeichnet und nach

$$l_\alpha = \frac{1}{\alpha} \tag{2.18}$$

berechnet. Werte für den Absorptionskoeffizient α liegen für Metalle typischerweise im Bereich von 10^5 und 10^6 cm^{-1} [4]. Nach Gleichung (2.18) bedeutet dies, dass die Absorption innerhalb einer Strecke von 10^{-6} bis 10^{-5} cm erfolgt, die sehr viel kleiner ist als die Wellenlänge eines Festkörperlasers. Die Wirkung des Laserstrahls kommt somit einer Oberflächenwärmequelle gleich [10]. Des Weiteren kann bei Werkstücken, die typischerweise mit dem Laserstrahl geschweißt werden, der Transmissionsgrad gleich null gesetzt werden. Dies ist selbst bei dem in Kapitel 5.2 behandelten Laserstrahlschweißen dünner Metallfolien der Fall.

2.4 Verfahrensprinzip des Laserstrahlschweißens

Die zum Schweißen erforderliche Energie wird durch den Laserstrahl in das Werkstück eingekoppelt, wobei sich die in Bild 2.5 dargestellten Wechselwirkungsprozesse ergeben. Im Fokus berechnet sich die mittlere Leistungsdichte nach:

$$E_0 = \frac{4 \cdot P_L}{\pi \cdot d_f^2}. \tag{2.19}$$

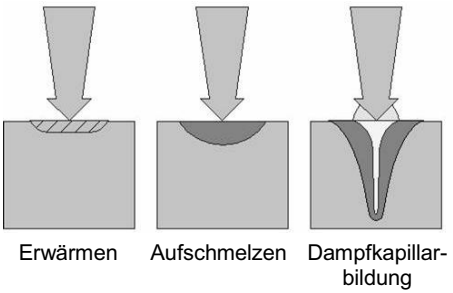

Bild 2.5: Wechselwirkungsprozesse zwischen Laserstrahl und Materie [4].

Bei kleiner mittlerer Leistungsdichte führt die nur einmalige Wechselwirkung zwischen Laserstrahl und Materie zu einer lokalen Erwärmung des Werkstücks. Mit steigender mittlerer Leistungsdichte steigt die lokale Temperatur ebenfalls an und das Werkstück beginnt aufzuschmelzen. Die Wärme fließt infolge Wärmeleitung in das

Werkstück ab, weshalb dabei von Wärmeleitungsschweißen gesprochen wird. Sobald an der Werkstückoberfläche Dampftemperatur erreicht wird, bildet sich eine Dampfkapillare aus, was als Tiefschweißen bezeichnet wird. Das Laserstrahlschweißen lässt sich danach in die Verfahrensvarianten *Wärmeleitungsschweißen* und *Tiefschweißen* unterteilen, auf die nachfolgend eingegangen wird.

2.4.1 Wärmeleitungsschweißen

Das Wärmeleitungsschweißen findet bei Leistungsdichten von etwa 10^4 bis 10^5 W/cm^2 statt [4], was zum Aufschmelzen der Werkstückoberfläche führt. Die bei der einmaligen Wechselwirkung zwischen Laserstrahl und Materie absorbierte Energie kann nur durch Wärmeleitung von der bestrahlten (nahezu ebenen) Oberfläche weiter in das Werkstück gelangen. Es ergeben sich Schweißnähte geringer Einschweißtiefe mit einem typischerweise linsenförmigen Nahtquerschnitt (siehe Bild 2.6). Aufgrund der nur einmaligen Wechselwirkung ist die Effizienz beim Wärmeleitungsschweißen sehr gering (siehe dazu auch Kapitel 2.5.1).

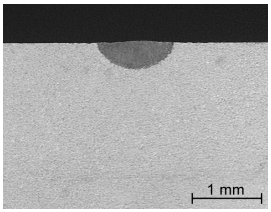

Bild 2.6: Wärmeleitungsschweißung mit typischem linsenförmigen Nahtquerschnitt (AlMgSi1, P_L = 2,9 kW, d_f = 0,6 mm, v = 4 m/min).

In dem beim Wärmeleitungsschweißen entstehenden Schmelzbad bildet sich aufgrund von Temperaturunterschieden an der Schmelzbadoberfläche sowie der Temperaturabhängigkeit der Oberflächenspannung ein Gradient der Oberflächenspannung $\delta\sigma/\delta T$ aus, woraus Scherspannungen entlang einer freien Oberfläche resultieren [11]. Diese Scherspannungen führen zu der sogenannten Marangoni-Strömung in Richtung des Gradienten der Oberflächenspannung. Der Oberflächenspannungskoeffizient σ hängt neben der Temperatur auch von der Konzentration von oberflächenaktiven Elementen in der Schmelze, wie z.B. Schwefel und Sauerstoff, ab und ist somit auch werkstoffabhängig. Dieser Gradient kann z.B. durch das verwendete Schutzgas sowie den eingesetzten Schweißzusatzwerkstoff verändert werden [12].

Bei einem *negativen Gradienten* $\delta\sigma/\delta T$ nimmt der Oberflächenspannungskoeffizient σ mit steigender Temperatur ab. Ausgehend von der Schmelzbadmitte – hier ist die

Temperatur am höchsten – wird eine dünne Schmelzschicht in Richtung des kälteren Schmelzbadrandes beschleunigt, siehe Bild 2.7. Die nach außen fließende, heiße Schmelze führt zu einem höheren Temperaturgradienten am Schmelzbadrand, wodurch eine größere Wärmemenge in den Festkörper fließt und die Schweißnaht verbreitert [12]. Es entstehen typischerweise breite und flache Schweißnähte [13]. Die im Schmelzbad entstehende Strömung und die daraus resultierende Deformation der Oberfläche ist in Bild 2.7 rechts dargestellt. Bei den meisten Eisenlegierungen ist der Gradient der Oberflächenspannung negativ [11].

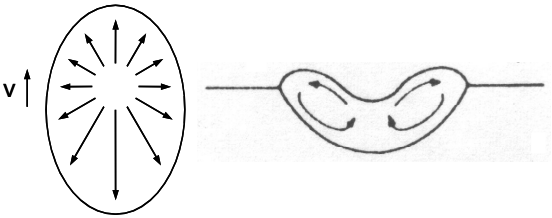

Bild 2.7: Marangoni-Strömung im Schmelzbad (links Draufsicht [14], rechts Querschnitt [15]) aufgrund eines negativen Gradienten der Oberflächenspannung von der heißen Schmelzbadmitte in Richtung des kälteren Schmelzbadrandes.

Im Gegensatz dazu führt ein *positiver Gradient* $\delta\sigma/\delta T$, d.h. der Oberflächenspannungskoeffizient nimmt mit steigender Temperatur zu, zu einer Marangoni-Strömung in Richtung Schmelzbadmitte, siehe dazu Bild 2.8. Aufgrund der an der Oberfläche nach innen gerichteten Marangoni-Strömung entsteht in der Schmelzbadmitte eine nach unten gerichtete Strömung, was zu einer Vergrößerung der Einschweißtiefe führt [13]. Die dabei entstehenden Schweißnähte sind im Vergleich zu einem negativen Gradienten des Oberflächenspannungskoeffizienten schmäler und tiefer (vgl. Bild 2.7). Durch die entstehende Marangoni-Strömung können am Schmelzbadrand Kerben sowie eine Nahtüberhöhung in der Nahtmitte entstehen, siehe dazu Bild 2.8 rechts.

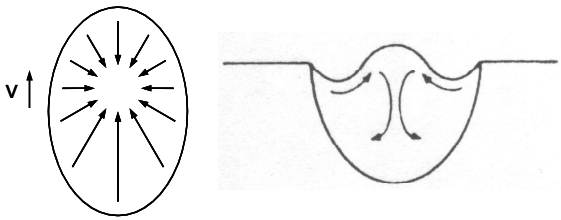

Bild 2.8: Marangoni-Strömung im Schmelzbad (links Draufsicht [14], rechts Querschnitt [15]) aufgrund eines positiven Gradienten des Oberflächenspannung. Die Schmelze strömt von dem kälteren Schmelzbadrand hin zur heißeren Schmelzbadmitte.

2.4.2 Tiefschweißen

Übersteigt in der Wechselwirkungszone die Leistungsdichte die Schwellleistungsdichte, die für Stahl bei etwa 10^6 W/cm^2 und für Aluminium bei etwa 10^7 W/cm^2 liegt, setzt lokale Verdampfung des Werkstoffes ein. Die als Folge des nach oben entweichenden Metalldampfs entstehende Reaktionskraft drückt die Schmelze nach unten und zur Seite, es bildet sich die für das Tiefschweißen typische Dampfkapillare aus [16]. Eine vorhandene Dampfkapillare grenzt die Verfahrensvariante *Tiefschweißen* vom *Wärmeleitungsschweißen* ab.

Diese Dampfkapillare hat einen dem Fokusdurchmesser des Laserstrahls vergleichbaren Durchmesser. Der Dampfdruck in der Dampfkapillare hält diese entgegen der Oberflächenspannung, dem hydrodynamischen Druck und dem hydrostatischen Druck der umgebenden Schmelze offen [11]. Der Laserstrahl dringt in die Dampfkapillare ein. Durch den hohen Einfallswinkel wird der Laserstrahl mehrfach reflektiert und aufgrund dieser Mehrfachreflexionen nahezu vollständig absorbiert. Dadurch wird im Gegensatz zur Fresnel-Absorption eine Gesamtabsorption der Laserleistung von bis zu 95% bei senkrechtem Einfall erreicht (siehe dazu auch Kapitel 2.5.1). In Bild 2.9 ist eine Dampfkapillare dargestellt, bei der Mehrfachreflexionen an zwei Teilstrahlen schematisch aufgezeigt sind.

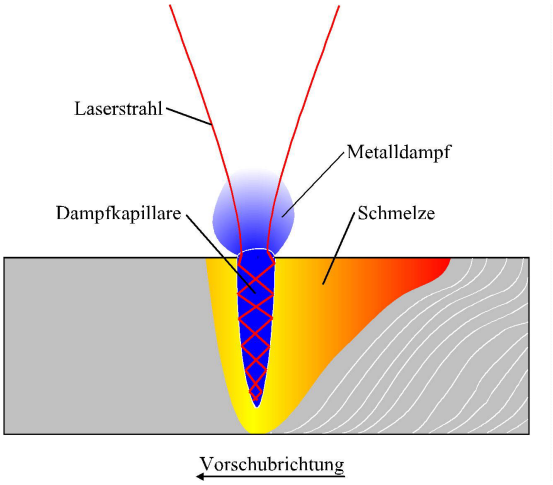

Bild 2.9: Schematische Darstellung des Tiefschweißens mit Dampfkapillare und dargestellten Vielfachreflexionen [17, 18].

An den Stellen, an denen der Laserstrahl auftrifft, erfolgt Energieeinkopplung in die Wand der Dampfkapillare. Die eingekoppelte Energie fließt infolge von Wärmeleitung in das Werkstück und schmilzt den Werkstoff auf. Durch die Vorschubbewegung bewegt sich die Dampfkapillare relativ zum Werkstück entlang der Schweißfuge vorwärts und der aufgeschmolzene Werkstoff umströmt diese seitlich und erstarrt dahinter, da infolge von Wärmeleitung Energie in das Werkstück abfließt.

Durch das fortwährende Verdampfen von Werkstoff entsteht Metalldampf, der aus der Dampfkapillare ausströmt [4, 11]. Beim Laserstrahlschweißen mit Festkörperlasern mit einer Wellenlänge im Bereich von 1 µm ist der Absorptionskoeffizient des Metalldampfs so gering, dass keine nennenswerte Ionisation stattfindet. Die theoretischen und experimentellen Arbeiten [19], [20] und [21] zeigen, dass es sich bei dem Metalldampf – über dem Werkstück sowie in der Dampfkapillare – nicht um ein Plasma, sondern um einen Metalldampf mit relativ geringer Temperatur handelt. Dies wird in [22] bestätigt, wo die Temperatur des Metalldampfs für Aluminiumlegierungen im Bereich 5100 bis 5700 K und für Eisenwerkstoffe im Bereich von 4000 K angegeben wird. In [23] wurde durch Wegblasen der Dampffackel nachgewiesen, dass es sich hierbei nicht um ein Plasma handelt. Die Energieeinkopplung beim Laserstrahlschweißen mit Festkörperlasern erfolgt somit durch Fresnel-Absorption [24].

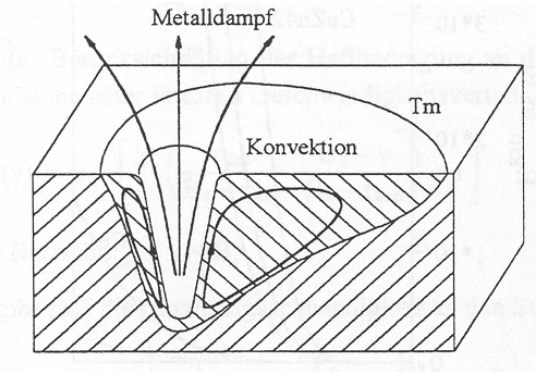

Bild 2.10: Konvektionsströmung durch den ausströmenden Metalldampf [11].

Das fortwährende Verdampfen von Werkstoff und der dadurch aus der Dampfkapillare ausströmende Metalldampf führt zu einer Schubspannung an der Kapillarwand [11]. Diese Schubspannung beschleunigt die Schmelze an der Kapillaroberfläche in Richtung ihrer Öffnung. An den Begrenzungen des Schmelzbades wird diese umgelenkt, wodurch eine rezirkulierende Konvektionsströmung entsteht (Bild 2.10). Mit zuneh-

mender Vorschubgeschwindigkeit nimmt der Einfluss der Kapillarumströmung zu, sodass diese Konvektionsströmung an Bedeutung verliert.

Die beim Wärmeleitungsschweißen entstehende Marangoni-Strömung (siehe auch Kapitel 2.4.1) ist beim Tiefschweißen gleichermaßen vorhanden. Durch Überlagerung von Kapillarumströmung und Marangoni-Strömung kommt es zu einer Wirbelbildung im Schmelzbad [25]. In Bild 2.11 ist dies am Beispiel einer Simulationsrechnung für einen positiven Gradienten der Oberflächenspannung $\delta\sigma/\delta T$ dargestellt. Bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 2 m/min durchläuft ein Partikel etwa 20 Wirbel, bevor es in der Schmelze erstarrt. Es entsteht analog zum Wärmeleitungsschweißen eine zur Dampfkapillare gerichtete Strömung. Ein Großteil der an der Kapillarwand nach unten fließenden Schmelze fließt wieder nach oben, ein kleinerer Anteil steil nach unten [12]. Die aufsteigende Schmelze kühlt infolge von Wärmeleitung ab. Da der Oberflächenspannungskoeffizient in der kälteren Region des Schmelzbades kleiner ist als in der Nähe der heißen Kapillare, wird die Schmelze in Oberflächennähe wieder in Richtung der Kapillare beschleunigt [12]. Wie aus Bild 2.11 ersichtlich ist, nimmt mit steigender Vorschubgeschwindigkeit der Einfluss der Marangoni-Strömung ab, bis er bei hohen Vorschüben bedeutungslos wird.

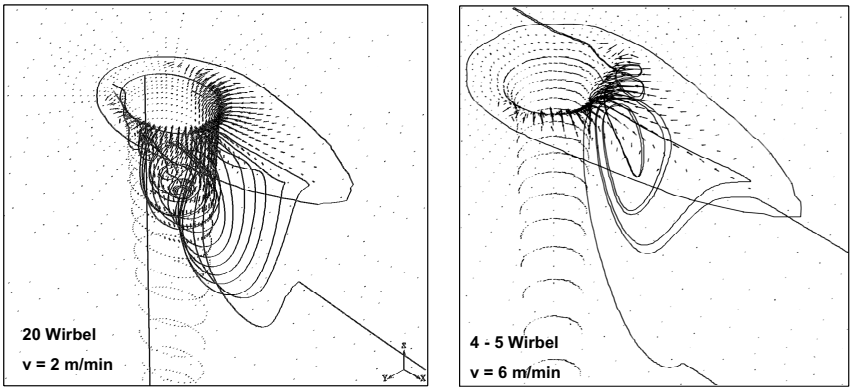

Bild 2.11: Simulation der Marangoni-Strömung beim Tiefschweißen für positiven Gradienten der Oberflächenspannung $\delta\sigma/\delta T$ [25]. Wirbelentstehung durch Überlagerung von Marangoni-Strömung und Umströmung der Dampfkapillare.

Bei einem negativen Gradienten der Oberflächenspannung entsteht ein Wirbel, dessen Strömung an der Oberfläche des Schmelzbades zum Schmelzbadrand hin gerichtet ist. Das nach außen fließende heiße Material führt zu einer Anhebung des Temperaturgradienten, wodurch ein größerer Wärmestrom in den Festkörper fließt. Die nach außen

gerichtete Marangoni-Strömung führt zu einer Verbreiterung der Schweißnaht im oberen Bereich, was als Nagelkopf bezeichnet wird [12]. Analog zu einem negativen Gradienten nimmt mit steigender Vorschubgeschwindigkeit der Einfluss der Marangoni-Strömung ab, bis er bei hohen Vorschüben schließlich ganz verschwindet.

2.4.3 Erstarrung des Schweißgutes

Bevor die Erstarrung der Schmelze beginnen kann, muss an irgendeiner Stelle innerhalb des Schmelzbades ein Keim gebildet werden, der den Ausgangspunkt für die Erstarrung bildet. Beim Schweißen erfolgt die Kristallisationseinleitung an der Wärmeeinflusszone [26]. In der Wärmeeinflusszone vergrößern sich die in unmittelbarer Nähe zum Schmelzbad gelegenen Körner durch eine Überhitzung, deren Größe vom Wärmezyklus abhängig ist. An diesen vergrößerten Körnern an der Schmelzgrenze beginnt die Erstarrung (siehe Bild 2.12), wobei auf jedem dieser Körner ein Kristall wächst [26]. Durch den zeitabhängigen Temperaturverlauf während des Schweißens kann die Korngröße in der Wärmeeinflusszone und somit in der Schweißnaht beeinflusst werden. Dieser Mechanismus ist ähnlich dem Gießen, weshalb beim Schweißen häufig von Gussgefüge gesprochen wird.

Die Kristallisationsformen sind beim Schweißen weitgehend von den Abkühlungsbedingungen abhängig [27]. Durch den schnellen Wärmeentzug in den kalten Grundwerkstoff entsteht ein Wärmefluss senkrecht zu der Schmelzisothermen, sodass Stängelkristalle entstehen, deren Struktur zellular, zellular-dendritisch oder dendritisch ausgebildet sein kann [26]. Bei technischen Werkstoffen ist aufgrund vorhandener Verunreinigungen bzw. Legierungselemente eine dendritische Struktur am wahrscheinlichsten [27].

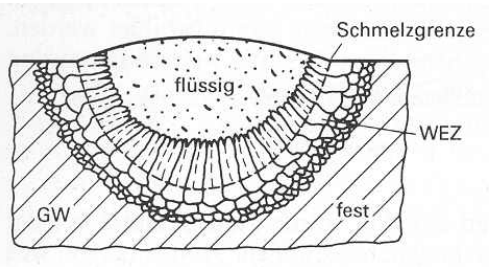

Bild 2.12: Beginnende Kristallisation an den Körnern der Wärmeeinflusszone [26].

Die Erstarrungsfront bewegt sich parallel zum größten Temperaturgradienten, weshalb sich die Korngrenzen etwa senkrecht zur Erstarrungsfront ausbilden. Die vorhandene Struktur kann nur im Mikroschliff mit einer speziellen Ätzung sichtbar gemacht werden, im Makroschliff sind lediglich Stängelkristalle erkennbar. Wie Bild 2.13 zeigt, wachsen die Kristalle ausgehend von der Wärmeeinflusszone in Richtung Schweißnahtmitte. Bei schlanken und tiefen I-Nähten erstarrt die Restschmelze in der Mitte. Dieses Gebiet ist – je nach Legierung – besonders anfällig für das Auftreten von Heißrissen und Lunkern [26]. Die Erstarrungsvorgänge senkrecht zur Vorschubrichtung sind weitestgehend von den aus der Schmelzbadgeometrie resultierenden Wärmeleitungsbedingungen abhängig, die Prozessform des Laserstrahlschweißens – Wärmeleitungs- oder Tiefschweißen – hat darauf keinen Einfluss.

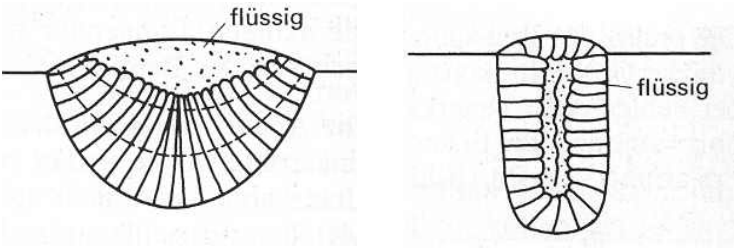

Bild 2.13: Kristallwachstum in Abhängigkeit der Schmelzbadform [26]: linsenförmige Naht (links) und I-Naht (rechts).

Für die Kristallisation in Vorschubrichtung ist ebenfalls der Wärmefluss senkrecht zur Schmelzisothermen ausschlaggebend. Wie Bild 2.14 zeigt, hat die Prozessform einen Einfluss auf die Schmelzbadform in Vorschubrichtung, was in diese Richtung unterschiedliches Kristallwachstum zur Folge hat.

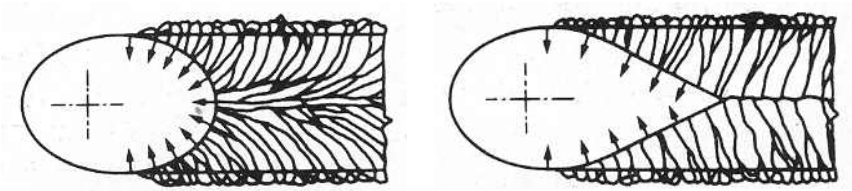

Bild 2.14: Kristallwachstum in Vorschubrichtung beim Wärmeleitungs- (links) und Tiefschweißen (rechts) [26]. Die Pfeile symbolisieren jeweils die Richtung des größten Temperaturgradienten senkrecht zur Schmelzisothermen.

Beim Wärmeleitungsschweißen nimmt das Schmelzbad und damit die Erstarrungsfront eine elliptische Form an (siehe Bild 2.14 links). Die Kristalle beginnen am kalten Rand

der Wärmeeinflusszone zu wachsen, mit Kristallausrichtung senkrecht zur Vorschubrichtung. Je weiter die Kristalle in Richtung der Schmelzbadmitte wachsen, desto mehr werden diese in Vorschubrichtung umgelenkt und wachsen schließlich parallel dazu. Aufgrund der Erstarrungsvorgänge ist die Nahtoberraupe beim Wärmeleitungsschweißen elliptisch geschuppt [26].

Dagegen ergibt sich beim Tiefschweißen aufgrund der Umströmung der Dampfkapillare eine tropfenförmige Verlängerung des Schmelzbades (siehe Bild 2.14 rechts). Die Kristalle wachsen ebenfalls vom kalten Rand der Schweißnaht in Richtung Schweißnahtmitte. Aufgrund der anderen Schmelzbadform und der daraus resultierenden anderen Temperaturgradienten werden die Kristalle im Vergleich zum Wärmeleitungsschweißen weniger stark in Vorschubrichtung umgelenkt. Analog zum Erstarren der I-Nähte resultiert daraus ein ungünstiger Kristallstoß, der wiederum – je nach Legierung – heißrissgefährdet ist [26].

Eine hohe Vorschubgeschwindigkeit kann auch beim Wärmeleitungsschweißen analog zum Tiefschweißen zu einer tropfenförmigen Verlängerung des Schmelzbades führen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass anhand des Kristallwachstums die Prozessformen Wärmeleitungs- und Tiefschweißen nicht charakterisiert werden können.

2.5 Wirkungsgrade beim Laserstrahlschweißen

2.5.1 Einkoppelgrad

Mit dem Absorptionsgrad A bezeichnet man einen Zahlenwert, der die Absorption bei einmaligem Auftreffen der Strahlung auf eine Oberfläche quantifiziert (siehe Kapitel 2.3). Beim *Wärmeleitungsschweißen* (siehe Kapitel 2.4.1) ist aufgrund der nur einmaligen Wechselwirkung zwischen Laserstrahl und Materie der Einkoppelgrad η_A gleich dem Absorptionsgrad A.

Dagegen ergibt sich beim *Tiefschweißen* aufgrund der Vielfachreflexionen innerhalb der Dampfkapillare der Einkoppelgrad als Summe der Einzelabsorptionen. Somit ist ein effizienter Schweißprozess nur im Bereich des Tiefschweißens möglich.

Der Einkoppelgrad gibt den Teil der Laserleistung an, der für den Schweißprozess zur Verfügung steht. Nach [10] lässt sich der Einkoppelgrad mit Hilfe der Beziehung

$$\eta_A = A \cdot \frac{1 + (1 - A) \cdot \left[\frac{d_f}{2t} - \left(\frac{d_f}{2t} \right)^2 \right]}{A \cdot \left(1 - \frac{d_f}{2t} \right) + \frac{d_f}{2t}} \tag{2.20}$$

abschätzen. Dieser Beziehung liegt eine Formel zur Berechnung der Hohlraumabsorption zugrunde [28], wobei der sphärische Hohlraum hier durch eine der Dampfkapillare entsprechenden kegelförmigen Geometrie ersetzt wurde. Der Einkoppelgrad ist also entsprechend Gleichung (2.20) nicht nur von den Materialeigenschaften, sondern auch von der Kapillarform und damit vom sogenannten Aspektverhältnis

$$A_F = \frac{t}{d_f} \tag{2.21}$$

abhängig, das aus dem Quotienten von Einschweißtiefe t und Fokusdurchmesser d_f gebildet wird. Dieses Aspektverhältnis A_F wird im Folgenden als Aspektverhältnis Fokus bezeichnet. Mit steigendem Aspektverhältnis steigt der Einkoppelgrad zunächst stark an und nähert sich dann asymptotisch der vollständigen Einkopplung an, siehe Bild 2.15.

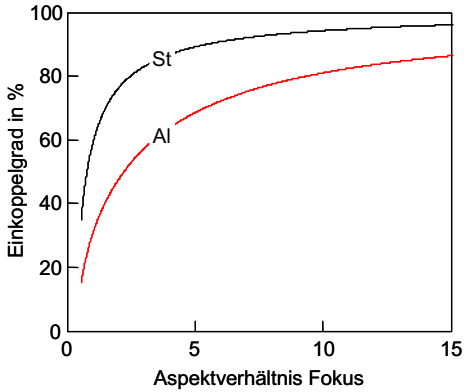

Bild 2.15: Für Nd:YAG-Laserstrahlung berechneter Einkoppelgrad als Funktion des Aspektverhältnisses A_F (Stahl: A=35%, Aluminium: A=15%).

Ein steigender Einkoppelgrad ergibt sich für eine steigende Einschweißtiefe bei gleichbleibendem Fokusdurchmesser bzw. bei sinkendem Fokusdurchmesser und gleichbleibender Einschweißtiefe. Dies bedeutet, dass mit einem kleineren Fokusdurchmesser aufgrund einer besseren Fokussierbarkeit ein größerer Einkoppelgrad erreicht werden

kann. Wie aus Bild 2.15 ebenfalls deutlich wird, ist bei gleichem Aspektverhältnis mit Stahl aufgrund des im Vergleich zu Aluminium höheren Absorptionsgrads ein höherer Einkoppelgrad zu erzielen. In [29] wurde bei einem Aspektverhältnis von etwa 10 bis 12 ein Einkoppelgrad bei Stahl von etwa 90% und bei Aluminium von etwa 70-75% experimentell nachgewiesen.

2.5.2 Thermischer Wirkungsgrad

Der thermische Wirkungsgrad η_{th} beschreibt, in welchem Maße die vom Werkstück absorbierte Laserleistung zur Erzeugung der Schweißnaht umgesetzt wird. Die allgemeine Formulierung des thermischen Wirkungsgrades lautet [10]:

$$\eta_{th} = \frac{Nutzleistung}{absorbierte\ Laserleistung} = \frac{Nutzvolumen \cdot spezifischer\ Wärmebedarf}{absorbierte\ Energie}. \quad (2.22)$$

Das Nutzvolumen entspricht dem Volumen der Schweißnaht. Der thermische Wirkungsgrad ergibt sich somit zu

$$\eta_{th} = \frac{F \cdot v\left\{\rho\left[c_p (T_s - T) + h_s\right]\right\}}{\eta_A \cdot P_L}. \quad (2.23)$$

Der in Gleichung (2.23) in geschweifter Klammer angegebene Ausdruck enthält die werkstoffabhängigen Größen. Um den thermischen Wirkungsgrad eines Schweißprozesses werkstoffunabhängig darstellen zu können, ist in [30] eine normierte Darstellung mit

$$Y = \frac{v \cdot b}{\kappa} \quad (2.24)$$

als normierte Geschwindigkeit Y und

$$X = \frac{\eta_A \cdot P_L}{t \cdot \lambda_{th} \cdot T_S} \quad (2.25)$$

als normierte Leistung X vorgeschlagen. Dabei wird von einer Linienwärmequelle ausgegangen, wobei die eingekoppelte Wärme senkrecht dazu abgeleitet wird [30]. Bei Durchschweißungen ist dies gerechtfertigt, bei Einschweißungen mit großem Aspektverhältnis A_F hat sich diese Näherung als brauchbar erwiesen [10]. Der thermische Wirkungsgrad ist demzufolge als

$$\eta_{th} = \frac{Y}{X} \tag{2.26}$$

definiert [10]. In [30] werden für die Grenzbereiche geringer und hoher Vorschubgeschwindigkeiten analytische Näherungslösungen für Gleichung (2.26) angegeben. Der auf diesem Ansatz beruhende thermische Wirkungsgrad ist in [10] berechnet worden und in Bild 2.16 dargestellt. Für kleine normierte Geschwindigkeiten (Y < 4) ist der thermische Wirkungsgrad gering, was mit hohen Wärmeleitungsverlusten verbunden ist. Durch eine Erhöhung der Geschwindigkeit steigt der thermische Wirkungsgrad zunächst stark an und nähert sich dann asymptotisch einem Wert von 48% [10]. Der in Bild 2.16 dargestellte thermische Wirkungsgrad ist im Sinne des Ansatzes von [30] als theoretische Obergrenze zu betrachten, da die Berechnung zum einen auf analytischen Näherungslösungen beruht und zum anderen nicht alle Verlustmechanismen, wie z.B. Wärmestrahlung und ausströmender Metalldampf, Berücksichtigung finden.

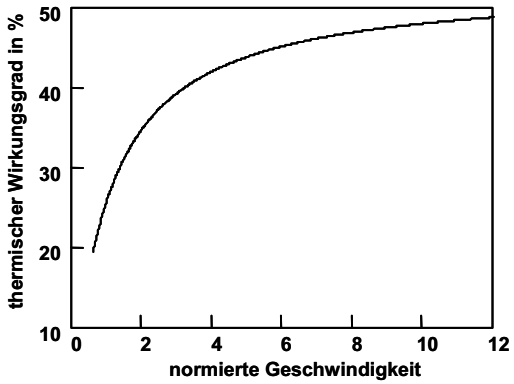

Bild 2.16: Mit Näherungslösungen berechneter thermischer Wirkungsgrad als Funktion der normierten Geschwindigkeit Y (nach [10, 30]).

In diesem Zusammenhang ist festzuhalten, dass auf einer Vielzahl von experimentellen Daten beruhende und neueste Stoffwerte berücksichtigende Berechnungen zeigen, dass der thermische Wirkungsgrad beim Laserstrahlschweißen 66% erreichen kann [31].

2.5.3 Prozesswirkungsgrad

Der Prozesswirkungsgrad η_{Pr} ergibt sich als Produkt aus thermischem Wirkungsgrad und Einkoppelgrad:

$$\eta_{Pr} = \eta_{th} \cdot \eta_A \tag{2.27}$$

und mit Gleichung (2.23) schließlich zu

$$\eta_{Pr} = \frac{F \cdot v \left\{ \rho \left[c_p (T_s - T) + h_s \right] \right\}}{P_L}. \tag{2.28}$$

Wie aus Bild 2.15 für den Einkoppelgrad und aus Bild 2.16 für den thermischen Wirkungsgrad deutlich wird, kann selbst unter den günstigsten Einkoppelbedingungen aufgrund von unvermeidbaren Wärmeleitungsverlusten ein Prozesswirkungsgrad von maximal 50% erzielt werden.

3 Systemtechnik, Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Hochleistungsfestkörperlaser haben sich in der Industrie als leistungsfähige Werkzeuge für das Laserstrahlschweißen etabliert. In diesem Kapitel werden die in dieser Arbeit verwendeten Strahlquellen sowie die dafür benötigte Systemtechnik vorgestellt.

3.1 Hochleistungs-Festkörperlaser

In diesem Kapitel wird auf die prinzipiellen Unterschiede der verschiedenen Hochleistungs-Festkörperlaser eingegangen und deren wichtigste Eigenschaften – Laserleistung, Strahlqualität und Wirkungsgrad – miteinander verglichen.

3.1.1 Lampengepumpte Stablaser

Der im Hochleistungsbereich derzeit wichtigste Vertreter der lampengepumpten Festkörperlaser ist der Nd:YAG-Laser. Das laseraktive Medium ist ein stabförmiger Yttrium-Aluminium-Granat-Einkristall (YAG) [32], der als Wirtsmaterial verwendet wird. In dem YAG-Kristall sind ca. 1% der Y^{3+}-Ionen durch Nd^{3+}-Ionen ersetzt [33]. Die Anregung erfolgt über ebenfalls stabförmige Gasentladungslampen [4]. In einem zylindrischen Reflektor mit doppelelliptischen Querschnitt sind Laserkristall und Gasentladungslampen achsparallel angeordnet. Die Lampen sind jeweils in einer Brennlinie angeordnet, der Laserkristall befindet sich in der gemeinsamen Brennlinie [4]. Die als Wärme in dem Wirtsmaterial anfallende Verlustenergie gelangt durch Wärmeleitung an die direkt vom Kühlwasser umspülte Mantelfläche des Kristalls [34]. Bedingt durch die Kühlung über die Mantelfläche entsteht ein Temperaturgradient und damit ein Gradient des Brechungsindex in senkrechter Richtung zum Laserstrahl [35], was aufgrund einer thermischen Linsenwirkung zu einer Verschlechterung der Strahlqualität führt [36]. Derzeit sind lampengepumpte cw-Nd:YAG-Laser der Wellenlänge 1064 nm mit einer Ausgangsleistung von 4 kW kommerziell erhältlich und im industriellen Einsatz. Diese Geräte sind entsprechend ihres Strahlparameterprodukts von

25 mm·mrad mit Lichtleitkabeln mit einem Kerndurchmesser von 600 µm ausgerüstet. Der Gesamtwirkungsgrad dieser Laserstrahlquellen beträgt etwa 3-5%.

3.1.2 Diodengepumpter Scheibenlaser

Durch die Verwendung von Diodenlasern anstelle der Gasentladungslampen kann die thermische Linse im stabförmigen laseraktiven Medium der Festkörperlaser zwar verringert [37], aber das Strahlparameterprodukt dabei nur um 36% verkleinert werden. Die Verringerung der thermischen Linse und die Steigerung der Strahlqualität ist daher nur mit einem neuen Laserkonzept wie dem Scheibenlaser möglich [34, 35, 37, 38, 39].

In Bild 3.1 ist eine Prinzipskizze des am IFSW entwickelten Yb:YAG-Scheibenlasers dargestellt [40]. Als laseraktives Medium wird eine sehr dünne Scheibe verwendet, die mit einer Seite auf einer Wärmesenke montiert ist [41]. Die kurze Distanz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke resultiert in einem homogenen radialen Temperaturprofil innerhalb des Laserkristalls, was zu einer minimierten thermischen Linse [42] und damit zu einer höheren Strahlqualität führt [43]. Eine Yb:YAG-Kristallscheibe für Scheibenlaseranwendung hat typischerweise einen Durchmesser von 7 mm, eine Dicke von etwa 0,3 mm und eine Dotierung von 8-13% [44]. Der Resonator besteht aus der Rückseite der Scheibe als aktiver Spiegel und dem Auskoppelspiegel [38]. Eine optimale Absorption des Pumplichts wird bei gegebener Scheibendicke durch Mehrfachdurchgänge des Pumplichts durch die Scheibe realisiert. Mit einer einzelnen Scheibe kann eine Ausgangsleistung von über 4000 W mit einem optisch-optischen Wirkungsgrad von 60% erreicht werden, was einen Gesamtwirkungsgrad von über 20% realistisch erscheinen lässt [45, 46]. Das Scheibenlaserkonzept ermöglicht damit die Realisierung von Festkörperlasern mit gleichzeitig hohem Wirkungsgrad, hoher Ausgangsleistung und guter Strahlqualität.

Heute sind diodengepumpte cw-Yb:YAG-Scheibenlaser der Wellenlänge 1030 nm mit einer Ausgangsleistung von 1 kW bis 4 kW kommerziell erhältlich und stehen am Anfang ihrer industriellen Einführung. Für diese Arbeit standen Scheibenlaser mit einer Ausgangsleistung von 1,5 kW sowie 3 kW zur Verfügung. Diese Geräte sind entsprechend der Strahlqualität von 6 mm·mrad mit Lichtleitkabeln mit einem Kerndurchmesser von 150 µm ausgerüstet, im Zuge dieser Untersuchungen wurden auch Lichtleitkabel mit einem Kerndurchmesser von 200 µm verwendet. Der Gesamtwirkungsgrad dieser Laserstrahlquellen beträgt etwa 20%.

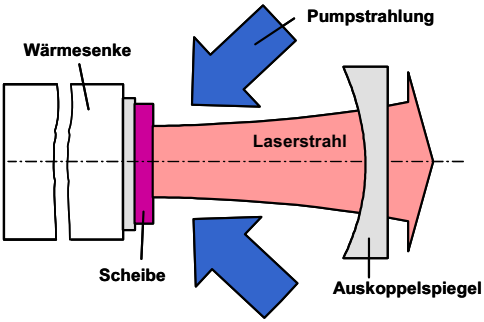

Bild 3.1: Prinzipskizze eines Scheibenlasers [40].

3.2 Strahlführung und -formung

Zur Strahlführung von Hochleistungsfestkörperlasern, die üblicherweise zum Laserstrahlschweißen in der Industrie verwendet werden, kommen ausschließlich Lichtleitkabel zum Einsatz. In diesem Kapitel werden die zum Schweißen verwendeten Lichtleitkabel sowie Fokussieroptiken erläutert.

Bild 3.2: Bearbeitungsoptiken BEO D35 (links) und BEO D70 [37].

Bei der Einstrahltechnik werden Lichtleitkabel (LLK) verwendet, deren Kerndurchmesser an die Strahlqualität der eingesetzten Laserstrahlquelle angepasst sind, siehe dazu auch Kapitel 3.1. Nach dem Lichtleitkabel wird der Laserstrahl kollimiert und anschließend mit der Fokussierlinse auf das Werkstück abgebildet, was einer Abbildung des Faserendes auf die Werkstückoberfläche entspricht. Bei dieser Arbeit kommen die Standard-Bearbeitungsoptiken BEO D70 (Kollimationslinse $f_k = 200$ mm;

Fokussierlinsen $f_f = 100$ / 150 / 200 mm) und BEO D35 (Kollimationslinse $f_k = 100$ mm; Fokussierlinse $f_f = 100$ mm) der Firma TRUMPF Laser zum Einsatz (siehe Bild 3.2). Erzielbare Abbildungsmaßstäbe β und Fokusdurchmesser d_f können der Tabelle 3.1 entnommen werden. Das Laserstrahlschweißen mit der Einstrahltechnik stellt den Stand der Technik dar.

	BEO D70			**BEO D35**	
f_k [mm]	200			100	
f_f [mm]	100	150	200	100	140
β	0,5	0,75	1,0	1,0	1,4
d_f [µm] @ LLK 600µm	300	450	600	600	840
d_f [µm] @ LLK 200 µm	100	150	200	200	280
d_f [µm] @ LLK 150 µm	75	112,5	150	150	210

Tabelle 3.1: Erzielbare Fokusdurchmesser der Standard-Bearbeitungsoptiken.

3.3 Prozessadapter

Zwischen der Bearbeitungsoptik und dem Werkstück kommt der Prozessadapter (siehe Bild 3.3) zum Einsatz. Die zentrale Aufgabe des Prozessadapters ist der Schutz der Bearbeitungsoptik vor Verschmutzung durch beim Schweißprozess entstehende Spritzer und/oder Schmauch mit Hilfe einer quer zum Laserstrahl angeordneten Überschall-Luftströmung, welche als Querjet bezeichnet wird [47]. Zusätzlich wird die Fokussierlinse durch ein Schutzglas geschützt. Eine Schutzglasschublade ermöglicht einen schnellen Schutzglaswechsel. Des Weiteren können mit Hilfe des Prozessadapters die für den Schweißprozess erforderlichen Prozessmedien, wie z.B. Schutzgas und Schweißzusatzwerkstoff, reproduzierbar zugeführt werden. Im Gegensatz zu der Bearbeitungsoptik erfolgt mit dem Prozessadapter keine Strahlführung oder -formung.

Durch die Verfügbarkeit von Scheibenlasern mit im Vergleich zu Standard-Festkörperlasern besserer Fokussierbarkeit kann nun erstmals auch im Hochleistungsbereich die in Bild 3.2 dargestellte Bearbeitungsoptik BEO D35 für das Laserstrahlschweißen eingesetzt werden. Dies erforderte zu Beginn dieser Arbeit die Anpassung der entsprechenden Systemtechnik an die neue Stahlquelle und somit die Konstruktion eines Prozessadapters für die Bearbeitungsoptik BEO D35 (siehe Bild 3.3) [48].

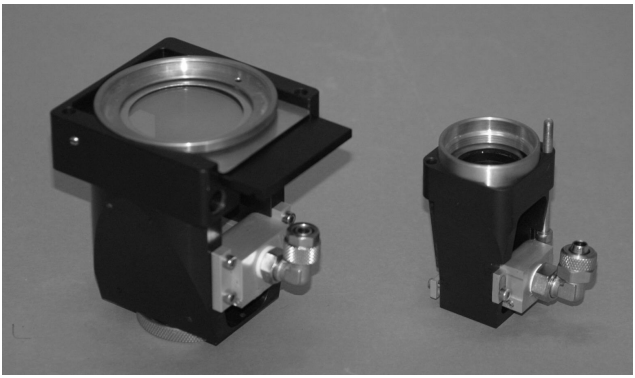

Bild 3.3: Prozessadapter für die Bearbeitungsoptiken BEO D70 (links) und BEO D35 [48].

Untersuchungen in [49] haben gezeigt, dass die durchschnittliche Spritzergröße bei 0,5 mm und die gemittelte Vertikalgeschwindigkeit bei 3,5 m/s liegt. Im einfachsten Fall kann eine bessere Schutzwirkung des Querjets durch eine Erhöhung des Gasdurchsatzes erreicht werden [50], was allerdings mit steigenden Betriebskosten verbunden ist. Weitaus vielversprechender ist daher die optimale Auslegung der Querjetdüse einerseits sowie andererseits die Anpassung der Umgebung der Querjetströmung [51], [52]. Aus diesen Untersuchungen ist der in Bild 3.4 dargestellte Querjet hervorgegangen, der in der Industrie sehr häufig eingesetzt wird.

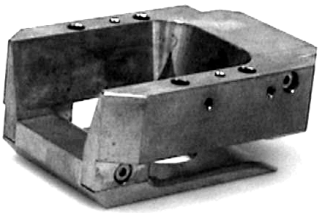

Bild 3.4: Der am IFSW entwickelte Querjet für einen optimalen Spritzerschutz [51], [52].

Mittels des Querjets aus Bild 3.4 wurde die Ablenkung der Spritzer untersucht. Hierzu wurde der maximale Öffnungswinkel γ (siehe dazu auch Bild 3.6) zwischen flachstem und steilstem in Vorschubrichtung fliegenden Spritzer bestimmt. Bild 3.5 zeigt für verschiedene Betriebsdrücke des Querjets den maximalen Öffnungswinkel als Funktion der Vorschubgeschwindigkeit beim Laserstrahlschweißen von Aluminium. Der Druck bei ausgeschaltetem Querjet beträgt etwa das zweifache des Betriebsdruckes. Bei einem Betriebsdruck von 4,6 bar beträgt der maximale Öffnungswinkel etwa 25° (v = 1 m/min). Mit steigendem Vorschub entstehen weniger und kleinere Spritzer,

weshalb sich der Öffnungswinkel verringert. Die Verringerung des Betriebsdruckes führt zu einer verringerten Effizienz der Spritzerablenkung und somit zu einer Vergrößerung des Öffnungswinkels, was letztlich zu einer stärkeren Verschmutzung des Schutzglases führt. In der Praxis führt eine nicht optimale Luftzufuhr des Querjets häufig zu Druckverlusten und damit zu einem verringerten Betriebsdruck und zur Schutzglasverschmutzung. Hinsichtlich der Funktionsweise und der Verringerung der Betriebskosten ist die Auslegung des Querjets sowie dessen Luftzufuhr sehr wichtig und ohne großen Aufwand möglich.

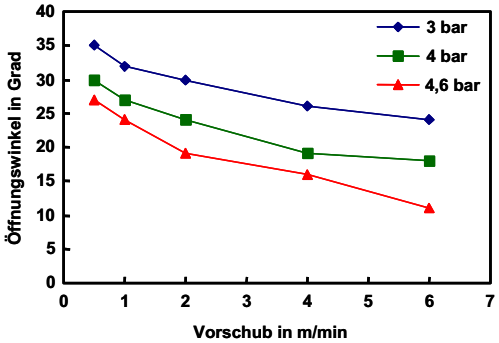

Bild 3.5: Maximaler Öffnungswinkel als Funktion des Vorschubs für verschiedene Betriebsdrücke (P_L = 1 kW, Aluminium) mit dem Querjet aus Bild 3.4 [53].

Bild 3.6 zeigt einen Prozessadapter mit weiter optimiertem Querjet in offener Bauweise, mit dem der Spritzerflug auch im Inneren des Prozessadapters untersucht werden kann. Die durch die Laserstrahlaustrittsöffnung in das Innere des Prozessadapters fliegenden Spritzer werden optimal abgelenkt. Kleine und langsame Spritzer werden um etwa 90° abgelenkt und verlassen den Prozessadapter in einer nahezu horizontalen Flugbahn. Bei energiereicheren Spritzern ist der Ablenkwinkel kleiner. Bei diesem optimal eingestellten Querjet mit einem Betriebsdruck von 4,6 bar ergibt sich ein Öffnungswinkel von $\gamma = 15°$ ($v = 1$ m/min). Im Vergleich zu den Daten des bisherigen Querjets (siehe Bild 3.5) kann durch die Optimierung bei einem Vorschub von 1 m/min der Öffnungswinkel γ um 10° reduziert werden. Mit dem Querjet aus Bild 3.6 lässt sich ein optimaler Optikschutz mit größerer Standzeit des Schutzglases und damit reduzierten Betriebskosten realisieren.

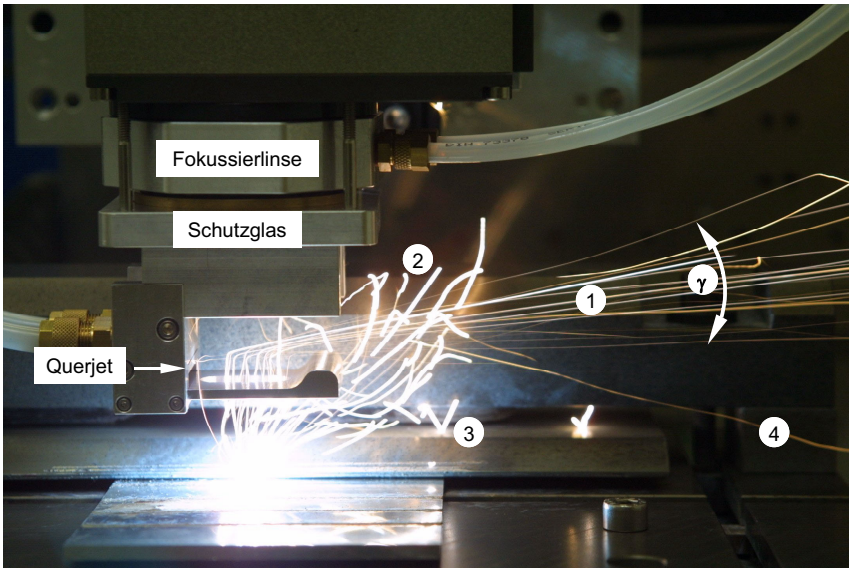

Bild 3.6: Prozessadapter mit optimiertem Querjet [54] in offener Bauweise zur Untersuchung des Spritzerflugs beim Laserstrahlschweißen von Aluminium mit einem Vorschub von v = 1 m/min (1: abgelenkte Spritzer in Vorschubrichtung mit dem Öffnungswinkel γ; 2: Spritzer, die vor dem Prozessadapter vorbeifliegen; 3: Spritzerabprall am Spannmittel; 4: abgeprallter Spritzer, der die Querjetströmung schräg zur Vorschubrichtung durchquert).

Neben einem effektiv arbeitenden Querjet ist aber auch die Anpassung der Umgebung der Querjetströmung von großer Bedeutung, damit diese keinen Einfluss auf das Schweißergebnis hat [47], [50]. Eine nicht optimale Anpassung der Querjetumgebung kann einerseits eine blasende und andererseits eine saugende Wirkung des Prozessadapters zur Folge haben. Aufgrund eines blasenden Prozessadapters kann es zu einer Beeinflussung der Schutzgasabdeckung durch Wegblasen des Schutzgases kommen, wodurch sich die Schweißnahtqualität verschlechtert. Im Extremfall führt eine blasende Wirkung zu einem Schmelzaustrieb aus dem Schmelzbad.

Ein saugender Prozessadapter kann ebenfalls die Schutzgasabdeckung und damit die Schweißnahtqualität negativ beeinflussen, in dem das Schutzgas in Richtung des Querjets abgesaugt wird. In Bild 3.7 sind hierzu Schlierenaufnahmen der beim Schweißprozess entstehenden heißen Gase dargestellt, mit deren Hilfe die Front zwischen kalter und warmer Luft aufgrund unterschiedlicher Brechungsindices sichtbar gemacht wird. Die saugende Wirkung bei nicht optimal eingestelltem Prozessadapter ist deut-

lich zu erkennen. Das heiße Gas wird in Richtung der Strahlaustrittsöffnung des Prozessadapters gesaugt. Neben dem Schutzgas werden auch Spritzer und Schmauch abgesaugt, was zu einer Verringerung der Schutzglasstandzeit führen kann.

Die optimale Auslegung von Querjet und Prozessadapter ist somit nicht nur hinsichtlich wirtschaftlicher Gesichtspunkte, sondern auch für ein gutes Schweißergebnis von großer Bedeutung.

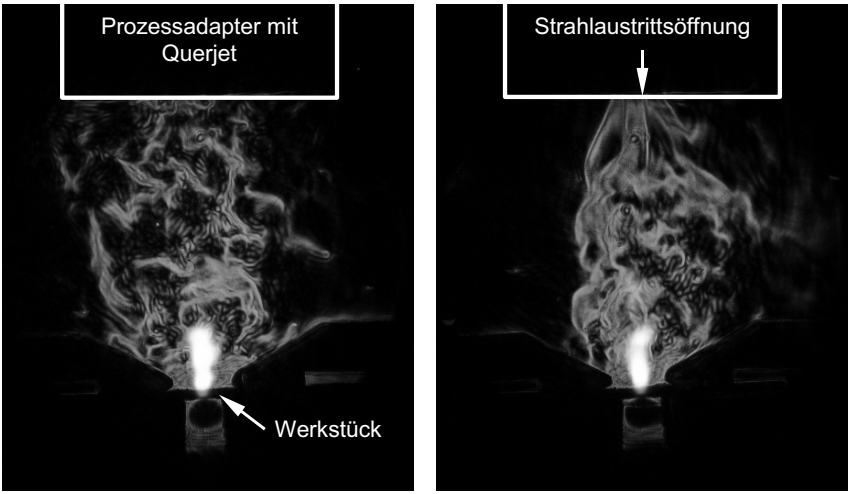

Bild 3.7: Schlierenbilder des Schweißprozesses: optimal eingestellter (links) und saugender Prozessadapter (rechts).

3.4 Versuchsaufbau und -durchführung

Die Versuche zur Untersuchung des Übergangs vom Wärmeleitungs- zum Tiefschweißen (Kapitel 4) sowie die zur Untersuchung des Einflusses der Fokussierbarkeit (Kapitel 5.1) wurden an einer 4-Achsen- Laserbearbeitungsstation des Typs LASMA 10.54 der Firma TRUMPF-Laser (siehe Bild 3.8) durchgeführt. Mit einem Verfahrweg von bis zu einem Meter, einer Bearbeitungsgeschwindigkeit von maximal 20 m/min und einer Positioniergenauigkeit von ±0,02 mm ist diese Anlage besonders gut für Grundlagenuntersuchungen geeignet. Zur Untersuchung des Folienschweißens (Kapitel 5.2) waren Vorschubgeschwindigkeiten von $v > 20$ m/min erforderlich, weshalb hier ein hochdynamischer Lineardirektantrieb der Firma SKF (ohne Abb.) zum Einsatz kam. Hiermit konnten Vorschubgeschwindigkeiten von 80 m/min erreicht werden.

Bild 3.8: Bearbeitungsstation LASMA 10.54.

Es wurden Proben der Größen 50 mm x 20 mm (Kapitel 4) sowie 100 mm x 20 mm (Kapitel 5) verwendet. Um den Aufwand sowie die Kosten der Versuchsauswertung zu reduzieren, wurde von allen Schweißproben nur ein Querschliff in einem Abstand von 12 mm bis 20 mm vom Schweißnahtanfang angefertigt und anschließend Einschweißtiefe, Nahtbreite sowie Nahtquerschnittsfläche gemessen. Somit repräsentiert jeder Datenpunkt nur einen Querschliff. Aufgrund von Fluktuationen während des Schweißprozesses (z.B. von der Laserleistung) kann es zu einer Abweichung einzelner Datenpunkte vom eigentlichen Kurvenverlauf kommen. Dies ist insbesondere bei Aluminiumlegierungen zu beobachten, wo die prozessbedingten Fluktuationen stärker ausgeprägt sind als bei den Stahlwerkstoffen. Aus diesem Grund werden Aussagen, denen experimentell ermittelte Daten zugrunde liegen, anhand von klar erkennbaren Tendenzen getroffen.

4 Übergang vom Wärmeleitungs- zum Tiefschweißen: die Schwelle

Das Laserstrahlschweißen kann, wie bereits in Kapitel 2.4 beschrieben, in die Prozessformen *Wärmeleitungsschweißen* und *Tiefschweißen* eingeteilt werden. Der Übergang vom Wärmeleitungs- zum Tiefschweißen wird als Schwelle bezeichnet. Trotz langjähriger Forschung auf dem Gebiet des Laserstrahlschweißens und dessen mittlerweile zahlreicher Anwendungen sind die Einflussfaktoren auf die Schwelle keinesfalls vollständig geklärt. Generell wird angenommen, dass zur Erzeugung einer Dampfkapillare eine Leistungsdichteschwelle zu überschreiten sei. Daraus ist zu schließen, dass die Fokussierbarkeit einen sehr großen Einfluss haben muss, da die Leistungsdichte proportional zum Quadrat derselben ansteigt [5]. Andererseits wurde u.a. in [13], [55], [56], [57], [58] und [59] berichtet, dass selbst mit Diodenlasern, deren Fokussierbarkeit gering ist, ein Tiefschweißeffekt zu erzeugen wäre. Durch ausführliche Untersuchungen an Stahl und Aluminium mit unterschiedlichen Laserstrahlquellen soll ein Beitrag zur Klärung geleistet werden, welchen Einfluss die Fokussierbarkeit auf die Schwelle hat.

4.1 Grundlagen

Der Tiefschweißprozess ist durch eine Energieschwelle gekennzeichnet [40]. Diese existiert angesichts der Tatsache, dass zur Ausbildung einer Dampfkapillare in dem zu bearbeitenden Material Dampftemperatur erreicht werden muss, die sich aus der Bilanz zwischen zu- und abgeführter Energie in der Wechselwirkungszone einstellt. Nach vereinfachten Überlegungen in [60] und [11] ergibt sich die Maximaltemperatur T_{max} an der Oberfläche unter Annahme eines quadratischen Strahlflecks zu

$$T_{\max} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{A \cdot P_L}{2 \cdot r_f \cdot \lambda_{th} \cdot \sqrt{\frac{Pe}{2} + 1{,}1}} . \tag{4.1}$$

Dabei ist die Péclet-Zahl Pe mit der Vorschubgeschwindigkeit v und dem Strahlradius r_f bzw. dem Strahldurchmesser d_f zu bilden [11] und ergibt sich zu

$$Pe = \frac{v \cdot r_f}{\kappa} = \frac{v \cdot d_f}{2 \cdot \kappa}. \tag{4.2}$$

In der Thermodynamik wird die Péclet-Zahl Pe als dimensionslose Vergleichszahl verwendet, welche auf der Basis der Ähnlichkeitsmechanik die Darstellung von konvektiven Strömungsvorgängen mit deutlich verminderter Zahl von Einflussgrößen erlaubt, wodurch sich die Wärmeübergangsgesetze allgemein für geometrisch ähnliche Körper und verschiedene Stoffe einheitlich formulieren lassen [61]. Die Péclet-Zahl aus Gleichung (4.2) hat nur rein formal den gleichen Ausdruck wie die thermodynamische Vergleichszahl. Hiermit wird lediglich beschrieben, wie sich die kreisförmig verlaufenden Isothermen bei ruhendem Laserstrahl (v = 0 m/min) durch die Vorschubgeschwindigkeit beim Schweißen verändern.

Wie bereits erwähnt, setzt der Tiefschweißprozess durch Ausbildung einer Dampfkapillare ein, wenn im Brennfleck die Verdampfungstemperatur T_V erreicht wird. Somit ist die Prozessform Tiefschweißen durch eine vorhandene Dampfkapillare definiert. Setzt man demnach in Gleichung (4.1) die Maximaltemperatur T_{max} gleich der Verdampfungstemperatur T_V und für den Strahlradius den Strahldurchmesser gemäß $d_f = 2 \cdot r_f$ ein, so kann die Schwelle anhand der nachfolgenden Gleichung abgeschätzt werden [11]:

$$\frac{P_S}{d_f} = \underbrace{1{,}25\sqrt{\pi}}_{B} \cdot \underbrace{\frac{T_v \cdot \lambda_{th}}{A}}_{M} \cdot \underbrace{\sqrt{\frac{Pe}{2} + 1{,}1}}_{V} = B \cdot M \cdot V. \tag{4.3}$$

Der Quotient aus Laserleistung und Fokusdurchmesser wird im Folgenden als Strahlparameterquotient bezeichnet. Nach [62] lässt sich die Gleichung (4.3) in den Strahlfaktor B (beam), den Materialfaktor M sowie den geschwindigkeitsabhängigen Faktor V (velocity) aufteilen. Der im Strahlfaktor B enthaltene Korrekturwert 1,25 gilt für ein Top-Hat-Profil, das bei fasergeführten Festkörperlasern im Fokus (abgebildetes Glasfaserende) vorhanden ist. Der Materialfaktor M berücksichtigt die Materialeigenschaften Verdampfungstemperatur T_V, die Wärmeleitfähigkeit λ_{th} sowie den Absorptionsgrad A. Im Faktor V findet die Vorschubgeschwindigkeit Berücksichtigung.

Nach theoretischen Überlegungen in [11] sind direkt an der Schwelle die Energiebilanzen sowohl für das Wärmeleitungs- als auch für das Tiefschweißen gleichzeitig erfüllt. Dementsprechend muss Energiegleichgewicht zwischen der absorbierten und der abgeleiteten Energie für beide Prozessformen und den daraus resultierenden Wechselwirkungszonen bestehen. In [11] wird das in Bild 4.1 dargestellte einfache Modell zur

Abschätzung der Wärmeströme verwendet. Die Dampfkapillare ist hierbei aus einfachen geometrischen Grundelementen zusammengesetzt.

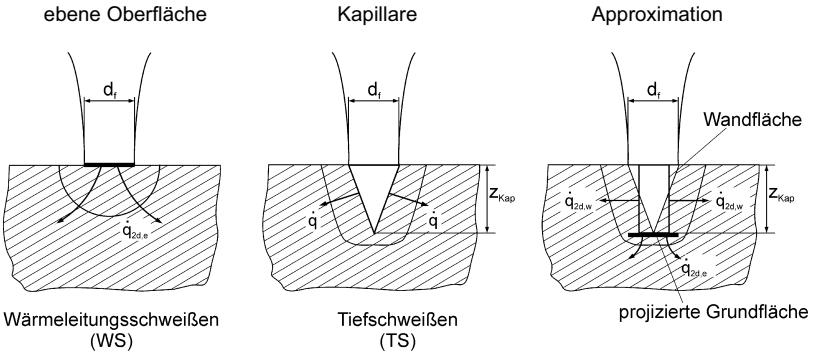

Bild 4.1: Modell zur Bestimmung der Wärmeströme nach [11]. Ebene Oberfläche für das Wärmeleitungsschweißen, kegelförmige Dampfkapillare für das Tiefschweißen sowie die im Modell verwendete Approximation.

Mit dem über die bestrahlte Fläche abfließenden Wärmestrom ergibt sich die Energiebilanz des Wärmeleitungsschweißens zu

$$A \cdot P_L = \pi \cdot r_f^2 \cdot \dot{q}_{2d,e}. \tag{4.4}$$

Die Approximation für das Tiefschweißen führt zu

$$\eta_A \cdot P_L = \pi \cdot r_f^2 \cdot \dot{q}_{2d,e} + \pi \cdot r_f \cdot z_{Kap} \cdot \dot{q}_{2d,w}, \tag{4.5}$$

wobei sich der insgesamt abfließende Wärmestrom aus dem über die projizierte Grundfläche sowie dem über die Wand der Dampfkapillare seitlich abfließenden zusammensetzt. Direkt an der Schwelle befinden sich die jeweiligen Flächen gerade auf Dampftemperatur, sodass sich die Gleichungen (4.4) und (4.5) zu

$$\frac{\eta_A}{A} = \frac{\pi \cdot r_f^2 \cdot \dot{q}_{2d,e} + \pi \cdot r_f \cdot z_{Kap} \cdot \dot{q}_{2d,w}}{\pi \cdot r_f^2 \cdot \dot{q}_{2d,e}} \tag{4.6}$$

zusammenführen lassen. Aus diesem einfachen Modell sowie aus Gleichung (4.3) lässt sich der Übergang vom Wärmeleitungs- zum Tiefschweißen sowie das Prozessfenster des Tiefschweißens ableiten, welches in Bild 4.2 in Abhängigkeit der Strahl- und Werkstoffparameter skizziert ist. Die Lage der Schwelle wird im Wesentlichen von den Materialeigenschaften Verdampfungstemperatur, Wärmeleitfähigkeit und Absorp-

tionsgrad sowie der Wellenlänge bestimmt. Die Sprunghöhe der Einschweißtiefe beim Überschreiten der Schwelle wird ebenfalls von den Materialeigenschaften festgelegt, sodass für Aluminiumlegierungen aufgrund des geringen Absorptionsgrades sowie der hohen Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu Stahlwerkstoffen mit einem ausgeprägteren Sprung zu rechnen ist. Nach unten wird das Prozessfenster für das Tiefschweißen durch das Wärmeleitungsschweißen, nach oben durch die Plasmaabschirmung begrenzt. Die Plasmaabschirmung führt auch mit weiter steigender Leistung zu einem Absinken der Einschweißtiefe, bis der Schweißprozess im Extremfall vollständig zum Erliegen kommt. Der Absorptionskoeffizient α des Plasmas steigt mit dem Quadrat der Wellenlänge λ an, weshalb sich das Prozessfenster bei kleinerer Wellenlänge zu einer höheren Laserleistung hin verschiebt. Bei der Verwendung von Festkörperlasern der Wellenlänge $\lambda = 1064$ nm (Nd:YAG) und $\lambda = 1030$ nm (Yb:YAG) ist kein abschirmendes Plasma vorhanden [19], [20], [21], [24] (siehe auch Kapitel 2.4.2), weshalb beim Laserstrahlschweißen mit Festkörperlasern das Prozessfenster nach oben nicht durch diesen Effekt begrenzt ist.

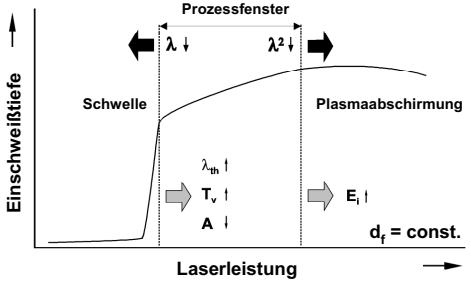

Bild 4.2: Prozessfenster beim Laserstrahlschweißen in Abhängigkeit der Strahl- und Werkstoffparameter (Absorptionsgrad A, Verdampfungstemperatur T_V, Wärmeleitfähigkeit λ_{th}, Wellenlänge λ, Ionisationsenergie des Werkstoffes E_i) [63].

In Bild 4.3 ist der sprunghafte Übergang vom Wärmeleitungs- zum Tiefschweißen beim Schweißen von Aluminium mit Parametern nahe der Schwelle sowohl in der Nahtoberraupe als auch im Querschliff anhand des sprunghaften Anstiegs von Nahtbreite, Einschweißtiefe und Nahtquerschnittsfläche deutlich zu erkennen. Im Bereich des Wärmeleitungsschweißens zeigt die Schweißnaht den typischen linsenförmigen Nahtquerschnitt sowie eine glatte Nahtoberraupe mit elliptischer Schuppung. Die Prozessparameter wurden dabei nicht verändert, die Schwelle kann allein aufgrund der Erwärmung des Bauteils während des Schweißens überschritten werden. Hieraus wird deutlich, dass ein effizienter Laserstrahlschweißprozess nur im Bereich des Tiefschweißens mit Parametern deutlich oberhalb der Schwelle sinnvoll ist.

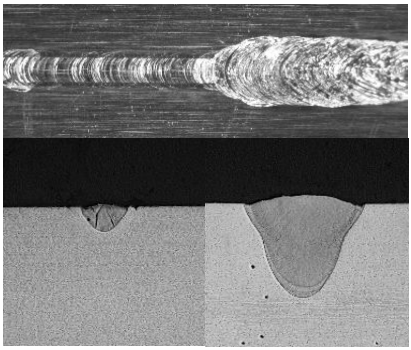

Bild 4.3: Schweißprozess von Aluminium bei konstanten Prozessparametern an der Schwelle mit Übergang vom Wärmeleitungs- zum Tiefschweißen (rechts).

Direkt an der Schwelle sind die Energiebilanzen sowohl für das Wärmeleitungsschweißen als auch für das Tiefschweißen gleichzeitig erfüllt. Die Folge ist ein instabiler Schweißprozess direkt an der Schwelle, weshalb ein ständiger Wechsel zwischen Wärmeleitungs- und Tiefschweißen erfolgen kann. Dies ist anhand der in Bild 4.4 dargestellten Nahtoberraupe deutlich zu erkennen.

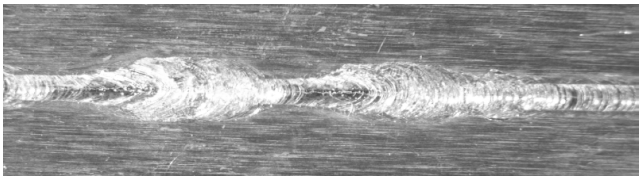

Bild 4.4: Prozessinstabilität – Wechsel zwischen Wärmeleitungs- und Tiefschweißen – direkt an der Schwelle beim Schweißen von Aluminium bei konstanten Prozessparametern.

4.2 Schwelle bei Aluminiumlegierungen

Als Aluminiumlegierungen wurden für diese Untersuchungen AlMgSi1, ein Vertreter der 6000er Legierungsklasse, sowie AlMg4,5Mn, ein Vertreter der 5000er Legierungsklasse, verwendet. Der Fokusdurchmesser wird sowohl durch Änderung der Fokussierbrennweite als auch durch Verwendung von Lasern unterschiedlicher Fokussierbarkeit – ausgestattet mit angepasstem Glasfaserkerndurchmesser – variiert. Schutzgas wird zunächst nicht verwendet, um eventuelle Einflüsse auf die Schwelle auszuschließen.

Die im Querschliff gemessene Einschweißtiefe in AlMgSi1 der Dicke 4 mm wird in Bild 4.5 als Funktion der Leistung P_L, dem Strahlparameterquotienten P_L/d_f und dem der Leistungsdichte proportionalen Quotienten P_L/d_f^2 dargestellt. Wird die Einschweißtiefe über der Leistung aufgetragen, so ist die Schwelle durch den sprunghaften Anstieg der Einschweißtiefe bei deren Überschreitung deutlich zu erkennen. Der zu beobachtende Sprung ist mit größer werdendem Fokusdurchmesser stärker ausgeprägt. Auf die Sprunghöhe wird später eingegangen. Ausgehend vom Fokusdurchmesser 600 µm kann mit kleiner werdendem Fokusdurchmesser bei gleicher Laserleistung eine etwas höhere Einschweißtiefe erzielt werden. Nur bei dem Fokusdurchmesser 100 µm ist dies oberhalb der Schwelle nicht möglich, worauf in Kapitel 5.1.2 eingegangen wird.

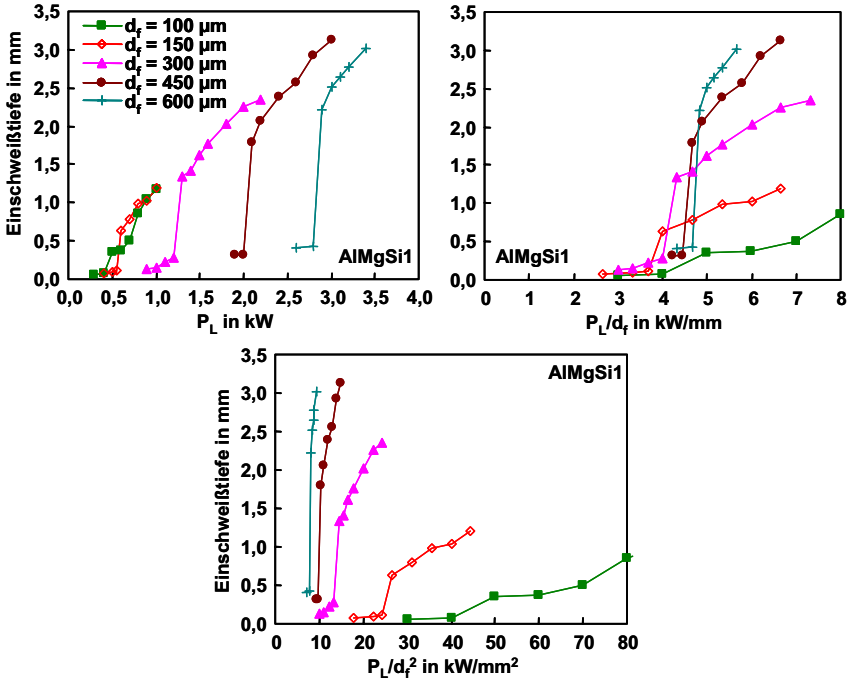

Bild 4.5: Einschweißtiefe für die Aluminiumlegierung AlMgSi1 in Abhängigkeit von Leistung P_L, Strahlparameterquotient P_L/d_f und Leistungsdichte ($\sim P_L/d_f^2$). Verwendet wurden Scheibenlaser und lampengepumpte Festkörperlaser (v = 2 m/min).

Des Weiteren zeigt Bild 4.5, dass sich die Einschweißkurven nur dann einem gemeinsamen Schwellwert annähern, wenn über dem Strahlparameterquotient P_L/d_f aufgetra-

gen wird. Dies bestätigt die theoretische Ableitung aus Kapitel 4.1. Die Schwelle liegt für AlMgSi1 bei einem Strahlparameterquotient von etwa $P_S/d_f \approx 4{,}5$ kW/mm.

Aus dem an der Schwelle konstanten Strahlparameterquotienten P_S/d_f lässt sich die minimale Einschweißtiefe an der Schwelle ableiten:

$$t_{\min} \sim P_S \sim d_f \,. \tag{4.7}$$

Wie oben gezeigt wurde, korreliert die Schwelle mit dem Strahlparameterquotienten P_S/d_f, sodass sich mit der Reduzierung des Fokusdurchmessers die Schwelle in Richtung geringerer Leistung verschiebt. Nach Gleichung (4.7) sind somit für ein prozesssicheres Tiefschweißen von Aluminiumlegierungen mit ausgebildeter Dampfkapillare in einem Blechdickenbereich von 1 mm und darunter hohe Anforderungen an die Strahlqualität von Festkörperlasern gestellt.

Beim Überschreiten der Schwelle steigt neben der Einschweißtiefe auch die Nahtbreite sprunghaft an (Bild 4.6). Es ist auffällig, dass im Bereich des Tiefschweißen oberhalb der Schwelle die Nahtbreite nahezu unabhängig vom Fokusdurchmesser ist. Hierauf wird in Kapitel 5.1.2 näher eingegangen.

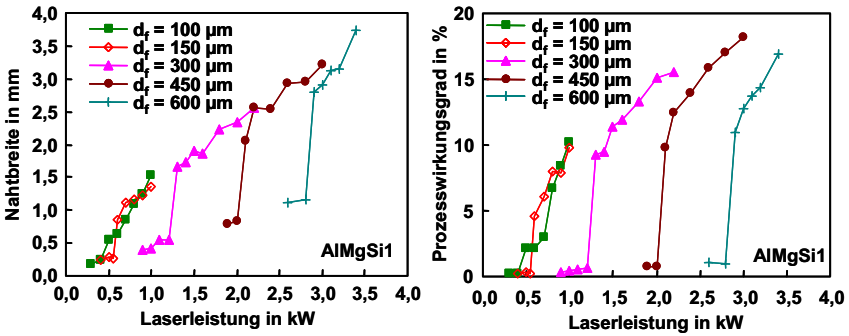

Bild 4.6: Nahtbreite und Prozesswirkungsgrad in Abhängigkeit der Laserleistung (AlMgSi1, v = 2 m/min).

Des Weiteren steigt beim Überschreiten der Schwelle auch die Nahtquerschnittsfläche sprunghaft an (ohne Abb., siehe auch Bild 4.3). Da nach Gleichung (2.28) die Nahtquerschnittsfläche in die Berechnung des Prozesswirkungsgrades eingeht, ist auch im Verlauf des in Bild 4.6 dargestellten Prozesswirkungsgrades die Schwelle ebenfalls durch einen sprunghaften Anstieg deutlich zu erkennen. Direkt oberhalb der Schwelle beträgt für Fokusdurchmesser $d_f \leq 300$ µm der Prozesswirkungsgrad etwa 10%, für

kleinere Fokusdurchmesser ist dieser etwas geringer. Im Bereich des Tiefschweißens steigt der Prozesswirkungsgrad nahezu proportional mit der Laserleistung an. Wie Kapitel 5.1.2 zeigen wird, werden beim Laserstrahlschweißen von Aluminium oberhalb der Schwelle Prozesswirkungsgrade von etwa 30% erreicht.

Wird in Bild 4.7 das Aspektverhältnis Fokus – nach Gleichung (2.21) gebildet aus dem Quotienten von Einschweißtiefe t und Fokusdurchmesser d_f – als Funktion der Leistung aufgetragen, ist der Sprung an der Schwelle ebenfalls sehr deutlich zu erkennen. Durch die Ausbildung der Dampfkapillare mit dem Überschreiten der Schwelle steigt das Aspektverhältnis Fokus bei allen Fokusdurchmessern sprunghaft von 0,5 auf 4 an. Für $A_F = 4$ ergibt sich nach Bild 2.15 ein Einkoppelgrad von lediglich etwa 60%, was den direkt oberhalb der Schwelle vergleichsweise geringen Prozesswirkungsgrad in Bild 4.6 erklärt. Mit weiter steigender Leistung steigt die Einschweißtiefe (für d_f = konst.) und damit das Aspektverhältnis Fokus, was ebenfalls zu einem steigendem Einkoppelgrad und Prozesswirkungsgrad führt.

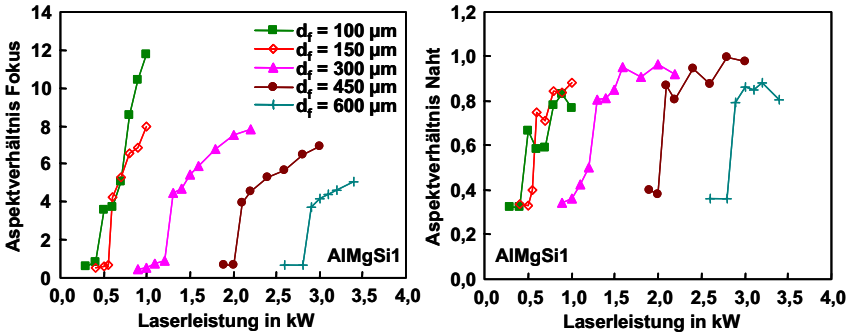

Bild 4.7: Aspektverhältnis Fokus und Aspektverhältnis Naht als Funktion der Leistung (AlMgSi1, v = 2m/min).

In der Literatur, u.a. in [4], [55] und [56], wird der Tiefschweißeffekt anhand des Aspektverhältnis der Schweißnaht

$$A_N = \frac{t}{b}, \tag{4.8}$$

gebildet aus dem Quotienten von Einschweißtiefe t und Nahtbreite b, charakterisiert und für das Tiefschweißen ein Aspektverhältnis von typischerweise $A_N \geq 2$ angegeben. Dieses Aspektverhältnis A_N wird im Folgenden als Aspektverhältnis Naht bezeichnet. Wie aus Bild 4.7 ersichtlich ist, ist bei diesen Ergebnissen im Bereich des Tiefschwei-

ßens das Aspektverhältnis $A_N \leq 1$. Hieraus wird deutlich, dass die Charakterisierung des Tiefschweißens anhand des Aspektverhältnisses Naht nicht zulässig ist (siehe dazu auch Kapitel 4.4).

Wie bereits im Zusammenhang mit Bild 4.5 erwähnt wurde, ist der mit dem Überschreiten der Schwelle verbundene Sprung der Einschweißtiefe mit größer werdendem Fokusdurchmesser stärker ausgeprägt. Das zugehörige Aspektverhältnis Fokus beträgt nach Bild 4.7 für alle Fokusdurchmesser $A_F = 4$. Damit ergibt sich nach Bild 2.15 für alle Fokusdurchmesser ein gleicher Einkoppelgrad, in dessen Berechnung nach Gleichung (2.20) das Aspektverhältnis Fokus eingeht. Mit steigendem Fokusdurchmesser muss somit auch die Einschweißtiefe ansteigen, damit das Aspektverhältnis konstant bleibt. Nach Gleichung (4.5) wird mit steigender Einschweißtiefe (z_{Kap}) der über die Wand der Dampfkapillare abgeleitete Wärmestrom größer. Damit die Energiebilanz für das Tiefschweißen weiterhin erfüllt ist, muss die Laserleistung größer werden. Somit skaliert der Sprung der Einschweißtiefe beim Überschreiten der Schwelle mit der Laserleistung.

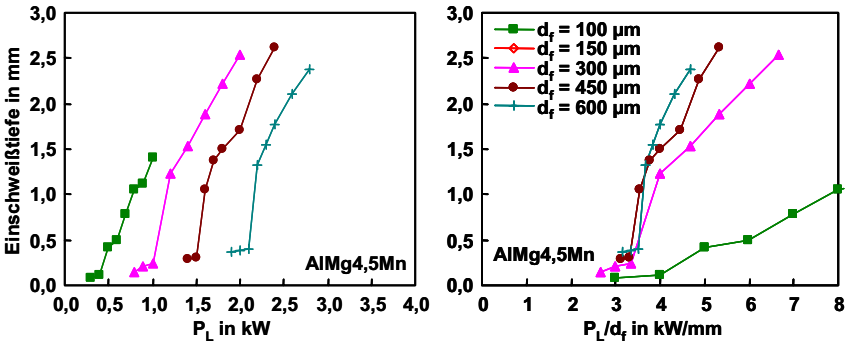

Bild 4.8: Einschweißtiefe für die Aluminiumlegierung AlMg4,5Mn in Abhängigkeit von Leistung P_L und Strahlparameterquotient P_L/d_f (v = 2 m/min).

Diese Ergebnisse werden mit der Aluminiumlegierung AlMg4,5Mn bestätigt (Bild 4.8). Die Schwelle liegt in diesem Falle bei einem Strahlparameterquotienten von $P_S/d_f \approx 3{,}5$ kW/mm, welche im Vergleich zu AlMgSi1 etwas geringer ist. Dies ist u. a. auf die unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit (AlMgSi1: $\lambda_{th} = 170...220$ W/mK [64]; AlMg4,5Mn: $\lambda_{th} = 110...140$ W/mK [64]) der beiden Aluminiumlegierungen zurückzuführen. Des Weiteren ist für AlMg4,5Mn die Verdampfungstemperatur aufgrund des höheren Magnesiumanteils geringer. Die geringere Wärmeleitfähigkeit von AlMg4,5Mn führt zu geringeren Wärmeleitungsverlusten aus der Wechselwirkungs-

zone, wodurch die zur Ausbildung der Dampfkapillare erforderliche Dampftemperatur bereits bei geringerer Leistung erreicht wird [65].

4.2.1 Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit

Aluminiumlegierungen werden mit Hochleistungs-Festkörperlasern derzeit typischerweise mit maximalen Vorschubgeschwindigkeiten um 6 m/min geschweißt. Von der Verbesserung der Fokussierbarkeit wird eine Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit erwartet. Daher ist die Frage interessant, inwiefern ein höherer Vorschub die Schwelle beeinflussen kann.

In Bild 4.9 ist für AlMg4,5Mn der Bereich um die Schwelle vergrößert dargestellt. Bei dem Fokusdurchmesser 600 µm bewirkt die Steigerung des Vorschubs um 2 m/min die Verschiebung der Schwelle um 100 W in Richtung höherer Laserleistung. Der Fokusdurchmesser 300 µm zeigt die gleiche Tendenz, die Schrittweite von 200 W bei den Vorschüben 2 m/min und 4 m/min lässt bei diesen Kurven keine genauere Auflösung zu. Bei beiden Fokusdurchmessern ist mit steigender Vorschubgeschwindigkeit in Bild 4.9 die Verringerung der Sprunghöhe an der Schwelle zu beobachten. Daraus lässt sich die Tendenz ableiten, dass sich für noch größere Vorschubgeschwindigkeiten die Sprunghöhe weiter verringert, bis schließlich keine ausgeprägte Schwelle mehr vorhanden ist. Die Aluminiumlegierung AlMgSi1 zeigt das gleiche Verhalten (ohne Abb.).

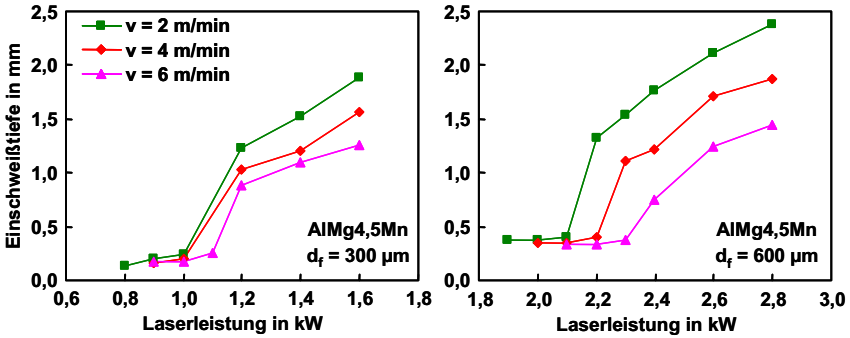

Bild 4.9: Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Schwelle bei verschiedenen Fokusdurchmessern (AlMg4,5Mn).

In Bild 4.10 ist das berechnete Aspektverhältnis Fokus beim Überschreiten der Schwelle in Abhängigkeit der Péclet-Zahl dargestellt. Dieser Berechnung liegt das in Bild 4.1 gezeigte Modell zugrunde. Hieraus wird deutlich, dass mit steigendem Vor-

schub – gleichbedeutend mit einer größeren Péclet-Zahl, siehe Bild 4.11 – das Aspektverhältnis und somit die Sprunghöhe beim Überschreiten der Schwelle abnimmt. Wie Bild 4.11 zeigt, ist die Péclet-Zahl für große Fokusdurchmesser stets größer als bei kleinen. Daraus lässt sich schließen, dass bei großem Fokusdurchmesser der charakteristische Sprung beim Überschreiten der Schwelle zuerst verschwindet und – sofern noch eine Dampfkapillare ausgebildet ist – ein stetiger Übergang vorhanden ist [11]. AlMgSi1 zeigt gleiches Verhalten, jedoch ist aufgrund der im Vergleich zu AlMg4,5Mn größeren Temperaturleitfähigkeit und den damit verbundenen kleineren Péclet-Zahlen (siehe Gleichung (4.2)) der charakteristische Sprung ausgeprägter. Diese theoretischen Überlegungen bestätigen die aus Bild 4.9 abgeleiteten Tendenzen.

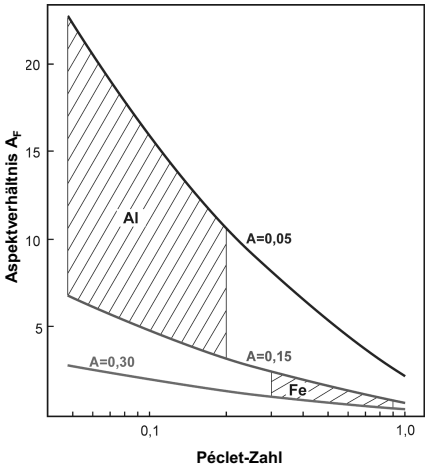

Bild 4.10: Berechnetes Aspektverhältnis Fokus beim Überschreiten der Schwelle in Abhängigkeit der Péclet-Zahl sowie verschiedener Absorptionsgrade [11].

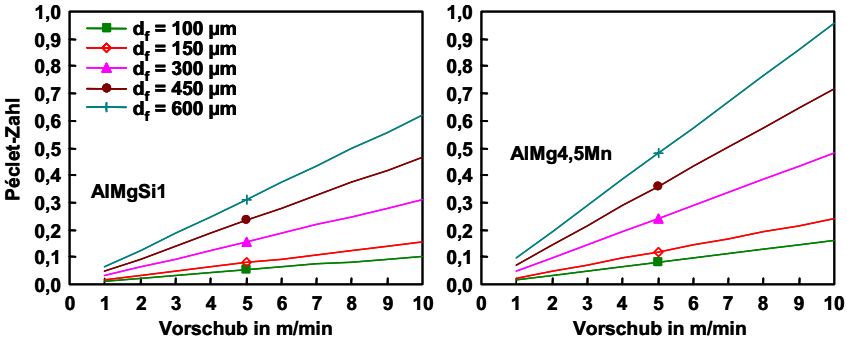

Bild 4.11: Für AlMgSi1 und AlMg4,5Mn berechnete Péclet-Zahl in Abhängigkeit des Vorschubs.

4.2.2 Einfluss des Schutzgases

Mit Hilfe von Schutzgasen lässt sich die Oxidation der Schweißnaht vermeiden. Typischerweise werden beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen die Schutzgase Helium und Argon eingesetzt. Bei dieser Untersuchung wurde das Schutzgas stechend über ein Röhrchen mit einem Innendurchmesser von 10 mm zugeführt. Hierbei haben sich für Helium die Durchflussmenge 1200 Nl/h und für Argon 600 Nl/h als Optimum herausgestellt. Durch die Schutzgaszufuhr ändert sich oberhalb der Bearbeitungsstelle der Brechungsindex, was die Strahlpropagation beeinflussen könnte. Vergleicht man jedoch die Einschweißkurve dieser beiden Schutzgase mit den an Umgebungsluft erzielten Ergebnissen (siehe Bild 4.12), so ist sowohl bei der Lage der Schwelle als auch bei der Sprunghöhe an der Schwelle kein Schutzgaseinfluss festzustellen. Selbst die Variation der Durchflussmenge bei Helium, welches eine sehr geringe Dichte aufweist, ändert den Kurvenverlauf nicht. Gleichzeitig bestätigen diese Messungen auch indirekt die in [22] diskutierte Tatsache, dass beim Laserstrahlschweißen mit Wellenlängen um 1 µm keine Plasmaeffekte auftreten.

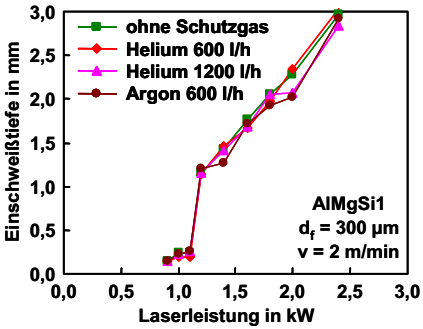

Bild 4.12: Einfluss von Schutzgasart und -menge auf die Schwelle (AlMgSi1).

4.3 Schwelle bei Stahlwerkstoffen

Wird in Bild 4.13 die Einschweißtiefe für den Stahlwerkstoff St 37-K analog zu den Aluminiumlegierungen in Bild 4.5 aufgetragen, zeigt sich das gleiche Verhalten. Allerdings ist aufgrund der anderen Materialeigenschaften (Verdampfungstemperatur T_V sowie Wärmeleitfähigkeit λ_{th} kleiner und Absorptionsgrad A größer) kein sprunghafter Anstieg der Einschweißtiefe beim Überschreiten der Schwelle vorhanden. Nahtbreite und -querschnittsfläche zeigen ebenfalls keinen Sprung (ohne Abb.). Die Schwelle

lässt sich anhand dieser Diagramme nicht so klar bestimmen. Dennoch lässt sich tendenziell erkennen, dass sich auch bei Stahlwerkstoffen die Schwelle mit kleiner werdendem Fokusdurchmesser in Richtung geringerer Leistungen verschiebt. Die Einschweißkurven nähern sich bei Stahl ebenfalls nur bei einer Auftragung über dem Strahlparameterquotienten P_L/d_f einem gemeinsamen Schwellwert an, der sich aber, wie bereits erwähnt, nicht exakt bestimmen lässt. Weiterhin kann auch bei Stahl ausgehend vom Fokusdurchmesser 600 µm mit kleiner werdendem Fokusdurchmesser bei gleicher Laserleistung oberhalb der Schwelle eine geringfügig höhere Einschweißtiefe erzielt werden. Dies ist ab dem Fokusdurchmesser 150 µm analog zu den Ergebnissen der Aluminiumlegierungen nicht möglich, worauf in Kapitel 5.1.2 eingegangen wird.

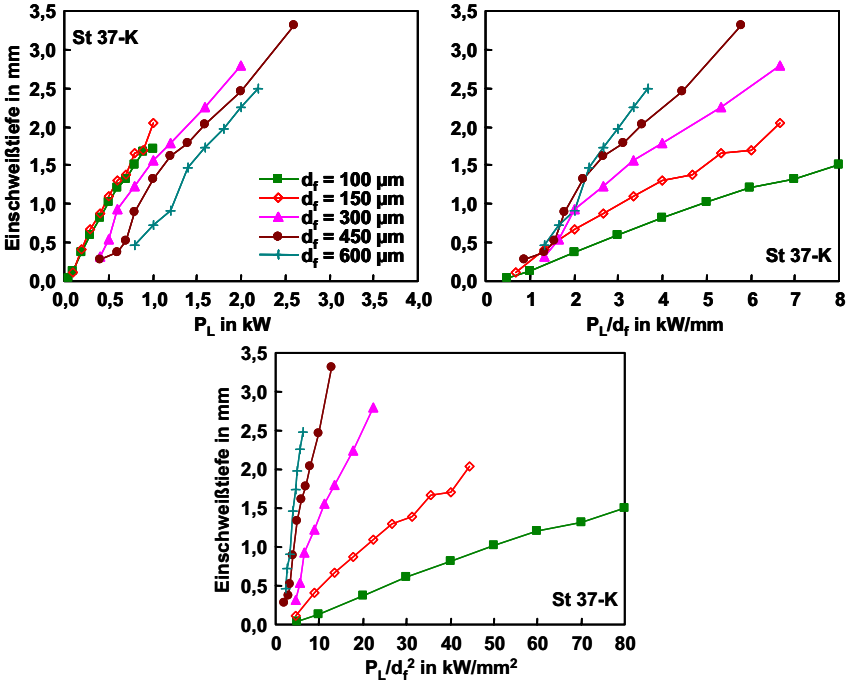

Bild 4.13: Einschweißtiefe für den Stahlwerkstoff St 37-K in Abhängigkeit von Leistung P_L, Strahlparameterquotient P_L/d_f und Leistungsdichte ($\sim P_L/d_f^2$). Verwendet wurden Scheibenlaser und lampengepumpte Festkörperlaser (v = 2 m/min).

Der Prozesswirkungsgrad lässt sich in zwei Bereiche einteilen, wenn über dem Strahlparameterquotienten aufgetragen wird, siehe Bild 4.14. Für $P_L/d_f \geq 2$ kW/mm verlaufen die Kurven näherungsweise parallel bei einem Prozesswirkungsgrad von etwa 20

bis 25%, für $P_L/d_f < 2$ kW/mm sinkt der Prozesswirkungsgrad kontinuierlich ab. Das Wärmeleitungsschweißen, für das ein näherungsweise waagerechter Verlauf erwartet wird, lässt sich auch anhand des Prozesswirkungsgrades nicht eindeutig bestimmen. Auch das ebenfalls in Bild 4.14 dargestellte Aspektverhältnis Fokus trägt nicht zur Klärung bei, da dieses bei konstantem Fokusdurchmesser nahezu linear ansteigt, wenn über dem Strahlparameterquotienten aufgetragen wird. Für $P_L/d_f < 2$ kW/mm ist das Aspektverhältnis Fokus insbesondere für $d_f \geq 300$ µm sehr klein. Nach [11] ist bei geringer Wärmeleitfähigkeit beim Überschreiten der Schwelle ein stetiger Übergang zum Tiefschweißen ohne einen sprunghaften Anstieg der Einschweißtiefe möglich. Es wird vermutet, dass der Knick im Verlauf des Prozesswirkungsgrades bei $P_L/d_f \approx 2$ kW/mm sowie dessen Absinken, wenn die Leistung bei konstantem Fokusdurchmesser reduziert wird, auf einen stetigen Übergang hindeutet. Im folgenden Kapitel wird die Schwelle anhand von Edelstahl genauer untersucht.

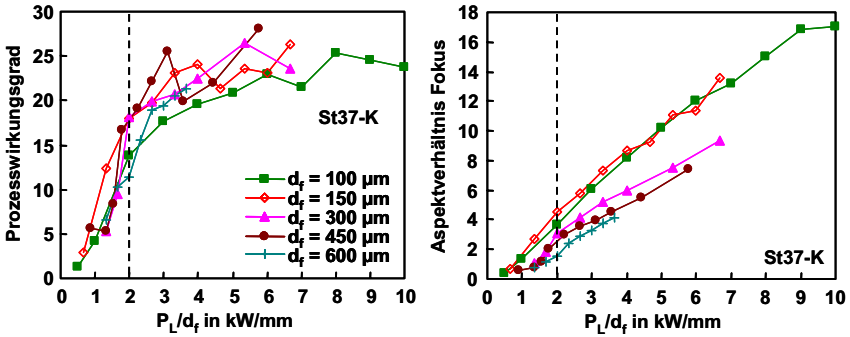

Bild 4.14: Prozesswirkungsgrad und Aspektverhältnis Fokus in Abhängigkeit des Strahlparameterquotienten (v = 2 m/min).

4.3.1 Vertiefende Betrachtung zur Schwelle anhand von Edelstahl

Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit von St 37-K konnte anhand der im vorangegangenen Kapitel 4.3 gezeigten Ergebnisse die Schwelle nicht eindeutig identifiziert werden. In diesem Kapitel wird mit den Fokusdurchmessern 300 µm und 100 µm, die mit lampengepumptem Festkörperlaser sowie Scheibenlaser bei gleichen Fokussierbedingungen erreicht werden können, die Schwelle bei Laserleistungen von $P_L \leq 1$ kW in Schritten von 100 W genauer untersucht. Als Werkstoff wird nun der Edelstahl 1.4301 mit einer im Vergleich zu St 37-K noch geringeren Wärmeleitfähigkeit verwendet.

In Bild 4.15 sind die Einschweißkurven von Blindschweißungen in ein 3 mm dickes Edelstahlblech in Abhängigkeit der Laserleistung für die Fokusdurchmesser 300 µm und 100 µm dargestellt. Bei dem Fokusdurchmesser 300 µm ist für die Vorschübe 2 m/min und 4 m/min ein Knick im Verlauf der Einschweißkurven bei der Laserleistung 400 W zu beobachten. Höhere Vorschübe zeigen nur einen geringen Knick. Es wird vermutet, dass dieser Knick im Verlauf der Einschweißkurven die Schwelle charakterisiert. Im Gegensatz dazu weisen die Einschweißkurven für den Fokusdurchmesser 100 µm keinen derartigen Knick auf, weshalb davon ausgegangen wird, dass in diesem Fall die Schwelle bereits überschritten ist.

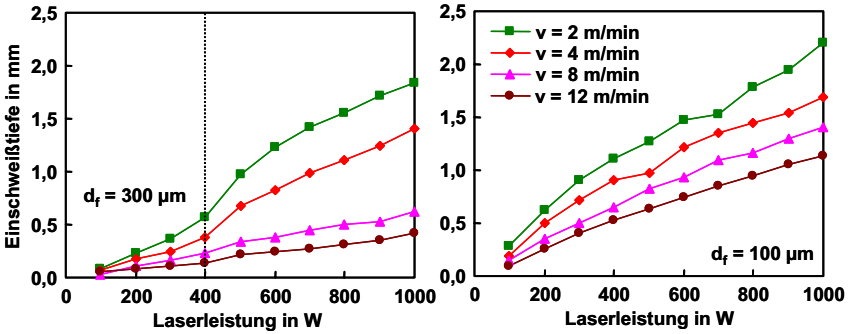

Bild 4.15: Einschweißkurven in Edelstahl für verschiedene Fokusdurchmesser zur besseren Bestimmung der Schwelle (Edelstahl, t = 3 mm).

Zu einer Bestätigung dieser Annahme kann der Prozesswirkungsgrad herangezogen werden, der in Bild 4.16 in Abhängigkeit der Laserleistung aufgetragen ist. Bei dem Fokusdurchmesser 300 µm und der Leistung 100 W beträgt der Prozesswirkungsgrad 5%. Bis zu der Leistung 400 W steigt der Prozesswirkungsgrad linear auf etwa 10 bis 15% an. In diesem Bereich handelt es sich um Wärmeleitungsschweißen. Zwischen den Laserleistungen 400 W und 600 W steigt der Prozesswirkungsgrad stärker an. Der Knick im Kurvenverlauf bei 400 W fällt mit dem bereits in Bild 4.15 beobachteten Knick im Verlauf der Einschweißtiefe zusammen. Dies ist damit zu erklären, dass sich bei dieser Leistung die Schwelle befindet und mit steigender Leistung die Dampfkapillare ausbildet. Die Öffnung der Dampfkapillare ist – bedingt durch das insgesamt sehr niedrige Leistungsniveau – im Vergleich zu der Tiefe groß (geringes Aspektverhältnis Fokus), was nach Bild 2.15 einen kleinen Einkoppelgrad infolge einer geringeren Anzahl von Reflexionen zur Folge hat. Die Folge hiervon ist ein stetiger Übergang vom Wärmeleitungsschweißen zum Tiefschweißen ohne sprunghaften Anstieg der Einschweißtiefe. Im weiteren Kurvenverlauf des Prozesswirkungsgrades ist ein zweiter

Knick bei der Laserleistung 600 W vorhanden, was einem Strahlparameterquotient von $P_L/d_f = 2$ kW/mm entspricht. Bei exakt diesem Wert des Strahlparameterquotienten ist auch bei St 37-K in Bild 4.14 ein Knick im Verlauf des Prozesswirkungsgrades zu beobachten. Zwischen den beiden Knicken findet der stetige Übergang statt, weshalb dieser Bereich im Folgenden als *Übergangsbereich* bezeichnet wird. Für Leistungen von $P_L \geq 600$ W verlaufen die Kurven – sieht man von dem Vorschub 12 m/min ab – näherungsweise parallel bei einem Prozesswirkungsgrad von etwa 25 bis 30%. Das gestiegene Aspektverhältnis führt zu einem nahezu linearen Verlauf von Einkoppelgrad (siehe Bild 2.15) und Prozesswirkungsgrad. In diesem Bereich handelt es sich um Tiefschweißen. Da im Übergangsbereich bereits eine Dampfkapillare vorhanden ist, ist dieser Bereich per Definition Teil des Tiefschweißbereichs.

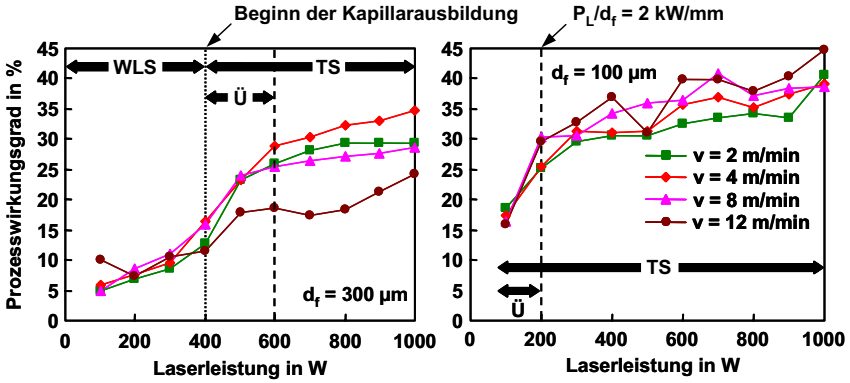

Bild 4.16: Prozesswirkungsgrad als Funktion der Laserleistung für verschiedene Fokusdurchmesser (Edelstahl, t = 3 mm). In den Diagrammen sind die Bereiche Wärmeleitungsschweißen (WLS), Übergangsbereich (Ü) sowie Tiefschweißen (TS) gekennzeichnet.

Beim Fokusdurchmesser 100 µm zeigt sich nur ein Knick bei der Laserleistung 200 W ($P_L/d_f = 2$ kW/mm). Die Schwelle wird auch bei einer Laserleistung von 100 W noch nicht unterschritten, weshalb hier der zweite Knick im Kurvenverlauf zwischen Wärmeleitungsschweißen und Tiefschweißen fehlt.

Im Übergangsbereich (zwischen $P_L = 400$ W und $P_L = 600$ W) führt bereits eine geringe Fluktuation der Laserleistung zu einem Absinken von Einschweißtiefe (Bild 4.15) und Prozesswirkungsgrad (Bild 4.16), weshalb für ein prozesssicheres Laserstrahlschweißen Schwelle und Übergangsbereich sicher überschritten werden sollte. Siehe dazu auch Kapitel 4.4.

Die Schwelle liegt bei Stahlwerkstoffen etwa bei einem Strahlparameterquotienten von $P_S/d_f \approx 1$ kW/mm, was bei sehr kleinen Fokusdurchmessern zu einer sehr geringen Schwellleistung führt. Daraus ergibt sich eine kleine Mindesteinschweißtiefe (siehe dazu auch Kapitel 4.2), was ein ebenfalls sehr kleines Aspektverhältnis Fokus zur Folge hat, wodurch die Unterscheidung von Wärmeleitungsschweißen und -tiefschweißen zusätzlich erschwert wird. Hierzu eignet sich am besten der Prozesswirkungsgrad.

4.3.2 Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit und deren Bedeutung für das Hochgeschwindigkeitsschweißen

Im Gegensatz zu den Aluminiumlegierungen ist die Schwelle bei Stahlwerkstoffen aufgrund der anderen Materialeigenschaften weitaus weniger ausgeprägt. Wie im vorangegangenen Kapitel gezeigt wurde, kennzeichnet der in Bild 4.15 vorhandene Knick in den Einschweißkurven die Schwelle. Da dieses Abknicken der Einschweißkurven bei dem Fokusdurchmesser 300 µm unabhängig vom Vorschub jeweils bei der gleichen Laserleistung stattfindet, lässt dies den Schluss zu, dass bei Stahl in dem untersuchten Geschwindigkeitsbereich kein Einfluss auf die Lage der Schwelle vorhanden ist.

Im Hinblick auf das Folienschweißen mit hohen Vorschubgeschwindigkeiten (Kapitel 5.2) ist die Frage interessant, wie sich hier die Fokussierbarkeit auf die Schwelle auswirkt und ob sich bereits anhand dieser Ergebnisse Einflüsse auf das zu erwartende Prozessfenster ableiten lassen.

In Bild 4.17 ist für Edelstahl die Einschweißtiefe in Abhängigkeit der Leistung für die Fokusdurchmesser 300 µm und 100 µm dargestellt. Bei der Vorschubgeschwindigkeit 2 m/min ist mit dem Fokusdurchmesser 100 µm bis zu der Laserleistung 400 W die Einschweißtiefe deutlich größer als bei 300 µm. Erst durch das Überschreiten der Schwelle bei der Laserleistung 400 W (Knick im Kurvenverlauf, vgl. Bild 4.15 und Bild 4.16) kann durch die Ausbildung der Dampfkapillare mit dem Fokusdurchmesser 300 µm die Einschweißtiefe etwas gesteigert werden. Die Werte des Fokusdurchmessers 100 µm werden jedoch nicht erreicht. Diese Ergebnisse lassen für das Folienschweißen (Foliendicke ≤ 300 µm) unter Verwendung des Fokusdurchmessers 300 µm bei Leistungen von ≤ 400 W Wärmeleitungsschweißen erwarten. Um die beim Folienschweißen (Kapitel 5.2) benötigte Einschweißtiefe von 300 µm zu erreichen, ist bei dem Fokusdurchmesser 300 µm im Vergleich zu 100 µm die dreifache Laserleistung erforderlich (siehe gestrichelte Linie in Bild 4.17). Dies lässt einen höheren Energieeintrag und somit einen größeren Verzug erwarten.

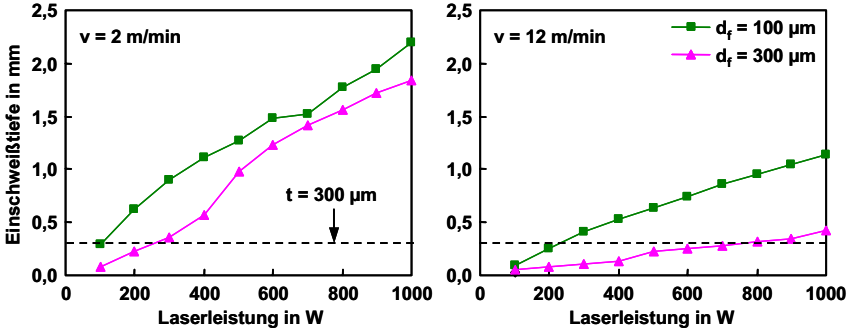

Bild 4.17: Einschweißtiefe als Funktion der Leistung für verschiedene Fokusdurchmesser und Vorschubgeschwindigkeiten (Edelstahl).

Für den Vorschub 12 m/min ergeben sich Verhältnisse analog zu 2 m/min. Allerdings ist der Vorteil des kleinen Fokusdurchmessers noch offensichtlicher. Bei dem Fokusdurchmesser 300 µm wird die Schwelle wiederum bei einer Leistung von 400 W überschritten (Knick im Kurvenverlauf). Die für den Vorschub 12 m/min große Péclet-Zahl (siehe Bild 4.18) führt beim Überschreiten der Schwelle mit dem Fokusdurchmesser 300 µm im Vergleich zu 2 m/min nur zu einem kleinen Anstieg der Einschweißtiefe. Nach Bild 4.10 ist aufgrund der großen Péclet-Zahl das Aspektverhältnis Fokus gering, was diesen geringen Anstieg der Einschweißtiefe bewirkt. Auch bei dem Vorschub 12 m/min ist die Péclet-Zahl für den Fokusdurchmesser 100 µm noch so klein, dass ein Tiefschweißen möglich ist. Die beim Folienschweißen (Kapitel 5.2) erforderliche Einschweißtiefe von 300 µm kann mit dem Fokusdurchmesser 300 µm nur mit einer um den Faktor 4 höheren Laserleistung erzielt werden. Beim Folienschweißen ist mit dem Fokusdurchmesser 100 µm ein großes Prozessfenster zu erwarten, wobei Vorschubgeschwindigkeiten von $v > 12$ m/min möglich sein sollten. Im Gegensatz dazu ist für den Fokusdurchmesser 300 µm aufgrund des erwarteten Wärmeleitungsschweißens das Prozessfenster klein.

Es ist aber anzumerken, dass beim Folienschweißen aufgrund der kleinen Foliendicke günstigere Wärmeleitungsverhältnisse als bei diesen Ergebnissen zu erwarten sind, was auch bei großem Fokusdurchmesser positiven Einfluss auf das Prozessfenster haben kann.

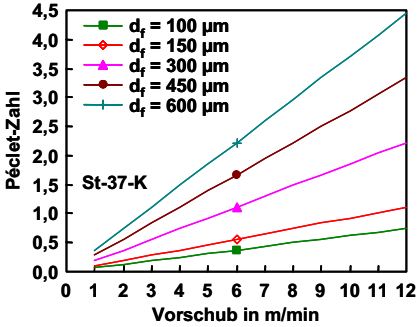

Bild 4.18: Für Stahl berechnete Péclet-Zahl in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit für verschiedene Fokusdurchmesser.

4.3.3 Einfluss des Schutzgases

Bei der Untersuchung des Gaseinflusses wurden die Schutzgase Helium und Argon analog zu den Schweißungen an Aluminiumlegierungen stechend über ein Röhrchen mit einem Innendurchmesser von 10 mm zugeführt. Es wurden die gleichen Durchflussmengen (Helium 1200 Nl/h und 600 Nl/h sowie Argon 600 Nl/h) verwendet. Vergleicht man in Bild 4.19 die Einschweißkurven dieser beiden Schutzgase mit den an Umgebungsluft erzielten Ergebnissen, so ist kein Schutzgaseinfluss auf die Lage der Schwelle festzustellen. Selbst die drastische Variation der Durchflussmenge bei Helium ändert den Kurvenverlauf nicht.

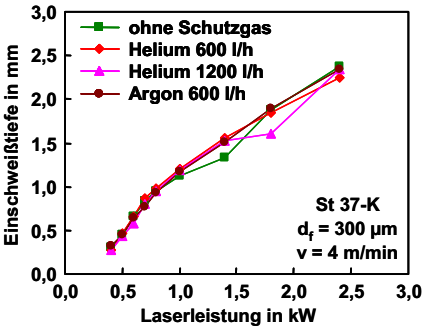

Bild 4.19: Einfluss von Schutzgasart und -menge auf die Schwelle bei St 37-K.

4.4 Vergleich der Werkstoffe

Ein Vergleich des Einflusses unterschiedlicher Stoffwerte ist in Bild 4.20 anhand der Werkstoffe St 37-K, AlMg4,5Mn und AlMgSi1 exemplarisch für den Vorschub 2 m/min dargestellt. Die Lage der Schwelle korreliert für Stahlwerkstoffe und Aluminiumlegierungen mit dem Strahlparameterquotienten. Bei AlMg4,5Mn ist aufgrund der geringeren Wärmeleitfähigkeit und der etwas niedrigeren Verdampfungstemperatur im Vergleich zu AlMgSi1 der Strahlparameterquotient an der Schwelle geringer (AlMgSi1: $P_S/d_f \approx 4{,}5$ kW/mm; AlMg4,5Mn: $P_S/d_f \approx 3{,}5$ kW/mm). Stahl hat gegenüber den Aluminiumlegierungen einen höheren Absorptionsgrad und eine geringere Wärmeleitfähigkeit, weshalb für Stahl die Schwelle bei einem niedrigeren Strahlparameterquotient ($P_S/d_f \approx 1$ kW/mm) liegt. Den charakteristischen Sprung beim Überschreiten der Schwelle zeigen nur die Aluminiumlegierungen aufgrund des geringen Absorptionsgrades und der hohen Wärmeleitfähigkeit.

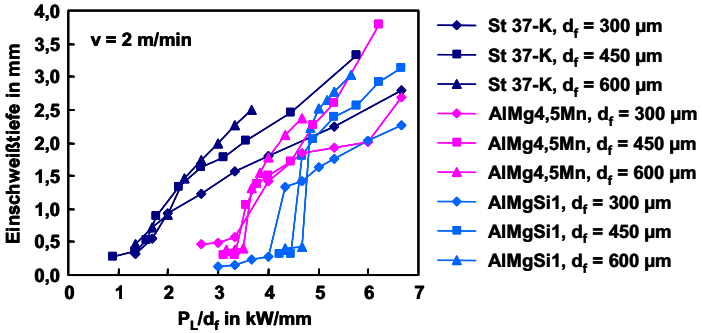

Bild 4.20: Vergleich von St 37-K, AlMgSi1 und AlMg4,5Mn: Einschweißtiefe als Funktion des Strahlparameterquotienten bei den Fokusdurchmessern 300 µm, 450 µm und 600 µm (v = 2 m/min).

Trägt man diese Ergebnisse über dem Aspektverhältnis Fokus auf (Bild 4.21), so ergibt sich ein ähnlicher Verlauf. Das beim Überschreiten der Schwelle vorhandene Aspektverhältnis Fokus korreliert ebenfalls mit dem Strahlparameterquotienten. Bei AlMgSi1 steigt das Aspektverhältnis Fokus beim Überschreiten der Schwelle sprunghaft auf $A_F = 4$, bei AlMg4,5Mn auf $A_F = 2$ an. Oberhalb der Schwelle ergibt sich für beide Aluminiumlegierungen ein vergleichbarer Verlauf von A_F. Der Stahlwerkstoff St 37-K zeigt aufgrund des stetigen Übergangs vom Wärmeleitungsschweißen zum Tiefschweißen keinen charakteristischen Sprung. Unterhalb der Schwelle ist für alle Werkstoffe das Aspektverhältnis Fokus etwa von gleicher Größe und beträgt $A_F \approx 0{,}5$.

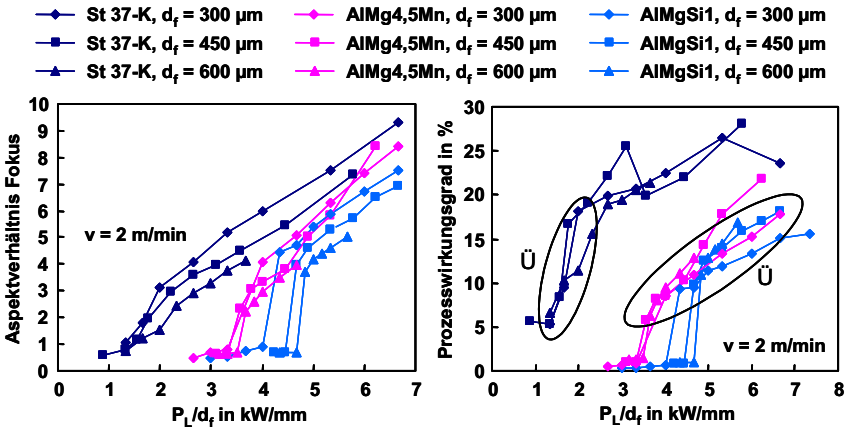

Bild 4.21: Vergleich von St 37-K, AlMgSi1 und AlMg4,5Mn: Aspektverhältnis Fokus und Prozesswirkungsgrad als Funktion des Strahlparameterquotienten bei den Fokusdurchmessern 300 µm, 450 µm und 600 µm (v = 2 m/min, Ü: Übergangsbereich).

Bei AlMgSi1 ist der sprunghafte Anstieg des Prozesswirkungsgrades beim Überschreiten der Schwelle größer als im Vergleich zu AlMg4,5Mn (Bild 4.21). Oberhalb der Schwelle verläuft der Prozesswirkungsgrad für beide Aluminiumlegierungen nahezu identisch und wird mit steigendem Strahlparameterquotienten (steigende Laserleistung bei konstantem Fokusdurchmesser) größer. Bei dem Stahlwerkstoff St 37-K steigt der Prozesswirkungsgrad im Übergangsbereich (1 kW/mm $\leq P_L/d_f \leq$ 2 kW/mm) an, bevor sich für größere Strahlparameterquotienten ein nahezu waagerechter Verlauf ergibt (siehe auch Bild 4.14 und Bild 4.16). Ein waagerechter Verlauf wird bei beiden Aluminiumlegierungen noch nicht erreicht. Eine Erklärung hierzu liefert der Einkoppelgrad (siehe auch Kapitel 2.5.1), dessen Verlauf als Funktion des Aspektverhältnis Fokus in Bild 4.22 dargestellt ist. Unter Verwendung von Bild 4.21 lassen sich folgende Aussagen ableiten:

Der Absorptionsgrad für Stahl beträgt bei einmaliger Wechselwirkung Laserstrahl-Materie etwa 35% (siehe Kapitel 2.3). Im Bereich des Wärmeleitungsschweißens sind Einkoppelgrad und Absorptionsgrad von gleicher Größe. An der Schwelle ($A_F \approx 0{,}5$) beträgt der berechnete Einkoppelgrad ebenfalls 35%, weshalb ein stetiger Übergang vom Wärmeleitungsschweißen zum Tiefschweißen stattfindet. Der nahezu waagerechte Verlauf des Prozesswirkungsgrades wird bei $P_L/d_f = 2$ kW/mm erreicht, wobei sich ein Aspektverhältnis Fokus von etwa $A_F = 3$ (vgl. Bild 4.21) und damit ein Einkoppelgrad von etwa 85% ergibt. Im Übergangsbereich ($\eta_A = 35\%$ bis $\eta_A \approx 85\%$) steigt der

Einkoppelgrad steil an, was zu einem ebenfalls steil ansteigenden Prozesswirkungsgrad (Bild 4.21) führt.

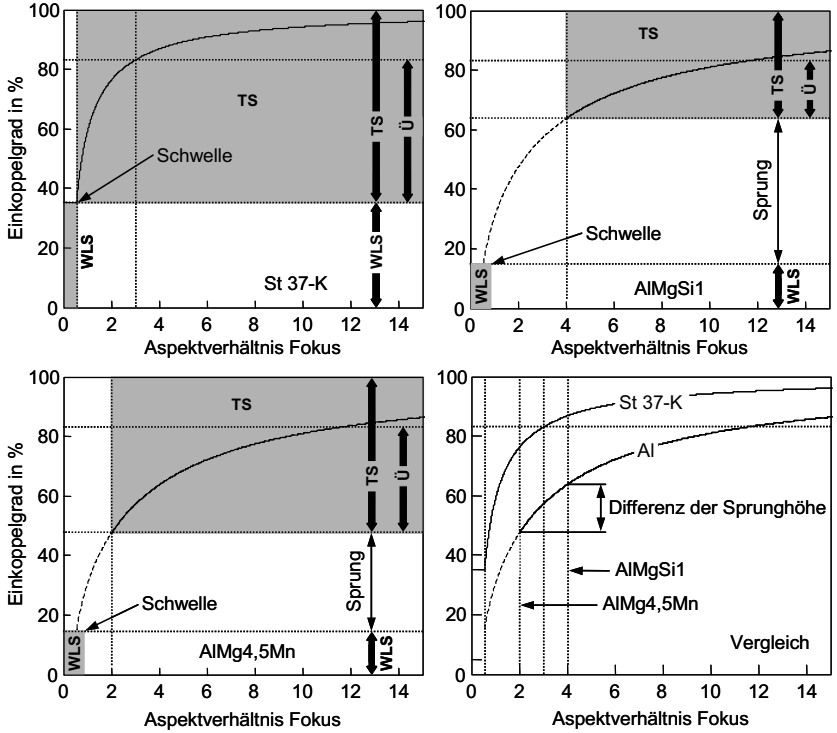

Bild 4.22: Berechneter Einkoppelgrad als Funktion des Aspektverhältnisses Fokus für St 37-K, AlMgSi1 und AlMg4,5Mn sowie deren Vergleich (WLS: Wärmeleitungsschweißen, Ü: Übergangsbereich, TS: Tiefschweißen).

Wenn bei AlMgSi1 gerade noch keine Dampftemperatur an der Werkstückoberfläche erreicht wird, beträgt der Absorptionsgrad beim Wärmeleitungsschweißen etwa 15% (siehe Kapitel 2.3). Mit dem Überschreiten der Schwelle steigt das Aspektverhältnis Fokus sprunghaft von etwa 0,5 auf 4 an (vgl. Bild 4.21) und somit der Einkoppelgrad von 15% auf etwa 65%. In Bild 4.21 wird ein maximales Aspektverhältnis Fokus von $A_F = 7$ erreicht, was zu einem Einkoppelgrad von etwa 70% führt. Der in diesem Bereich noch vergleichsweise stark zunehmende Einkoppelgrad bewirkt einen steigenden Prozesswirkungsgrad (siehe Bild 4.21). Dies lässt darauf schließen, dass sich bei AlMgSi1 oberhalb des Sprungs ebenfalls ein Übergangsbereich ergibt. In Bild 4.22 ist für AlMgSi1 der Übergangsbereich unter der Annahme eingezeichnet, dass der Über-

gang zu einem waagerechten Verlauf des Prozesswirkungsgrades analog zu Stahl bei einem Einkoppelgrad von etwa 85% erfolgt. Diese Annahme setzt voraus, dass sich die Wärmeleitungsverhältnisse nicht drastisch ändern. Die Aluminiumlegierung AlMg4,5Mn zeigt hierzu ein vergleichbares Verhalten, der Sprung beim Überschreiten der Schwelle ist aufgrund der geringeren Wärmeleitfähigkeit weniger stark ausgeprägt. Der Einkoppelgrad ist nach Gleichung (2.20) eine Funktion von Aspektverhältnis Fokus und Absorptionsgrad. Wird für beide Aluminiumlegierungen von einem gleichen Absorptionsgrad ausgegangen, so ergibt sich oberhalb der Schwelle bei gleichem Aspektverhältnis ein gleicher Einkoppelgrad. Für AlMg4,5Mn ist daher der Übergangsbereich im Vergleich zu AlMgSi1 größer.

Der Vergleich der drei Werkstoffe in Bild 4.22 zeigt, dass im Falle der Aluminiumlegierungen ein sehr viel größeres Aspektverhältnis A_F erforderlich ist, um mit Stahl vergleichbare Einkoppelgrade zu erzielen. Im Übergangsbereich von Stahl steigt der Einkoppelgrad stärker an als im Vergleich zu Aluminium, analog dazu verhält sich der Prozesswirkungsgrad (vgl. Bild 4.21).

Wie Bild 4.22 zeigt, liegt die Schwelle der unterschiedlichen Werkstoffe bei unterschiedlichen Aspektverhältnissen. Somit kann nicht allein aufgrund einer bestimmten Größe des Aspektverhältnisses – mit welchem Quotienten es auch immer gebildet wird – auf ein Tiefschweißen mit ausgebildeter Dampfkapillare geschlossen werden. Im Übergangsbereich kann bereits eine geringe Fluktuation von z.B. der Laserleistung aufgrund eines stark ansteigenden/abfallenden Einkoppelgrades zu einer Veränderung des Bearbeitungsergebnisses führen (siehe Einschweißtiefe von St 37-K für $P_L/d_f \leq 2$ kW/mm in Bild 4.20). Der Einkoppelgrad bestimmt maßgeblich die Schwelle sowie das Bearbeitungsergebnis. Wie bereits erwähnt, sollte für ein prozesssicheres Laserstrahlschweißen Schwelle und Übergangsbereich sicher überschritten werden. Es kann nur anhand des Prozesswirkungsgrades ermittelt werden, in welchem Bereich – Wärmeleitungsschweißen bzw. Tiefschweißen im oder oberhalb des Übergangsbereichs – der Schweißprozess stattfindet. Der Prozesswirkungsgrad eignet sich am besten zur Charakterisierung der Prozessform.

4.5 Synopsis

Allgemeines

- Das Tiefschweißen ist definiert als Schweißen mit ausgebildeter Dampfkapillare. Ist diese nicht vorhanden, handelt es sich um Wärmeleitungsschweißen.
- Um die für das Tiefschweißen typische Dampfkapillare auszubilden, muss an der Werkstückoberfläche in der bestrahlten Fläche Dampftemperatur erreicht werden. Hierzu muss eine bestimmte Energieschwelle überschritten werden.
- Direkt an der Schwelle sind die Energiebilanzen sowohl für das Wärmeleitungsschweißen als auch für das Tiefschweißen erfüllt. Bei gleichen Strahleigenschaften sind die Materialeigenschaften Verdampfungstemperatur, Wärmeleitfähigkeit und Absorptionsgrad die bestimmenden Größen, weshalb bei verschiedenen Werkstoffen der sprunghafte Anstieg der Einschweißtiefe beim Überschreiten der Schwelle unterschiedlich stark ausgeprägt ist.
- Die Lage der Schwelle korreliert mit dem Strahlparameterquotienten P_S/d_f. Mit kleiner werdendem Fokusdurchmesser verschiebt sich die Schwelle in Richtung kleinerer Leistungen.
- Um einen Tiefschweißeffekt (Ausbildung einer Dampfkapillare) bei dünnen Blechen zu realisieren, bedarf es Laserstrahlen mit bester Fokussierbarkeit.
- Im Bereich des Wärmeleitungsschweißen ist die Nahtoberraupe stets glatt mit elliptisch ausgebildeter Schuppung. Dagegen ist beim Tiefschweißen die Nahtoberraupe v-förmig geschuppt und deutlich rauer.

Aluminium

- Aufgrund des geringen Absorptionsgrades steigen beim Überschreiten der Schwelle die Nahtkenngrößen Einschweißtiefe, Nahtbreite und Nahtquerschnittsfläche sprunghaft an. Mit größer werdendem Fokusdurchmesser ist dieser Sprung stärker ausgeprägt.
- Ein sprunghafter Anstieg ist neben den Nahtkenngrößen auch bei Aspektverhältnis Fokus und Prozesswirkungsgrad vorhanden. Das beim Überschreiten der Schwelle vorhandene Aspektverhältnis ist werkstoffabhängig, weshalb dieses nicht zur Unterscheidung der Prozessformen verwendet werden kann.

- Die Schwelle liegt für AlMgSi1 bei $P_L/d_f \approx 4{,}5$ kW/mm und für AlMg4,5Mn bei $P_L/d_f \approx 3{,}5$ kW/mm.

- Mit steigendem Vorschub verschiebt sich die Schwelle geringfügig in Richtung höherer Laserleistung. Dabei verringert sich die Sprunghöhe beim Überschreiten der Schwelle.

Stahl

- Bei Stahl ist aufgrund des höheren Absorptionsgrades und der geringeren Wärmeleitfähigkeit die Schwelle weitaus weniger ausgeprägt. Die Nahtkenngrößen und das Aspektverhältnis Fokus steigen mit dem Überschreiten der Schwelle nicht sprunghaft an, es ergibt sich ein stetiger Übergang.

- Im Übergangsbereich ($1\ \text{kW/mm} \leq P_L/d_f \leq 2\ \text{kW/mm}$) steigt der Einkoppelgrad stark an, was zu einem ebenfalls stark ansteigenden Prozesswirkungsgrad führt.

- Im Übergangsbereich führt eine Fluktuation z.B. von der Laserleistung zu einer Veränderung des Bearbeitungsergebnisses, weshalb ein prozesssicherer Schweißprozess nur oberhalb von Schwelle und Übergangsbereich möglich ist.

- Da im Übergangsbereich bereits eine Dampfkapillare ausgebildet ist, gehört dieser per Definition zum Tiefschweißen.

- Der Prozesswirkungsgrad eignet sich am besten zur Identifizierung der Schwelle.

- Die Schwelle liegt für Stahl bei $P_L/d_f \approx 1$ kW/mm.

Werkstoffvergleich

- Unterschiedliche Werkstoffeigenschaften führen zu unterschiedlichen Aspektverhältnissen beim Überschreiten der Schwelle, sodass dieses – mit welchem Quotienten es auch immer gebildet wird – nicht zur Unterscheidung der Prozessformen Wärmeleitungs- und Tiefschweißen eignet. Hierzu ist der Prozesswirkungsgrad am besten geeignet.

- Bei Stahl steigt im Übergangsbereich der Einkoppelgrad und damit der Prozesswirkungsgrad stark an.

- Direkt nach dem Überschreiten der Schwelle steigen bei Aluminium im Vergleich zu Stahl Einkoppelgrad und Prozesswirkungsgrad weniger stark, was ebenfalls zu einem Übergangsbereich führt, der aber im Vergleich zu Stahl flacher verläuft.
- Die Schwelle sowie das Bearbeitungsergebnis werden maßgeblich vom Einkoppelgrad beeinflusst.
- Erst bei Werkstoffen mit im Vergleich zu AlMgSi1 noch höherer Wärmeleitfähigkeit und noch geringerem Absorptionsgrad ist kein Übergangsbereich mehr zu erwarten.

5 Schweißen mit dem Scheibenlaser

Die Verfügbarkeit von Multikilowatt-Scheibenlasern, die eine im Vergleich zu lampengepumpten Stablasern um den Faktor 4 bessere Fokussierbarkeit aufweisen, bringt für das Laserstrahlschweißen eine Reihe prozesstechnischer Vorteile mit sich. In Kapitel 5.1 wird der grundlegende Einfluss der Fokussierbarkeit auf die Nahtausbildung anhand von Blindschweißungen in den Stahlwerkstoff St14, den Edelstahl 1.4301 sowie die Aluminiumlegierung AlMgSi1 diskutiert. Auf die Nahtqualität hinsichtlich Entstehung von Prozessporen etc. wird nur kurz eingegangen, eine tiefergehende Betrachtung erfolgt in einer weiterführenden Arbeit [66]. Das Schweißen von Edelstahlfolien wird in Kapitel 5.2 diskutiert.

5.1 Einfluss der Fokussierbarkeit

Mit der Verfügbarkeit eines 3 kW-Scheibenlasers lassen sich erstmalig auch im Multikilowattbereich sehr kleine Fokusdurchmesser mit Festkörperlasern erzielen. Im Rahmen dieses Kapitels soll untersucht werden, inwieweit sich die bessere Fokussierbarkeit auf das Schweißergebnis auswirkt. Der Fokusdurchmesser wird sowohl durch Änderung der Brennweite als auch durch Verwendung von Lasern unterschiedlicher Strahlqualität – ausgestattet mit daran angepassten Glasfaserdurchmessern – variiert. Tabelle 5.1 zeigt die Übersicht der verwendeten Fokusdurchmesser und die Daten der zur Fokussierung verwendeten optischen Komponenten. Im Rahmen dieses Kapitels werden Einschweißungen bei einer konstanten Laserleistung von 3 kW in den Stahlwerkstoff St14, den Edelstahl 1.4301 sowie die Aluminiumlegierung AlMgSi1 untersucht. In allen Fällen beträgt die Blechdicke 4 mm. Die Vorschubgeschwindigkeit wird von 3 m/min bis zu 20 m/min variiert.

Strahlquelle	lampengepumpter Stablaser			diodengepumpter Scheibenlaser			
$w \cdot \theta$ [mm·mrad]	25			6			
d_k [µm]	600			200	150	200	150
f_k [mm]	200			200			
f_f [mm]	200	150	100	200	200	100	100
β	1	0,75	0,5	1	1	0,5	0,5
d_f [µm]	600	450	300	200	150	100	75

Tabelle 5.1: Übersicht über die verwendeten Strahlquellen und die daraus resultierenden Fokusdurchmesser.

5.1.1 Einleitende Betrachtungen zum Schweißen mit sehr kleinen Fokusdurchmessern

Bislang wurde beim Schweißen mit Festkörperlasern davon ausgegangen, dass kein Plasma vorhanden ist, das den Schweißprozess negativ beeinflusst [19], [20], [21], [22]. Dies wurde bereits in Kapitel 4.2.2 einleitend diskutiert. Die gegenüber konventionellen lampengepumpten Festkörperlasern um den Faktor 4 bessere Strahlqualität des Scheibenlasers ermöglicht eine um den Faktor 16 höhere Leistungsdichte im Fokus, die hier maximal $6{,}8 \cdot 10^7$ W/cm^2 (bei dem Fokusdurchmesser 75 µm) beträgt. So war die Frage naheliegend, ob auch bei so hohen Leistungsdichten kein störendes Plasma auftreten würde.

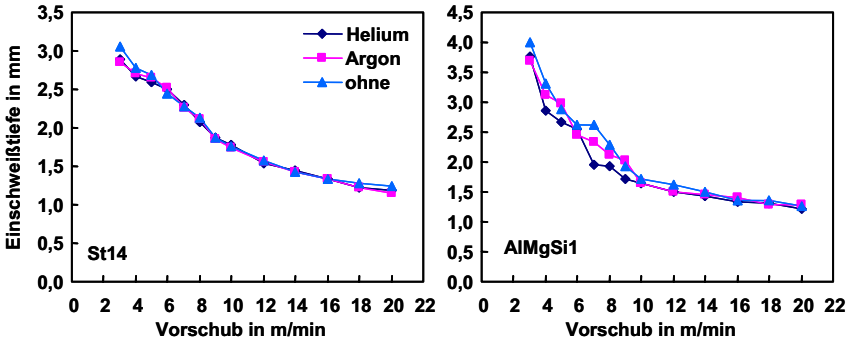

Bild 5.1: Einfluss der Umgebungsatmosphäre auf die Einschweißtiefe bei St14 und AlMgSi1 (Scheibenlaser, P_L = 3kW, d_f = 75 µm).

Wie Bild 5.1 zeigt, ist sowohl bei dem Stahlwerkstoff St14 als auch bei der Aluminiumlegierung AlMgSi1 kein Einfluss des verwendeten Schutzgases auf die Einschweißtiefe festzustellen. Die Werte entsprechen denen, die ohne Schutzgas mit Luft als Umgebungsatmosphäre erreicht wurden. Der Edelstahl 1.4301 zeigt das gleiche Verhalten (ohne Abb.). So kann festgehalten werden, dass beim Schweißen mit dem Scheibenlaser selbst bei dem sehr kleinen Fokusdurchmesser 75 µm keine Plasmaabschirmung existiert. Aus diesem Grund wird der Einfluss des Fokusdurchmessers ohne Verwendung eines Schutzgases untersucht.

5.1.2 Variation des Fokusdurchmessers

Einschweißtiefe

Vom Laserstrahlschweißen mit lampengepumpten Festkörperlasern ist bisher bekannt, dass eine Reduzierung des Fokusdurchmessers bei konstanter Laserleistung und konstantem Vorschub eine Steigerung der Einschweißtiefe mit sich bringt [4]. In Bild 5.2 ist für die beiden Werkstoffe St14 und AlMSi1 und verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten die Einschweißtiefe als Funktion des Fokusdurchmessers dargestellt. Die Werkstoffe zeigen das gleiche, im Folgenden beschriebene Verhalten. Dies gilt auch für den Edelstahl (ohne Abb.). Ausgehend vom Fokusdurchmesser 600 µm steigt die Einschweißtiefe bis zu $d_f = 200$ µm nahezu linear an. In diesem Bereich skaliert die Einschweißtiefe gemäß

$$t \sim \frac{1}{d_f}. \tag{5.1}$$

Die Fokusdurchmesser $d_f < 200$ µm zeigen ein hiervon abweichendes Verhalten. Mit dem Fokusdurchmesser 150 µm kann gegenüber $d_f = 200$ µm nur eine gleichbleibende oder geringfügig größere Einschweißtiefe erreicht werden. Eine weitere Verkleinerung des Fokusdurchmessers auf 100 µm führt sogar zu einem Absinken der Einschweißtiefe, was bereits bei der Diskussion der Schwelle in Kapitel 4.2 beobachtet wurde. Mit dem Fokusdurchmesser 75 µm kann im Vergleich zu $d_f = 100$ µm zwar wieder etwas tiefer geschweißt werden, die mit $d_f = 150$ µm erreichbaren Werte können aber – mit Ausnahme der Vorschubgeschwindigkeiten 3 m/min und 7 m/min bei AlMgSi1 – nicht erreicht werden. Dieses Verhalten zeigt sich über den gesamten untersuchten Vorschubgeschwindigkeitsbereich von 3 m/min bis 20 m/min.

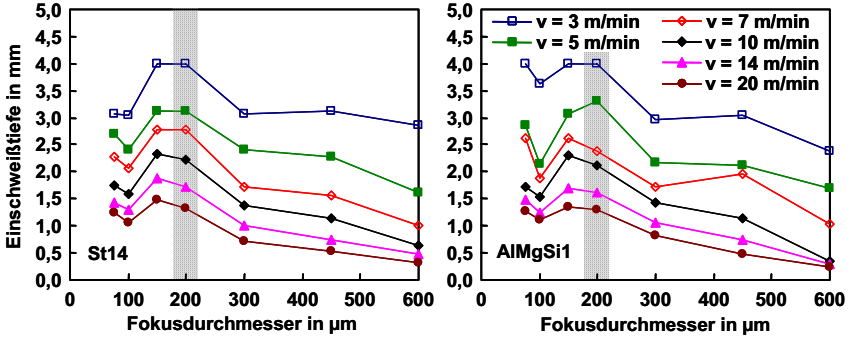

Bild 5.2: Einschweißtiefe als Funktion des Fokusdurchmessers für verschiedene Vorschübe und die Werkstoffe St14 und AlMgSi1 (P_L = 3 kW, kein Schutzgas).

In Bild 5.3 sind die Kurven aus Bild 5.2 als Funktion der Vorschubgeschwindigkeit aufgetragen. Hieraus ist das oben beschriebene Verhalten ebenfalls ersichtlich. Für St14 liegen die Einschweißkurven der Fokusdurchmesser 200 µm und 150 µm über den gesamten Vorschubbereich nahe beisammen, wobei für Vorschübe v > 7 m/min mit d_f = 150 µm die Einschweißtiefe etwas größer ist. Die mit den Fokusdurchmessern 100 µm und 75 µm erreichbare Einschweißtiefe liegt zwischen der mit den Fokusdurchmessern 300 µm und 150 µm erzielbaren. Über den gesamten Vorschubbereich lässt sich mit dem Fokusdurchmesser 75 µm im Vergleich zu 100 µm eine etwas größere Einschweißtiefe erzielen. Die Aluminiumlegierung AlMgSi1 zeigt mit Ausnahme der Vorschubgeschwindigkeiten im Bereich 5 m/min bis 8 m/min die gleiche Tendenz.

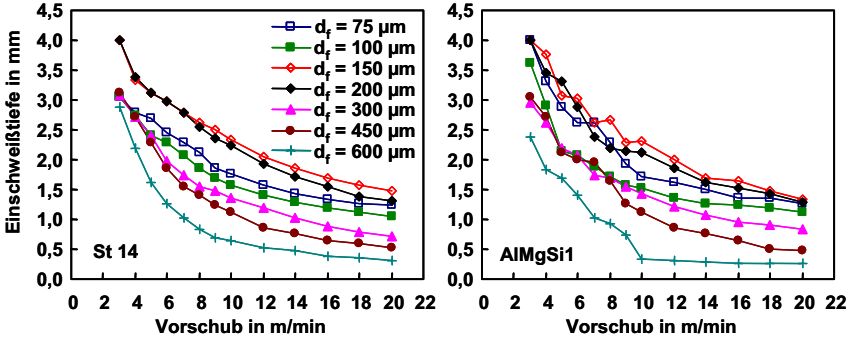

Bild 5.3: Einschweißtiefe als Funktion des Vorschubs für verschiedene Fokusdurchmesser und die Werkstoffe St14 und AlMgSi1 (P_L = 3 kW, kein Schutzgas).

AlMgSi1 zeigt im Verlauf der Einschweißtiefe für den Fokusdurchmesser 600 µm in Bild 5.3 einen Knick bei dem Vorschub 10 m/min. Oberhalb dieser Vorschubgeschwindigkeit ändert sich die Einschweißtiefe nicht weiter. Dieser Knick kennzeichnet den Übergang vom Tiefschweißen zum Wärmeleitungsschweißen.

Bei dem Fokusdurchmesser 200 µm scheint eine Gültigkeitsgrenze des Skalierungsgesetzes Einschweißtiefe proportional zum reziproken Fokusdurchmesser (Gleichung (5.1)) zu liegen, ab der sich die Vorteile einer höheren Strahlqualität nicht weiter nutzen lassen. Hierauf wird in Kapitel 5.1.4 näher eingegangen.

In Bild 5.4 ist der Vergleich der Einschweißtiefe für die verschiedenen Werkstoffe bei den Fokusdurchmessern 600 µm, 300 µm und 150 µm dargestellt. Die erzielbare Einschweißtiefe ist für St14 und AlMgSi1 bei gleichem Fokusdurchmesser nahezu identisch. Aufgrund der sehr geringen Wärmeleitfähigkeit von Edelstahl (Schmelz- und Verdampfungstemperatur ist vergleichbar zu St14) ist die Einschweißtiefe bei gleichem Fokusdurchmesser geringfügig größer.

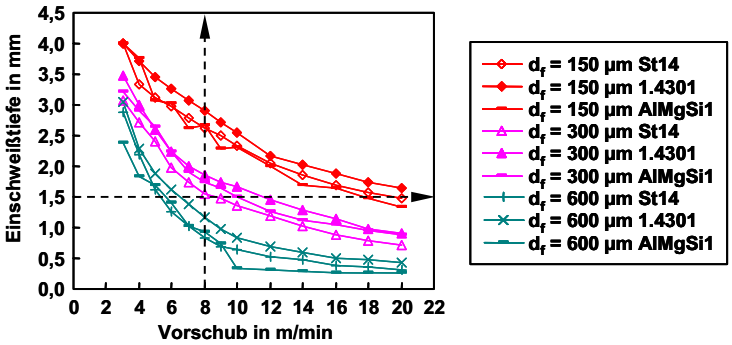

Bild 5.4: Einfluss des Werkstoffs auf die Einschweißtiefe bei den Fokusdurchmessern 150 µm, 300 µm und 600 µm (P_L = 3 kW, kein Schutzgas).

Wie aus Bild 5.4 ersichtlich ist, bringt die bessere Fokussierbarkeit des Scheibenlasers dennoch Vorteile für das Schweißen mit sich. Neben der Steigerung der Einschweißtiefe durch die Verringerung des Fokusdurchmessers auf 150 µm kann auch die Laserleistung bei gleicher Einschweißtiefe reduziert werden, was zu einem geringeren Energieeintrag in das Bauteil und somit zu einem reduzierten Verzug führt. Des Weiteren kann die gleiche Einschweißtiefe mit deutlich höherem Vorschub erzielt werden, was ebenfalls zu einem geringeren Energieeintrag führt. Insbesondere für das Hochgeschwindigkeitsschweißen ist also eine gute Strahlqualität von großer Bedeutung.

Prozesswirkungsgrad

Bild 5.5 zeigt für die beiden Werkstoffe St14 und AlMSi1 und verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten den Prozesswirkungsgrad als Funktion des Fokusdurchmessers. Für kleine Fokusdurchmesser ($d_f \leq 200$ µm, Scheibenlaser) beträgt der Prozesswirkungsgrad über den gesamten Vorschubgeschwindigkeitsbereich etwa 30%, für $d_f \geq 300$ µm nimmt dieser in Anhängigkeit von Werkstoff und Vorschubgeschwindigkeit ab. Nachfolgend werden die Werkstoffe getrennt voneinander tiefergehend betrachtet.

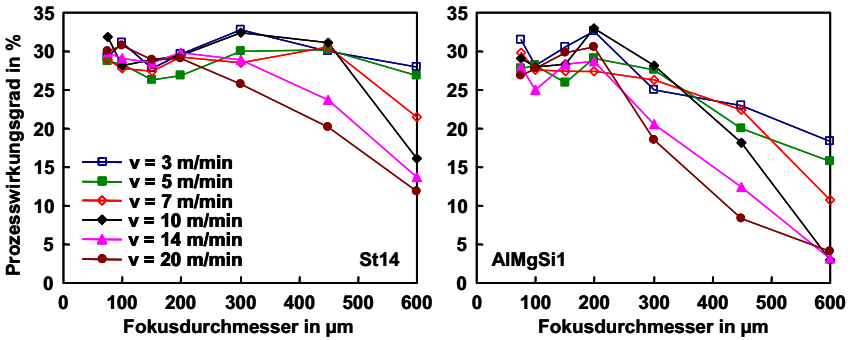

Bild 5.5: Prozesswirkungsgrad als Funktion des Fokusdurchmessers für verschiedene Vorschübe und die Werkstoffe St14 und AlMgSi1 ($P_L = 3$ kW, kein Schutzgas).

In Bild 5.6 ist der Prozesswirkungsgrad für St14 in Abhängigkeit von Vorschub und Aspektverhältnis Fokus dargestellt. Für den Fokusdurchmesser 600 µm ist bei dem Vorschub 6 m/min ein Knick im Verlauf des Prozesswirkungsgrades vorhanden. Mit weiter steigendem Vorschub sinkt der Prozesswirkungsgrad ab, was den bereits in Kapitel 4.3.1 diskutierten Übergangsbereich kennzeichnet. Das Abknicken ist auch dann zu erkennen, wenn die Ergebnisse über dem Aspektverhältnis Fokus aufgetragen werden. Der Beginn des Übergangsbereiches ist mit dem Unterschreiten eines Aspektverhältnisses Fokus von $A_F = 3$ verbunden. Dies wurde bereits in Kapitel 4.4 im Zusammenhang mit der Schwelle beobachtet. Für $A_F < 3$ fällt der Einkoppelgrad stark ab (siehe Bild 2.15 und Bild 4.22), was das Absinken des Prozesswirkungsgrades bewirkt. Das Abknicken des Prozesswirkungsgrades und somit der Beginn des Übergangsbereiches erfolgt bei dem Fokusdurchmesser 450 µm bei dem Vorschub 10 m/min und bei $d_f = 300$ µm bei v = 16 m/min.

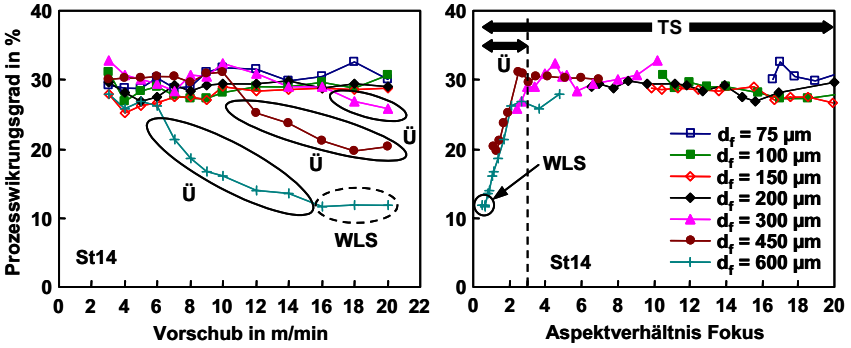

Bild 5.6: Prozesswirkungsgrad von St14 als Funktion von Vorschub und Aspektverhältnis Fokus für verschiedene Fokusdurchmesser (P_L = 3 kW, kein Schutzgas). In den Diagrammen sind die Bereiche Wärmeleitungsschweißen (WLS), Übergangsbereich (Ü) sowie Tiefschweißen (TS) gekennzeichnet.

Für den Fokusdurchmesser 600 µm ist bei dem Vorschub 16 m/min ein weiterer Knick im Verlauf des Prozesswirkungsgrades vorhanden, mit weiter steigendem Vorschub ergibt sich ein waagerechter Verlauf. In diesem Bereich handelt es sich um Wärmeleitungsschweißen mit linsenförmigem Nahtquerschnitt (ohne Abb.). Bei dem Fokusdurchmesser 450 µm wird das Wärmeleitungsschweißen noch nicht erreicht.

In Bild 5.6 ist das Aspektverhältnis Fokus zur besseren Übersicht nur bis $A_F = 20$ dargestellt. Für den Fokusdurchmesser 75 µm beträgt das größte Aspektverhältnis Fokus $A_F = 40$, der Prozesswirkungsgrad verläuft weiterhin nahezu waagerecht bei etwa 30%. Bei konstantem Fokusdurchmesser ergibt sich bei einem Vorschub von 3 m/min das jeweils größte Aspektverhältnis Fokus, das mit steigendem Vorschub kleiner wird. Je kleiner der Fokusdurchmesser ist, desto weiter entfernt vom Übergangsbereich findet der Schweißprozess statt. Im Übergangsbereich macht sich bereits eine geringe Veränderung der Prozessparameter (z.B. von Vorschub und/oder Laserleistung) deutlich bemerkbar. Ein sicherer Schweißprozess ist daher nur oberhalb des Übergangsbereiches möglich. Im Bereich des Wärmeleitungsschweißens ändert sich das Aspektverhältnis Fokus nicht mehr, wodurch sich in diesem Diagramm der Bereich des Wärmeleitungsschweißen quasi auf einen Punkt reduziert.

Der Edelstahl 1.4301 (ohne Abb.) verhält sich analog zu dem Stahl St14. Aufgrund der geringeren Wärmeleitfähigkeit liegt der Prozesswirkungsgrad im Tiefschweißbereich mit 35% etwas über dem von St14 und der Übergangsbereich beginnt jeweils erst bei einer höheren Vorschubgeschwindigkeit.

In Bild 5.7 ist der Prozesswirkungsgrad für AlMgsi1 in Abhängigkeit von Vorschub und Aspektverhältnis Fokus dargestellt. Diese Aluminiumlegierung verhält sich prinzipiell analog zu den Stahlwerkstoffen. Bei AlMgSi1 wird für $d_f \leq 200$ µm ein Prozesswirkungsgrad von etwa 30% erreicht. Der Übergangsbereich beginnt für den Fokusdurchmesser 300 µm bei einem Vorschub von 10 m/min, für $d_f = 450$ µm bereits bei v = 6 m/min. Ein linsenförmiger Nahtquerschnitt wird bei dem Fokusdurchmesser 450 µm noch nicht erreicht (ohne Abb.), sodass sich der Übergangsbereich bis zu dem Vorschub 20 m/min erstreckt. Der Beginn des Übergangsbereiches ist mit dem Unterschreiten eines Aspektverhältnis Fokus von $A_F = 4$ verbunden. Dies wurde bereits in Kapitel 4.4 im Zusammenhang mit der Schwelle beobachtet. Bei dem Fokusdurchmesser 600 µm ist bereits bei einem Vorschub von 3 m/min der Übergangsbereich erreicht, die Schwelle ist anhand des abknickenden Prozesswirkungsgrades bei der Vorschubgeschwindigkeit 10 m/min deutlich zu erkennen. Analog zu St14 ändert sich im Bereich des Wärmeleitungsschweißens das Aspektverhältnis Fokus nicht mehr, weshalb sich dieser Bereich wiederum auf einen Punkt reduziert, wenn der Prozesswirkungsgrad über dem Aspektverhältnis Fokus aufgetragen wird.

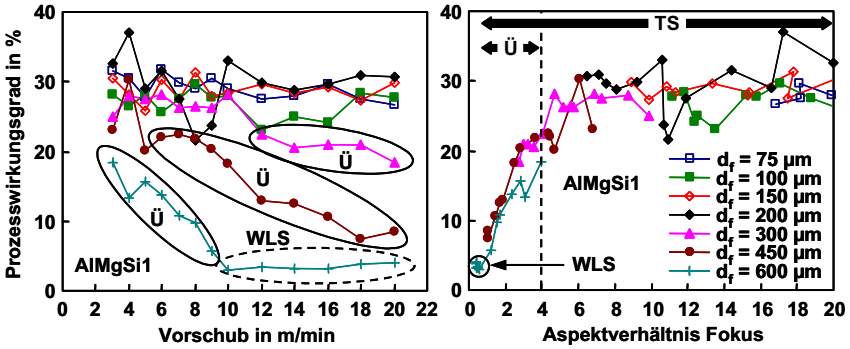

Bild 5.7: Prozesswirkungsgrad von AlMgSi1 als Funktion von Vorschub und Aspektverhältnis Fokus für verschiedene Fokusdurchmesser (P_L = 3 kW, kein Schutzgas, Tiefschweißen (TS), Übergangsbereich (Ü), Wärmeleitungsschweißen (WLS)).

Die auch bei AlMgSi1 vorhandenen Übergangsbereiche und der nicht mehr sprunghafte Anstieg der Einschweißtiefe beim Überschreiten der Schwelle bestätigen die Vermutung von Kapitel 4.2.1, dass bei hohen Vorschüben die Schwelle nicht mehr deutlich ausgeprägt ist und ein stetiger Übergang stattfindet.

Nahtbreite

In Bild 5.8 ist die an der Oberseite gemessene Nahtbreite als Funktion des Fokusdurchmessers dargestellt. Die Diffusionslänge δ

$$\delta = 2\sqrt{\kappa \cdot t}\,, \tag{5.2}$$

in der die Temperaturleitfähigkeit κ

$$\kappa = \frac{\lambda_{th}}{\rho \cdot c_p} \tag{5.3}$$

enthalten ist, beschreibt die Strecke, die von einer Isothermen in der Zeiteinheit t zurückgelegt wird. Aufgrund der höheren Temperaturleitfähigkeit von AlMgSi1 sind die Schweißnähte im Vergleich zu St14 breiter. Mit steigender Vorschubgeschwindigkeit wird die Wechselwirkungszeit kleiner, wodurch die Nahtbreite abnimmt.

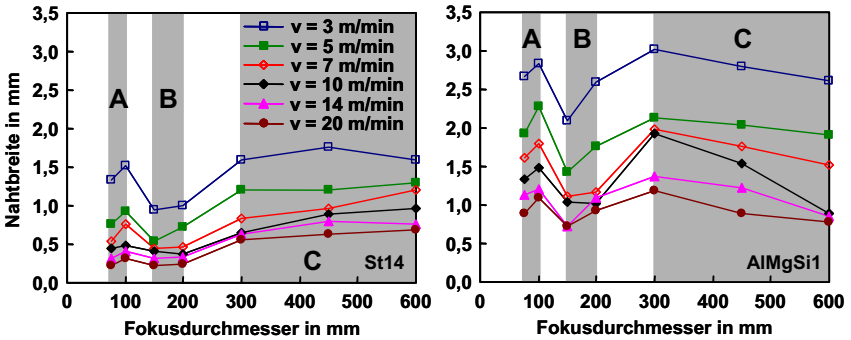

Bild 5.8: Nahtbreite als Funktion des Fokusdurchmessers für die Werkstoffe St14 und AlMgSi1 (P_L = 3 kW, kein Schutzgas).

Bei St14 nimmt die Nahtbreite ausgehend vom Fokusdurchmesser 600 µm bis zu d_f = 300 µm geringfügig ab, im Gegensatz dazu steigt diese bei AlMgSi1 geringfügig an (bei d_f = 600 µm und v ≥ 10 m/min ist aufgrund des Wärmeleitungsschweißens der Anstieg größer). Es wird vermutet, dass bei Aluminium und großem Fokusdurchmesser der geringere Einkoppelgrad im Übergangsbereich zu einer kleineren Nahtbreite führt. In Kapitel 4.2 wurde für AlMgSi1 nach dem Überschreiten der Schwelle eine vom Fokusdurchmesser nahezu unabhängige Nahtbreite beobachtet (Bild 4.6). Ein hiervon abweichendes Verhalten zeigen die Fokusdurchmesser $d_f \leq 200$ µm bei beiden Werkstoffen. Die Reduzierung des Fokusdurchmessers von 300 µm auf 200 µm be-

wirkt ein Absinken der Nahtbreite. Mit dem Fokusdurchmesser 150 µm ist die Nahtbreite vergleichbar zu $d_f = 200$ µm oder etwas geringer. Eine weitere Verkleinerung des Fokusdurchmessers auf 100 µm bewirkt dagegen eine zunehmende Nahtbreite, die bei einer Verkleinerung auf $d_f = 75$ µm wiederum abnimmt. Der Edelstahl zeigt ein zu St14 vergleichbares Verhalten (ohne Abb.). Der oben beschriebene Verlauf der Nahtbreite lässt sich in die Bereiche A, B und C einteilen, auf die im Zusammenhang mit der Nahtform in Kapitel 5.1.3 noch einmal eingegangen wird.

Nahtquerschnittsfläche

In Bild 5.9 ist die Nahtquerschnittsfläche als Funktion des Fokusdurchmessers dargestellt. Für St14 ist die Nahtquerschnittsfläche bei konstantem Vorschub nahezu unabhängig vom Fokusdurchmesser. Dies gilt für AlMgSi1 nur für Fokusdurchmesser $d_f \leq 200$ µm. Für größere Fokusdurchmesser sinkt die Nahtquerschnittsfläche analog zur Nahtbreite ab.

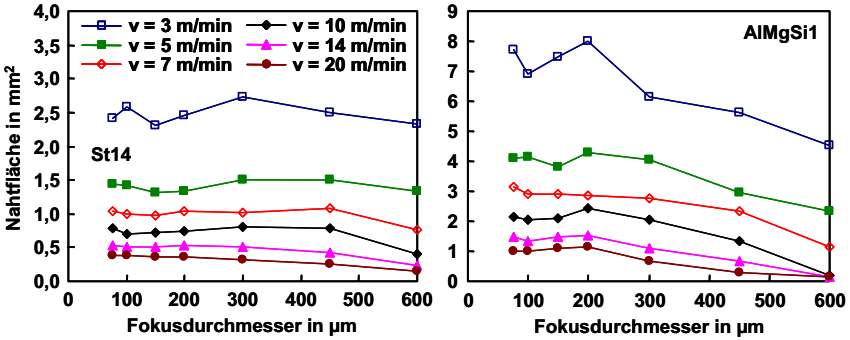

Bild 5.9: Nahtquerschnittsfläche als Funktion des Fokusdurchmessers für die Werkstoffe St14 und AlMgSi1 ($P_L = 3$ kW, kein Schutzgas).

Der Verlauf der Nahtquerschnittsfläche in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit und dem Fokusdurchmesser als Parameter ist in Bild 5.10 dargestellt. Für den Stahlwerkstoff St14 ergibt sich für die verschiedenen Fokusdurchmesser eine weitgehend identische Nahtquerschnittsfläche. Dies bedeutet, dass die Querschnittsfläche im Wesentlichen mit der Laserleistung skaliert, welche das aufgeschmolzene Volumen bestimmt. Eine Ausnahme hiervon stellen die Fokusdurchmesser 600 µm und 450 µm dar. Bei dem Fokusdurchmesser 600 µm spaltet sich bei dem Vorschub 7 m/min die Kurve von den anderen ab, bei dem Fokusdurchmesser 450 µm erfolgt dies bei dem Vorschub 10 m/min. Diese Abspaltung charakterisiert wiederum den Übergangsbereich. Edelstahl verhält sich analog zu St14, die Abspaltung der Kurve für den Fokus-

durchmesser 600 µm erfolgt aufgrund der geringeren Wärmeleitfähigkeit erst bei einem Vorschub von 10 m/min (ohne Abb.).

Die Aluminiumlegierung AlMgSi1 verhält sich ebenfalls ähnlich. Allerdings ist bei dem Fokusdurchmesser 600 µm die Kennlinie bereits vollständig abgespalten. Der Knick dieser Kennlinie bei dem Vorschub 10 m/min kennzeichnet, wie bereits erwähnt, die Schwelle. Für den Fokusdurchmesser 450 µm ergibt sich die Abspaltung bei dem Vorschub 5 m/min, die Schwelle wird aber noch nicht erreicht.

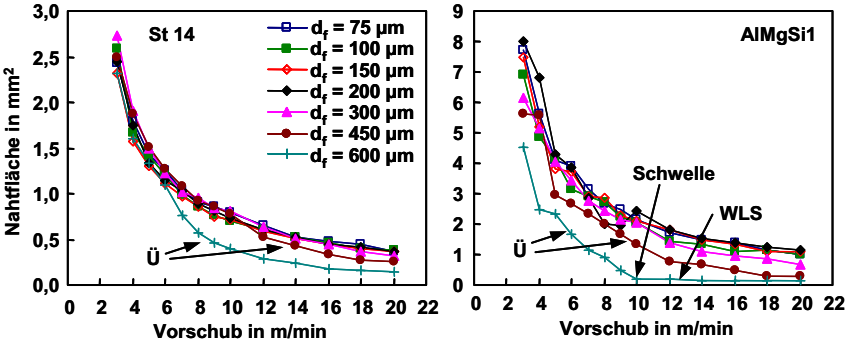

Bild 5.10: Nahtquerschnittsfläche als Funktion des Vorschubs für verschiedene Fokusdurchmesser und die Werkstoffe St14 und AlMgSi1 (P_L = 3 kW, kein Schutzgas).

Vergleicht man in Bild 5.11 die Nahtquerschnittsflächen der beiden Stahlwerkstoffe in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit bei jeweils gleichem Fokusdurchmesser, so ergibt sich ein nahezu identischer Verlauf. Für Vorschübe von kleiner als v = 10 m/min ist die Nahtquerschnittsfläche von Edelstahl aufgrund der geringeren Wärmeleitungsverluste (geringere Wärmeleitfähigkeit) etwas größer. Oberhalb der Vorschubgeschwindigkeit 10 m/min ist weder ein Einfluss des Werkstoffs noch ein Einfluss des Fokusdurchmessers zu erkennen. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten die Wechselwirkungszeiten (und damit die Diffusionslängen) sehr klein sind. Hier spielen die Wärmeleitungsverluste keine Rolle mehr, das Maximum des thermischen Wirkungsgrades (vgl. Bild 2.16) ist erreicht.

Die Nahtquerschnittsfläche ist für Aluminium im Vergleich zu den Stahlwerkstoffen aufgrund der geringeren Schmelztemperatur und der höheren Temperaturleitfähigkeit größer. Für Vorschübe von kleiner als v = 10 m/min ist die Nahtquerschnittsfläche unabhängig vom Fokusdurchmesser. Oberhalb des Vorschubs 10 m/min kann mit dem Fokusdurchmesser 150 µm eine etwas größere Nahtquerschnittsfläche aufgeschmolzen

werden als mit dem Fokusdurchmesser 300 µm. Wie bereits im Zusammenhang mit dem Prozesswirkungsgrad (siehe Bild 5.7) gezeigt, beginnt für den Fokusdurchmesser 300 µm der Übergangsbereich bei dem Vorschub 10 m/min. Das damit verbundene Absinken des Einkoppelgrades führt zu dem Absinken des Nahtquerschnitts.

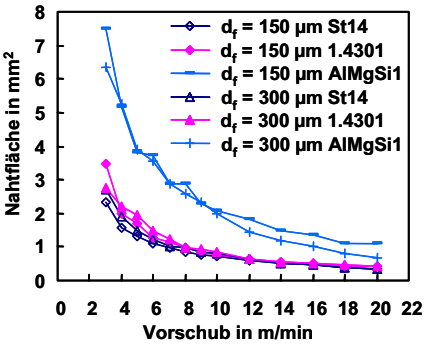

Bild 5.11: Vergleich der Nahtquerschnittsflächen bei den verschiedenen Werkstoffen sowie den Fokusdurchmessern 300 µm und 150 µm (P_L = 3 kW, kein Schutzgas).

5.1.3 Einfluss des Fokusdurchmessers auf die Nahtform

Im vorangegangenen Kapitel hat sich gezeigt, dass mit der Verringerung des Fokusdurchmessers von 600 µm auf 200 µm die Einschweißtiefe gesteigert werden kann. Bei dem Fokusdurchmesser 200 µm liegt scheinbar eine Gültigkeitsgrenze der Proportionalität von Einschweißtiefe und reziprokem Fokusdurchmesser. Die Nahtbreite zeigt für $d_f \geq 300$ µm ein anderes Verhalten als für $d_f \leq 200$ µm. Da indessen aber die Nahtquerschnittsfläche unabhängig vom Fokusdurchmesser ist, soll nun in diesem Kapitel untersucht werden, welchen Einfluss der Fokusdurchmesser auf die Geometrie der Schweißnaht hat.

Bild 5.12 zeigt für den Stahlwerkstoff St14 Schliffbilder der untersuchten Fokusdurchmesser bei verschiedenen Vorschubgeschwindigkeiten. Mit den Fokusdurchmessern 150 µm und 200 µm lassen sich über den gesamten Vorschubbereich die schlanksten und tiefsten Schweißnähte erzielen. Wie bereits in Bild 5.3 gezeigt wurde, sind bei diesen Fokusdurchmessern die Einschweißtiefen nahezu gleich groß. Mit den beiden kleinsten Fokusdurchmessern (75µm und 100 µm) lassen sich Einschweißtiefen von vergleichbarer Größe erzielen, die aber im Vergleich zu d_f = 150 µm und d_f = 200 µm kleiner sind. Auffällig ist, dass mit steigendem Vorschub für die beiden kleinsten Fokusdurchmesser ein Übergang zu tropfenförmigen Nahtquerschnitten er-

folgt. Für Fokusdurchmesser $d_f \geq 300$ µm sind die Schweißnähte deutlich breiter, weniger tief und von u-förmigem Querschnitt. Die Fokusdurchmesser lassen sich nach der jeweiligen Nahtform in die Bereiche A, B und C klassifizieren. Der Edelstahl 1.4301 zeigt zu St14 analoges Verhalten, weshalb hierauf nicht näher eingegangen wird.

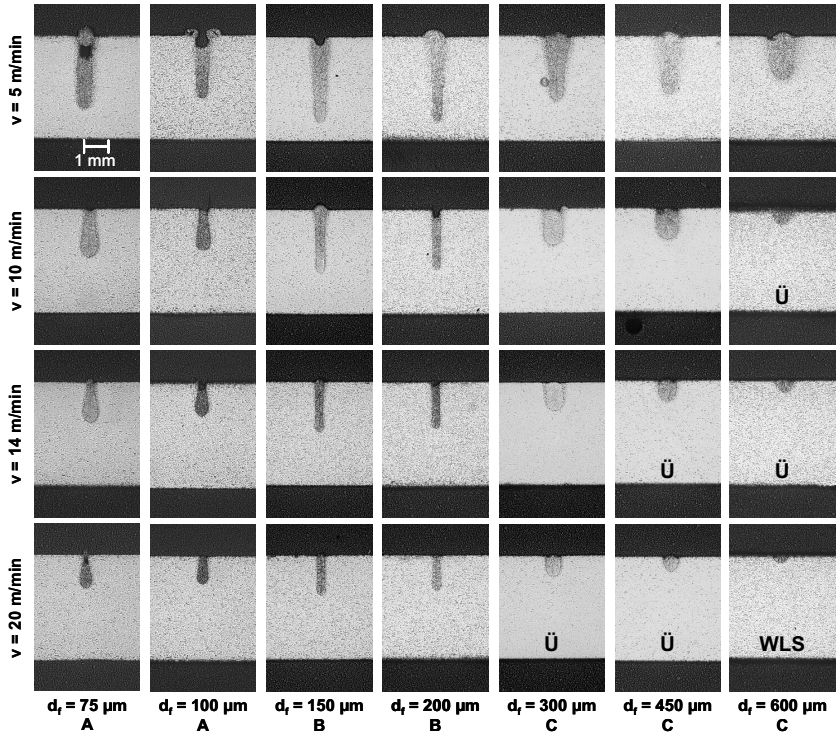

Bild 5.12: Nahtformen von St14 in Abhängigkeit des Fokusdurchmessers bei den Vorschüben 5 m/min, 10 m/min, 14 m/min und 20 m/min (P_L = 3 kW, kein Schutzgas) (WLS: Wärmeleitungsschweißen, Ü: Übergangsbereich).

Die Aluminiumlegierung AlMgSi1 zeigt ebenfalls ein vom Fokusdurchmesser abhängiges Verhalten, siehe dazu Bild 5.13. Allerdings sind die dabei vorhandenen Nahtformen im Vergleich zu den Stahlwerkstoffen unterschiedlich.

Bei den Fokusdurchmessern 75 µm und 100 µm ist die Schweißnaht u-förmig, bei den Fokusdurchmessern 150 µm und 200 µm amphorenförmig (Tropfenform mit Verbreiterung im oberen Bereich). Die Amphorenform führt zu einem ungünstigen Erstar-

rungsverhalten insbesondere im Bereich der breitesten Stelle, was zur Bildung von Heißrissen führt, die in den Querschliffen deutlich zu erkennen sind. Für Fokusdurchmesser $d_f \geq 300$ µm ergibt sich eine u-förmige Nahtform, die mit steigendem Vorschub in eine v-Form übergeht. Analog zu St14 lassen sich auch bei AlMgSi1 die Fokusdurchmesser nach der jeweiligen Nahtform in die Bereiche A, B und C klassifizieren. Diese Bereiche wurden bereits bei der Diskussion der Nahtbreite (Bild 5.8) klassifiziert, sodass scheinbar ein direkter Zusammenhang zwischen Nahtform und Nahtbreite besteht. Es wird vermutet, dass die aus den Nahtformen resultierenden Wärmeleitungsbedingungen die Nahtbreiten bestimmen.

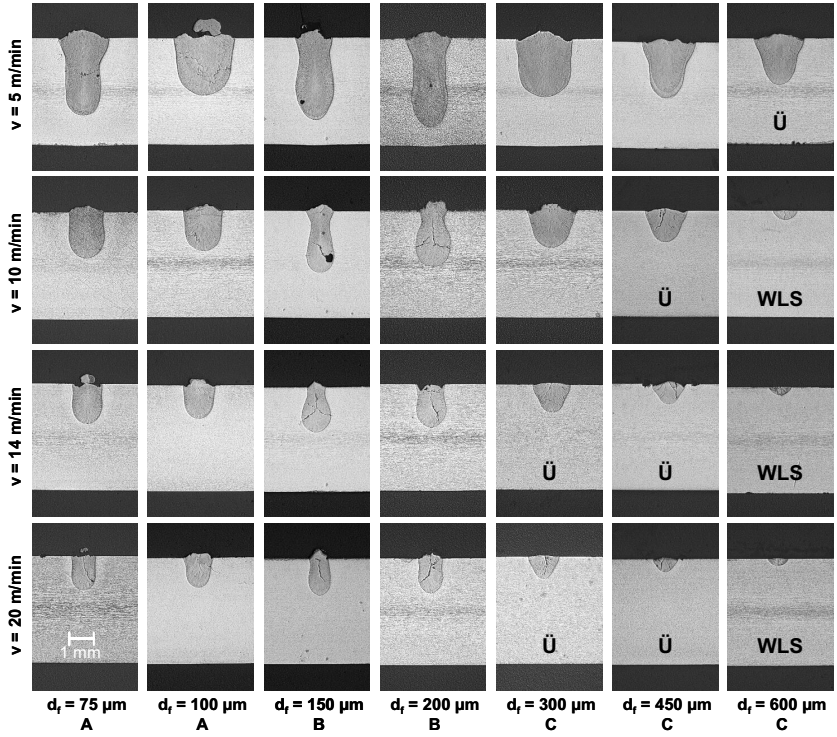

Bild 5.13: Nahtformen von AlMgSi1 in Abhängigkeit des Fokusdurchmessers bei den Vorschüben 5 m/min, 10 m/min, 14 m/min und 20 m/min (P_L = 3 kW, kein Schutzgas) (WLS: Wärmeleitungsschweißen, Ü: Übergangsbereich).

Mit den Fokusdurchmessern 200 µm und 150 µm sowie 100 µm und 75 µm treten bei allen Werkstoffen jeweils identische Nahtformen auf, die Einschweißkurven liegen sehr nahe beisammen. Wie Tabelle 5.1 zeigt, ist bei den jeweils nahe beisammen lie-

genden Einschweißkurven das bei der Fokussierung verwendete Abbildungsverhältnis und damit der Divergenzwinkel des fokussierten Laserstrahls gleich.

d_f [µm]	600	450	300	200	150	100	75
f_f [mm]	200	150	100	200	200	100	100
β	1	0,75	0,5	1	1	0,5	0,5
θ_f [°]	11,4	15,2	22,6	11,4	11,4	22,6	22,6

Tabelle 5.2: Übersicht über die Divergenzwinkel θ_f bei den verschiedenen Fokusdurchmessern. Angegeben ist jeweils der ganze Öffnungswinkel (siehe Bild 2.3).

Linien konstanter Leistungsdichte (Isophoten)

Die sich aus der Laserstrahlpropagation ergebende Form des fokussierten Laserstrahls definiert die Linien konstanter Leistungsdichte, die sogenannten Isophoten. Im Bezug auf die Nahtausbildung beim Laserstrahlschweißen sind nach [36] die Isophoten von Bedeutung. Bei einem ruhenden Laserstrahl (v = 0 m/min) bilden sich die Isophoten rotationssymmetrisch um die Laserstrahlachse aus. Die Isophote oder besser die Fläche konstanter Leistungsdichte, an der gerade Dampftemperatur erreicht wird („Verdampfungsisophote"), bestimmt die Form der Dampfkapillare. Nach [36] kann angenommen werden, dass insbesondere bei Stahlwerkstoffen die Begrenzung des Schmelzbades mit der Form der Dampfkapillare (kleine Diffusionslänge aufgrund geringer Temperaturleitfähigkeit) und damit den Isophoten einhergeht. An dieser Stelle wird untersucht, ob mit Hilfe der Isophoten quer zur Vorschubrichtung Rückschlüsse auf die Nahtform getroffen werden können.

Beim Schweißen mit Festkörperlasern ergibt sich aufgrund der Abbildung des Faserendes im Fokus als Leistungsdichteverteilung E(x,y) ein sogenanntes Top-Hat-Profil, welches analytisch mit der Supergaußfunktion [67]

$$E(x,y) = E_0 \cdot e^{\left[-2\left(\frac{x^2+y^2}{w_0^2}\right)^N\right]} \tag{5.4}$$

beschrieben werden kann. Mit

$$r^2 = x^2 + y^2 \tag{5.5}$$

lässt sich die Leistungsdichteverteilung im Fokus berechnen. Wie aus Bild 5.14 ersichtlich ist, ergibt sich im Fokus mit steigendem N eine zunehmend homogenere Verteilung (N = 1 entspricht der Gauß-Verteilung).

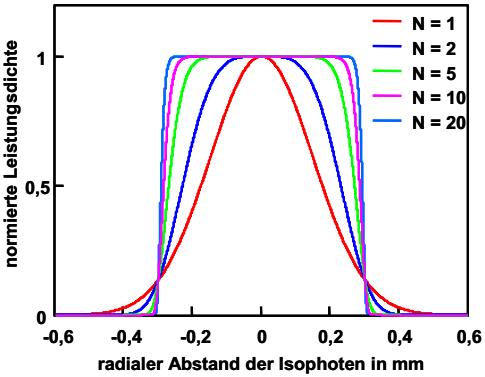

Bild 5.14: Mit der Supergaußfunktion berechnete normierte Leistungsdichteverteilung im Fokus ($d_f = 600$ µm).

Die Supergaußfunktion aus Gleichung (5.4) eignet sich jedoch lediglich zur Bestimmung der Leistungsdichteverteilung im Fokus. Die Isophoten entlang der Strahlausbreitungsrichtung lassen sich damit nicht berechnen, da die Propagation eines fasergeführten Laserstrahls mit Top-Hat-Profil im Fokus nicht adäquat durch den Gaußformalismus beschrieben werden kann. Für eine exakte Bestimmung der Propagation ist eine aufwändige numerische Berechnung erforderlich [67], weshalb an dieser Stelle der Verlauf der Isophoten anhand einer gaußförmigen Leistungsdichteverteilung [4]

$$E(x,y,z) = E_0 \cdot \left(\frac{w_0}{w(z)}\right)^2 \cdot e^{\left[-\frac{2(x^2+y^2)}{w^2(z)}\right]} \tag{5.6}$$

dargestellt wird. In einiger Entfernung von der Strahltaille dürfte die berechnete der tatsächlichen Verteilung entsprechen, was für die folgende qualitative Diskussion genügen möge. Unter Berücksichtigung des Strahlradius

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_{Rf}}\right)^2} \tag{5.7}$$

und mit Gleichung (5.5) folgt aus Gleichung (5.6)

$$r(z) = \sqrt{-\frac{1}{2} \cdot w_0^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{z}{z_{Rf}}\right)^2\right] \cdot \ln\left[\frac{E}{E_0} \cdot \left[1 + \left(\frac{z}{z_{Rf}}\right)^2\right]\right]}. \tag{5.8}$$

Werte für die in Gleichung (5.8) enthaltenen Strahlparameter mit $w_o = d_f/2$ sind in Tabelle 5.3 enthalten.

d_f [µm]	f_f [mm]	z_{Rf} [mm]	θ_f [°]
600	200	3,00	11,4
450	150	1,69	15,2
300	100	0,75	22,6
200	200	1,00	11,4
150	200	0,75	11,4
100	100	0,25	22,6
75	100	0,19	22,6

Tabelle 5.3: Rayleighlänge, Brennweite der Fokussierlinse und Divergenzwinkel des fokussierten Laserstrahls bei den verwendeten Fokusdurchmessern (Rayleighlänge z_{Rf} berechnet nach Gleichung (2.11)).

Der Verlauf der Isophoten wird für verschiedene feste Quotienten E/E_0 berechnet. Damit sich die Isophoten bei gleicher Leistungsdichte E bestimmen lassen, werden diese auf die kleinste Leistungsdichte E_0 im Fokus ($d_f = 600$ µm) normiert. Der Verlauf der berechneten Isophoten ist in Bild 5.15 dargestellt.

Für die Isophoten mit $E/E_0 \geq 0{,}3$ ist bei dem Fokusdurchmesser 600 µm $r(0) < w(0)$. Mit steigendem z verlaufen die Isophoten zunächst parallel zur Strahlausbreitungsrichtung. Im Gegensatz dazu ist für $E/E_0 \leq 0{,}1$ bereits $r(0) > w(0)$ und es ergibt sich eine Ausbauchung der Isophoten, die sich dem Verlauf des Strahlradius annähern. Bei dem Fokusdurchmesser 450 µm ist die Isophote mit $E/E_0 = 0{,}3$ und $r(0) \approx w(0)$ bereits ausgebaucht. Die Bedingung $r(0) \geq w(0)$ ist für Fokusdurchmesser $d_f \leq 200$ µm für $E/E_0 \leq 0{,}9$ erfüllt, sodass alle in Bild 5.15 eingezeichneten Isophoten eine Ausbauchung aufweisen. In Gleichung (5.8) bestimmt die Rayleighlänge den Verlauf der Isophoten, welche über den geometrischen Zusammenhang

$$z_{Rf} = \frac{w(0)}{\theta_f} \tag{5.9}$$

festgelegt ist [4]. Damit ist für einen großen Divergenzwinkel θ_f des fokussierten Laserstrahls (starke Fokussierung) die Ausbauchung der Isophoten stärker ausgeprägt. Der Divergenzwinkel bestimmt maßgeblich den Verlauf der Isophoten.

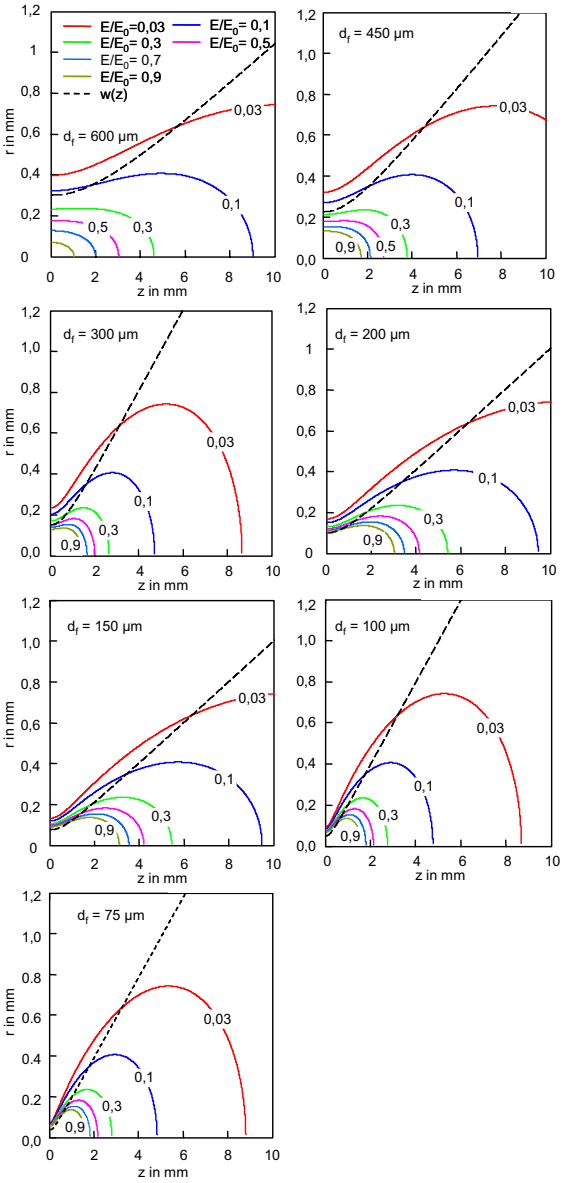

Bild 5.15: Berechneter Verlauf der Isophoten sowie des Strahlradius für verschiedene Fokusdurchmesser mit normierter Leistungsdichte E_0.

Bei dem größten Fokusdurchmesser ($d_f = 600$ µm) ist die Leistungsdichte E_0 im Fokus am geringsten. Dies bedeutet, dass für die Isophote, an der gerade die Verdampfungstemperatur erreicht wird, das Verhältnis E/E_0 nahe eins liegt und dementsprechend keine Ausbauchung vorhanden ist. Ähnliche Verhältnisse ergeben sich für den Fokusdurchmesser 450 µm. Wie Bild 5.16 zeigt, ergeben sich für St14 und AlMgSi1 bei dem Fokusdurchmesser 450 µm Schweißnähte mit u-förmigem Querschnitt. Bei dem Vorschub 3 m/min führt eine Konvektionsströmung zu einem Nagelkopf und damit zu einer Nahtverbreiterung im oberen Bereich. Als Ursache für diese Strömung kommen die durch den ausströmenden Metalldampf in die Schmelze eingeleiteten Schubspannungen und der Gradient der Oberflächenspannung (Marangoniströmung) in Frage (siehe Kapitel 2.4.2). Da bei diesen Ergebnissen kein Schutzgas verwendet wurde, kann insbesondere bei Aluminium von einer oxidierten Schmelzbadoberfläche ausgegangen werden [68], weshalb der Gradient der Oberflächenspannung nicht durch die Umgebungsatmosphäre beeinflusst wird. Als Ursache für den Nagelkopf ist in diesem Fall der ausströmende Metalldampf anzusehen [68]. Durch die Erhöhung des Vorschubs auf v = 6 m/min wird der Nagelkopf kleiner.

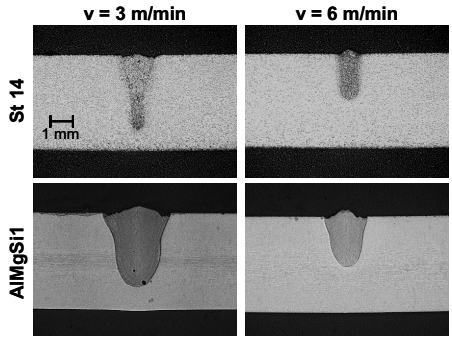

Bild 5.16: Querschliffe von St14 und AlMgSi1 für den Fokusdurchmesser 450 µm bei den Vorschüben 3 m/min und 6 m/min ($P_L = 3$ kW, kein Schutzgas, $\theta_f = 15{,}2°$).

Die Leistungsdichte E_0 ist für den kleinsten Fokusdurchmesser ($d_f = 75$ µm) am größten. Das Verhältnis E/E_0 ist für die Isophote, an der gerade Verdampfungstemperatur erreicht wird, klein, weshalb sich eine starke Ausbauchung der Isophoten ergibt. Wie aus Bild 5.17 ersichtlich ist, ergibt sich für Stahl bei einem Fokusdurchmesser von 75 µm ein tropfenförmiger Nahtquerschnitt, wobei sich die Nahtform dem Divergenzwinkel des fokussierten Laserstrahls annähert. Diese Annäherung an den Divergenzwinkel ist auch bei dem Fokusdurchmesser 150 µm vorhanden. Aufgrund des im Vergleich zu dem Fokusdurchmesser 75 µm nur halb so großen Divergenzwinkel ergibt

sich eine schlankere Naht mit einer nur geringfügigeren Nahtverbreiterung im Bereich des Nahtgrundes. Bei den Fokusdurchmessern 75 µm und 100 µm sowie 150 µm und 200 µm ist jeweils der Divergenzwinkel von gleicher Größe, was zu identischen Verhältnissen führt. Damit ist eindeutig belegt, dass bei Stahl der Divergenzwinkel des fokussierten Laserstrahls und damit der Verlauf der Isophoten die Nahtform maßgeblich beeinflusst.

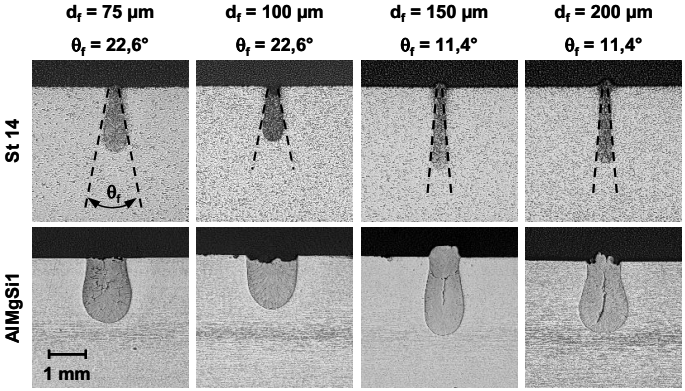

Bild 5.17: Querschliffe von St14 und AlMgSi1 für die Fokusdurchmesser 75 µm, 100 µm, 150 µm und 200 µm (P_L = 3 kW, v = 12 m/min, kein Schutzgas). Die gestrichelten Linien stellen den Divergenzwinkel des fokussierten Laserstrahls dar.

Grundsätzlich ähnliche Verhältnisse sind auch für Aluminium zu beobachten, allerdings ergeben sich aufgrund der im Vergleich zu Stahl anderen Materialeigenschaften (geringerer Absorptionsgrad, höhere Temperaturleitfähigkeit) im Detail etwas andere Verhältnisse. Sie seien nachfolgend anhand der in Bild 5.18 skizzierten Modellvorstellung zur Kapillarausbildung diskutiert. Dabei werden, trotz der nicht allzu großen Unterschiede zwischen den Durchmessern, die geometrische Ausbreitung und die Reflexionen von Teilstrahlen modellhaft betrachtet.

Bild 5.18 a zeigt die Kapillarausbildung quer zur Vorschubrichtung (Schliffebene) für Stahl bei den Fokusdurchmessern 150 µm und 200 µm. Es wird eine dem Fokusdurchmesser vergleichbare, kleine Kapillaröffnung angenommen. An den Stellen, an denen eine Wechselwirkung zwischen Laserstrahl (der skizzierte Teilstrahl entspricht in etwa dem Strahlrand, wo die Leistungsdichte ausreicht, um Verdampfungstemperatur zu erreichen) und Materie stattfindet, kommt es zu einer lokalen Verdampfung. Im oberen Bereich der Dampfkapillare (❶ in Bild 5.18 a) ist die Leistungsdichte so hoch, dass selbst bei einem nahezu senkrechten Auftreffen des Laserstrahls auf die Oberflä-

che der Dampfkapillare das Material verdampft. Die Form der Dampfkapillare nähert sich dadurch dem Verlauf der Isophoten und damit dem Divergenzwinkel des fokussierten Laserstrahls an, was die Verbreiterung der Dampfkapillare mit zunehmender Tiefe bewirkt. In der Tiefe (❷ in Bild 5.18 a) reicht die Leistungsdichte nicht mehr zum Verdampfen aus, sodass dort die Dampfkapillare flacher wird und Reflexionen stattfinden. Bei Stahl ist aufgrund der geringen Temperaturleitfähigkeit und der daraus resultierenden kleinen Diffusionslänge (Gleichung (5.2)) die Schmelzschichtdicke klein. Es bildet sich eine der Kapillarform ähnliche, tropfenförmige Schweißnaht aus. Wird der Fokusdurchmesser auf 100 µm bzw. 75 µm verkleinert, verkleinert sich die Öffnung der Dampfkapillare. Gleichzeitig verdoppelt sich aber der Divergenzwinkel (siehe Tabelle 5.3). Trotz der höheren Leistungsdichte reicht bereits bei geringerer Tiefe die Leistungsdichte nicht mehr zum Verdampfen aus, weshalb die Einschweißtiefe im Vergleich zu den beiden größeren Fokusdurchmessern (200 µm und 150 µm) geringer ist (Bild 5.18 b). Die Tropfenform ist bei größerem Divergenzwinkel stärker ausgeprägt.

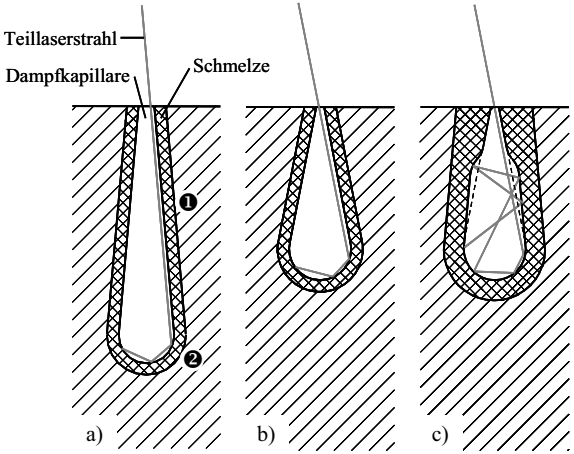

Bild 5.18: Modellvorstellung der Kapillarausbildung und deren Auswirkung auf die Form der Schweißnaht: a) kleiner Divergenzwinkel bei Stahl ($d_f = 200$ µm bzw. $d_f = 150$ µm); b) großer Divergenzwinkel bei Stahl ($d_f = 100$ µm bzw. $d_f = 75$ µm); c) großer Divergenzwinkel bei Aluminium ($d_f = 100$ µm bzw. $d_f = 75$ µm). Der Laserstrahl ist anhand eines Teilstrahls skizziert. Der Öffnungsdurchmesser der Dampfkapillare entspricht jeweils dem Fokusdurchmesser.

Im Vergleich zu Stahl ist für Aluminium infolge des geringeren Absorptionsgrades eine höhere Anzahl von Vielfachreflexionen innerhalb der Dampfkapillaren erforderlich. Die bei Aluminium im Vergleich zu Stahl verstärkte Neigung zu Kapillarinstabi-

litäten führt vermutlich zu einer Art Homogenisierung der Absorption, was zu einer Verlagerung der Einkopplung entgegen der Strahlausbreitungsrichtung und damit zu einer in der Mitte verbreiterten Dampfkapillare führt (Bild 5.18 c). Des Weiteren ist nach Gleichung (5.2) die Diffusionslänge aufgrund der hohen Temperaturleitfähigkeit von Aluminium größer als bei Stahl, was zu einer dickeren Schmelzschicht und damit zu einer breiteren Schweißnaht führt. Bei kleinem Divergenzwinkel (d_f = 100 µm bzw. d_f = 75 µm) ist dieser Effekt stärker ausgeprägt, was bei Aluminium im Gegensatz zu Stahl zu einer u-förmigen Schweißnaht führt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Nahtausbildung bei den kleinsten hier verwendeten Fokusdurchmessern im Wesentlichen vom Divergenzwinkel bestimmt wird, da dieser den Verlauf der Isophoten maßgeblich beeinflusst. Unterschiedliche Materialeigenschaften können zu veränderten Nahtformen führen. Der große Divergenzwinkel bei den kleinsten Fokusdurchmessern führt zu der bereits in Kapitel 5.1.2 beschriebenen Gültigkeitsgrenze bisher bekannter Zusammenhänge. In Kapitel 5.1.4 wird untersucht, ob sich diese Gültigkeitsgrenze durch die Verringerung des Divergenzwinkels überwinden lässt.

5.1.4 Variation des Divergenzwinkels

Im vorangegangenen Kapitel wurde deutlich, dass der Divergenzwinkel den Verlauf der Isophoten maßgeblich beeinflusst. Bild 5.19 zeigt die Veränderung der Isophoten durch Verringerung des Divergenzwinkels (Vergrößerung der Rayleighlänge in Gleichung (5.8)) infolge eines geringeren Strahlparameterprodukts. In diesem Kapitel wird untersucht, ob sich bei konstantem Fokusdurchmesser die Verringerung des Divergenzwinkels zu einer Steigerung der Einschweißtiefe nutzen lässt, um so die bereits mehrfach beschriebene Gültigkeitsgrenze zu überwinden und damit die Prozessgrenzen zu erweitern.

Die gute Strahlqualität des Scheibenlasers ermöglicht die Verkleinerung des Divergenzwinkels, in dem die Brennweite f_F der Fokussierlinse und damit der Arbeitsabstand vergrößert werden kann (siehe dazu auch Bild 2.2). Im Folgenden wird bei den Fokusdurchmessern 300 µm und 100 µm der Divergenzwinkel variiert.

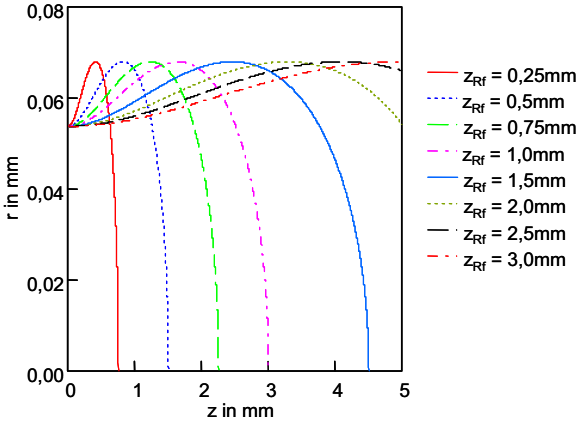

Bild 5.19: Veränderung der Isophoten durch Vergrößerung der Rayleighlänge (d_f = 100 µm, E/E_0 = 0,1).

Fokusdurchmesser d_f = 300 µm

Der Fokusdurchmesser 300 µm wird im Hochleistungsbereich typischerweise mit einem LLK-Kerndurchmesser von 600 µm und einem Abbildungsverhältnis von 0,5 realisiert (siehe Tabelle 5.4). Mit der besseren Strahlqualität des Scheibenlasers lässt dieser Fokusdurchmesser abweichend von der Standardfokussierung mit einem Abbildungsverhältnis von 2 erzeugen, womit der Divergenzwinkel des fokussierten Laserstrahls deutlich reduziert wird.

d_k [µm]	600	150
f_k [mm]	200	100
f_f [mm]	100	200
D [mm]	40	20
θ_f [°]	22,6	5,7

Tabelle 5.4: Realisierung des Fokusdurchmessers d_f = 300 µm mit verschiedenen Fokussierungen und Kerndurchmessern der LLK des Scheibenlasers.

Wie Bild 5.20 zeigt, ist bei St14 und AlMgSi1 in dem untersuchten Vorschubgeschwindigkeitsbereich ein nur sehr geringfügiger Einfluss des Divergenzwinkels auf die Einschweißtiefe vorhanden. Der Edelstahl 1.4301 zeigt das gleiche Verhalten (ohne Abb.). Bei der Betrachtung der dazugehörigen Querschliffe in Bild 5.21 und Bild 5.22 wird allerdings ein deutlicher Einfluss des Divergenzwinkels auf die Naht-

form erkennbar. Eine weniger starke Fokussierung und somit ein kleinerer Divergenzwinkel ($\theta_f = 5{,}7°$) führt im Nahtgrund zu spitzeren Schweißnähten. Des weiteren sind bei AlMgSi1 die Schweißnähte etwas schlanker.

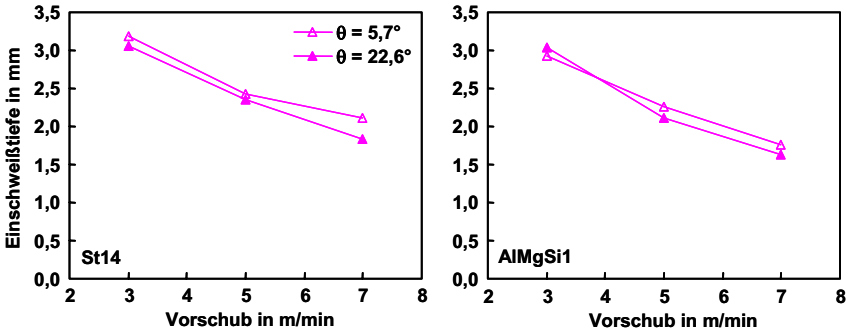

Bild 5.20: Einfluss des Divergenzwinkels auf die Einschweißtiefe bei dem Fokusdurchmesser $d_f = 300$ µm (St 14, AlMgSi1, $P_L = 3$ kW, kein Schutzgas) [66].

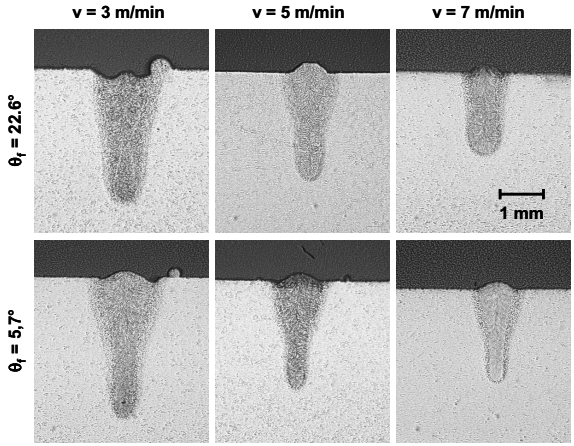

Bild 5.21: Vergleich der Schliffbilder von St14 bei unterschiedlichem Divergenzwinkel ($P_L = 3$ kW, $d_f = 300$ µm, kein Schutzgas) [66].

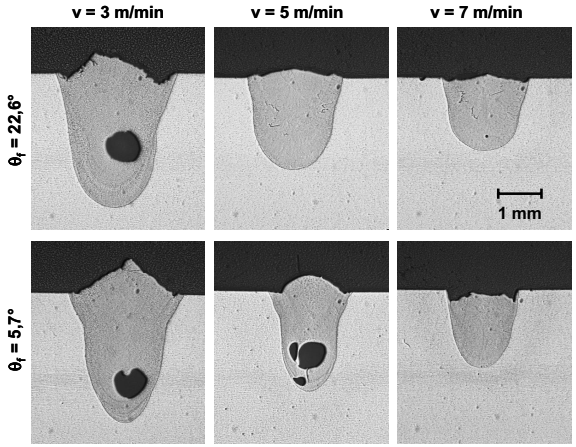

Bild 5.22: Vergleich der Schliffbilder von AlMgSi1 bei unterschiedlichem Divergenzwinkel (P_L = 3 kW, d_f = 300 µm, kein Schutzgas) [66].

Fokusdurchmesser d_f = 100 µm

Ein Fokusdurchmesser von d_f = 100 µm kann nur mit kleinem Strahlparameterprodukt erzielt werden, sodass die Auswahl von Fokussierung und Kerndurchmesser des Lichtleitkabels beschränkt ist. Wie aus Tabelle 5.5 ersichtlich ist, kann bei diesem Fokusdurchmesser ein kleinster Divergenzwinkel von lediglich θ_f = 17,1° erreicht werden. Der kleinste Divergenzwinkel (θ_f = 17,1°) ist wiederum nur abweichend von der Standardfokussierung (θ_f = 22,6°) realisierbar.

d_k [µm]	200	150
f_k [mm]	200	150
f_f [mm]	100	100
D [mm]	40	30
θ_f [°]	22,6	17,1

Tabelle 5.5: Realisierung des Fokusdurchmessers d_f = 100 µm mit verschiedenen Fokussierungen und Kerndurchmessern der LLK des Scheibenlasers.

In Bild 5.23 sind die Einschweißkurven für St14 und AlMgSi1 für die beiden Divergenzwinkel dargestellt. Mit dem Fokusdurchmesser 100 µm kann selbst mit einer Verringerung des Divergenzwinkels auf nur θ_f = 17,1° die Einschweißtiefe deutlich gesteigert werden. Der Edelstahl 1.4301 zeigt das gleiche Verhalten (ohne Abb.). Bei der

Betrachtung der dazugehörigen Querschliffe in Bild 5.24 und Bild 5.25 wird ein Einfluss des Divergenzwinkes auf die Nahtform erkennbar, welcher im Vergleich zum Fokusdurchmesser 300 µm deutlicher ausgeprägt ist. Bei Stahl führt die Verringerung des Divergenzwinkels zu einer schlankeren Schweißnaht. Der tropfenförmige Nahtquerschnitt ist weniger stark ausgeprägt, aber noch erkennbar. Wiederum erfolgt eine Annäherung der Nahtform an den Divergenzwinkel bei hoher Vorschubgeschwindigkeit. Im Falle von Aluminium führt die Verringerung des Divergenzwinkels ebenfalls zu einer schlankeren Naht, die jedoch in eine Amphoren-Form übergeht.

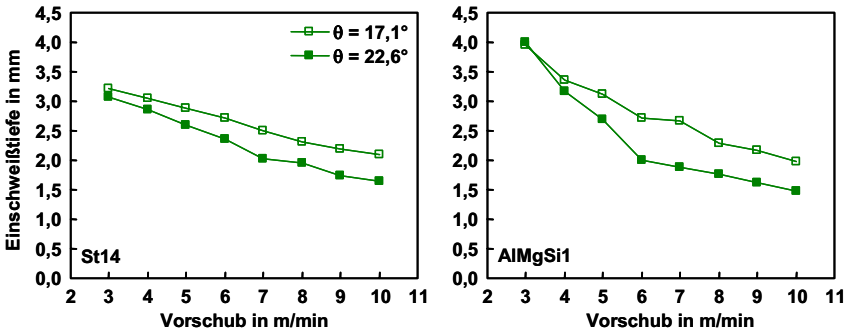

Bild 5.23: Einfluss des Divergenzwinkels auf die Einschweißtiefe bei dem Fokusdurchmesser d_f = 100 µm (St 14, AlMgSi1, P_L = 3 kW, kein Schutzgas) [46, 66, 69].

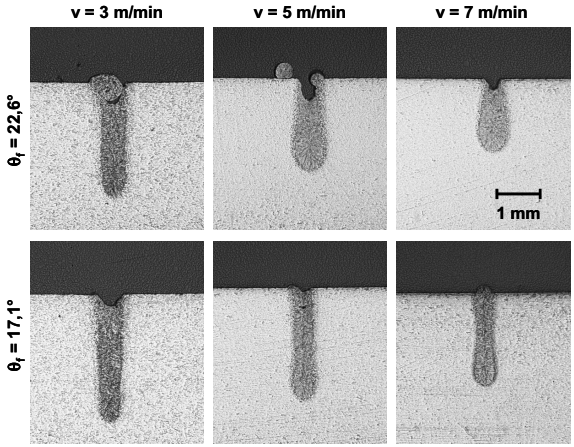

Bild 5.24: Vergleich der Schliffbilder von St14 bei verschiedenem Divergenzwinkel (P_L = 3 kW, d_f = 100 µm, kein Schutzgas) [66].

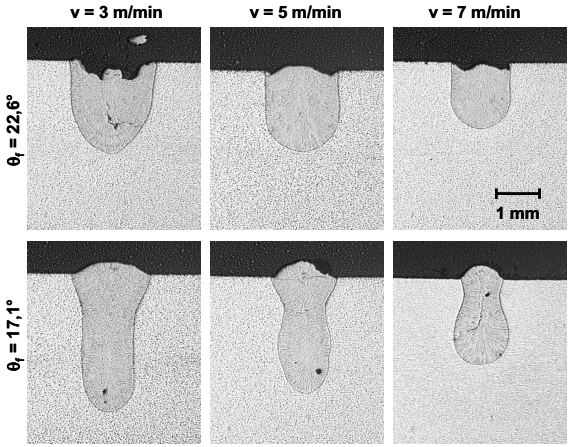

Bild 5.25: Vergleich der Schliffbilder von AlMgSi1 bei verschiedenen Divergenzwinkeln (P_L = 3 kW, d_f = 100 µm, kein Schutzgas) [66].

Vergleich der Ergebnisse mit dem Fokusdurchmesser 150 µm

Bild 5.26 zeigt den Vergleich der mit dem Fokusdurchmesser 100 µm (θ_f = 22,6° und θ_f = 17,1°) erzielten Ergebnisse mit dem Fokusdurchmesser 150 µm (θ_f = 11,4°) anhand von Schliffbildern. Im Falle von St14 ist für d_f = 100 µm und großem Divergenzwinkel die Schweißnaht tropfenförmig, mit d_f = 150 µm schlank und tief. Die Verringerung des Divergenzwinkels bei dem Fokusdurchmesser 100 µm führt zu einer schlankeren und tieferen Schweißnaht, im Nahtgrund ist die Tropfenform noch erkennbar.

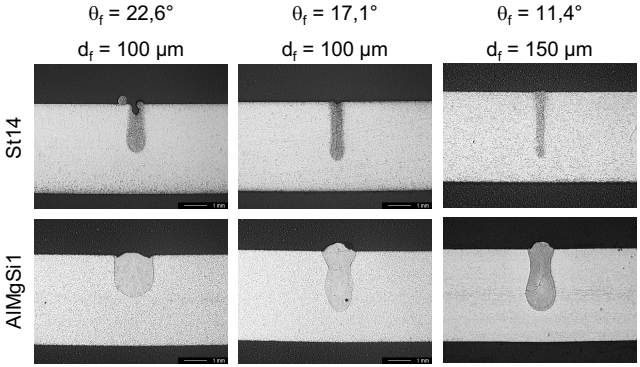

Bild 5.26: Vergleich der Schliffbilder für St14 und AlMgSi1 bei verschiedenem Fokusdurchmesser und Divergenzwinkeln (P_L = 3 kW, v = 5 m/min, kein Schutzgas).

Bei Aluminium geht die Schweißnahtform bei Verringerung des Divergenzwinkels ($d_f = 100$ µm) von einer u-Form in eine Amphoren-Form über, die auch bei dem Fokusdurchmesser 150 µm vorhanden ist. Somit lassen sich bei beiden Werkstoffen mit der Verringerung des Divergenzwinkels die Schweißergebnisse des Fokusdurchmessers 100 µm in Richtung der Ergebnisse von 150 µm überführen.

5.1.5 Potential guter Fokussierbarkeit

Aus den in 5.1.4 gewonnenen Erkenntnissen lässt sich das Potential einer noch besseren Fokussierbarkeit (Strahlqualität) bei kleinen Fokusdurchmessern ableiten. Die Diagramme in Bild 5.27, bei denen die Einschweißtiefe als Funktion des inversen Fokusdurchmessers (gemäss dem Skalierungsgesetz

$$t \sim \frac{1}{d_f} \tag{5.10}$$

aus Gleichung (5.1) für $d_f \geq 200$ µm) aufgetragen ist, zeigen zusammenfassend und anschaulich den Einfluss der Fokussierbarkeit. Für Fokusdurchmesser $d_f \geq 200$ µm ergibt sich bei konstantem Vorschub linearer Verlauf der Einschweißtiefe gemäß dem Skalierungsgesetz. Wie die Ergebnisse im vorangegangenen Kapitel gezeigt haben, kann in diesem Bereich eine Verringerung des Divergenzwinkels nicht zur Steigerung der Einschweißtiefe genutzt werden. Der Fokusdurchmesser ist in diesem Bereich die bestimmende Größe. Für Fokusdurchmesser $d_f \leq 150$ µm hingegen bleibt die Einschweißtiefe konstant bzw. nimmt leicht ab (siehe auch Kapitel 5.1.2). Diese Abnahme kann, wie bereits gezeigt, durch die Verringerung des Divergenzwinkels aufgehoben werden. Dargestellt ist dies in Bild 5.27 anhand der ausgefüllten Symbole (siehe Einkreisung) für $d_f = 100$ µm.

Nur mit einem noch kleineren Strahlparameterprodukt und der damit verbundenen möglichen Verringerung des Divergenzwinkels des fokussierten Laserstrahls kann die oben beschriebene Gültigkeitsgrenze des Skalierungsgesetzes möglicherweise überschritten werden. Demnach existiert noch Potential einer guten Strahlqualität, das in Zukunft zur Erschließung weiterer Anwendungsgebiete beitragen wird.

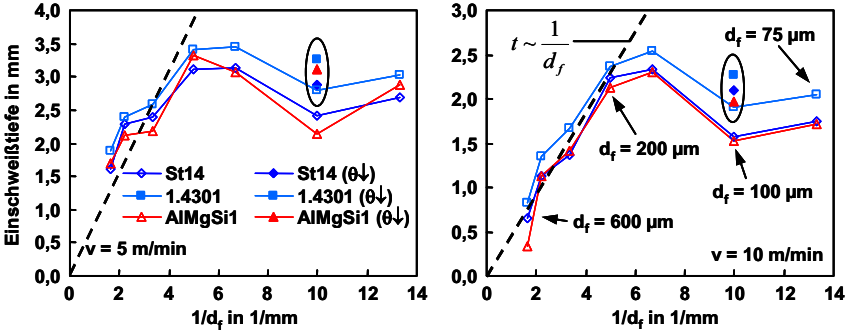

Bild 5.27: Potential guter Strahlqualität (P_L = 3 kW, kein Schutzgas) [66, 69, 70].

5.1.6 Variation der Fokuslage

Der Rayleighlänge z_{Rf} kommt bei der Lasermaterialbearbeitung eine große Bedeutung zu. Nach [4] ist für einen Schweißprozess eine große Rayleighlänge sehr wichtig, da sich innerhalb von z_{Rf} eine Bahnungenauigkeit der Bearbeitungsmaschine in Strahlrichtung nicht negativ auf den Schweißprozess auswirkt. Innerhalb der Rayleighlänge vergrößert sich der Fokusdurchmesser nach Gleichung (5.7) um den Faktor $\sqrt{2}$ und die Energiedichte im Fokus verringert sich damit nach Gleichung (2.19) um den Faktor 2. Wie aus Tabelle 5.3 ersichtlich, ist insbesondere bei den kleinen Fokusdurchmessern die Rayleighlänge sehr kurz. Dies bedeutet, dass bei diesen kleinen Fokusdurchmessern sehr hohe Anforderungen an die Bearbeitungsmaschinen gestellt werden. Vor diesem Hintergrund stellt sich hier die Frage, welchen Einfluss ein kleinerer Fokusdurchmesser auf das Bearbeitungsergebnis hat, wenn die Fokuslage z in Strahlrichtung variiert wird. Bei den Versuchen wurde die Fokuslage bis $z = \pm 3$ mm (entspricht der größten Rayleighlänge bei d_f = 600 µm) in Schritten von jeweils 0,25 mm variiert. Negative Fokuslage bedeutet, der Fokus liegt innerhalb des Werkstücks, bei einer positiven oberhalb.

In Bild 5.28 ist die normierte Einschweißtiefe als Funktion der normierten Fokuslage bis zur doppelten Rayleighlänge dargestellt. Im Falle von St14 ist bei negativer Fokuslage bis zur doppelten Rayleighlänge die Einschweißtiefe für die Fokusdurchmesser $d_f \leq 300$ µm nahezu konstant. Für die beiden größeren Fokusdurchmesser (d_f = 450 µm und d_f = 600 µm) fällt die Einschweißtiefe mit steigender negativer Fokuslage stärker ab und erreicht bei einfacher Rayleighlänge einen Wert von etwa 80%. Bei steigender positiver Fokuslage ist generell ein Absinken der Einschweißtiefe zu

beobachten. Die Aluminiumlegierung AlMgSi1 zeigt das gleiche Verhalten, das Erreichen der Schwelle beeinflusst jedoch den Kurvenverlauf. Im Folgenden wird der Einfluss der Fokuslage tiefergehend betrachtet.

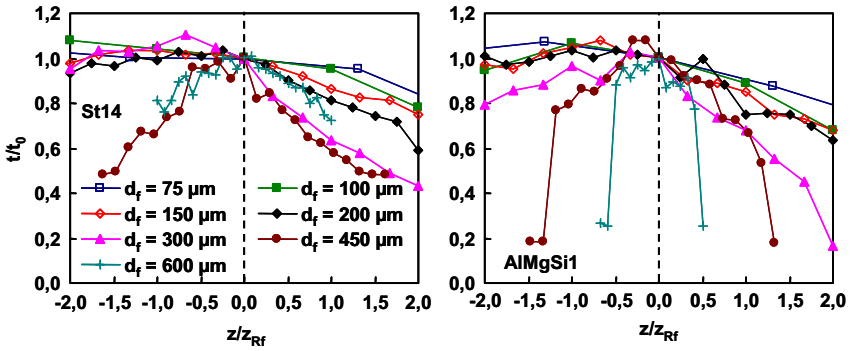

Bild 5.28: Normierte Einschweißtiefe als Funktion der auf die Rayleighlänge normierten Fokuslage für St14 und AlMgSi1 (P_L = 3 kW, v = 5 m/min, kein Schutzgas) [66].

Aus Bild 5.29 ist der Einfluss der Fokuslage auf die Einschweißtiefe bei St14 ersichtlich. Des Weiteren zeigt Bild 5.29 die prozentuale Tiefenänderung, wobei die Einschweißtiefe bei z = 0 mm (d.h. im Fokus) als 100% definiert ist. Für die Fokusdurchmesser 75 µm und 100 µm sowie 150 µm und 200 µm ist jeweils der Kurvenverlauf identisch (gleiche Fokussierung und nahezu identische Rayleighlänge).

Bei dem größten Fokusdurchmesser 600 µm (z_{Rf} = 3 mm) ergibt sich ein flacher Verlauf der Einschweißtiefe über die gesamte variierte Fokuslage, wobei die Einschweißtiefe bei z = z_{Rf} = ±3 mm um etwa 20% absinkt. Für alle anderen Fokusdurchmesser ist auffällig, dass eine Fokuslage oberhalb des Werkstücks zu einem starken Abfall der Einschweißtiefe führt. Dagegen kann eine negative Fokuslage ein Ansteigen der Einschweißtiefe um bis zu 10% bewirken, bevor diese dann ebenfalls absinkt. Bei der Betrachtung der prozentualen Tiefenänderung in Bild 5.29 wird deutlich, dass – unabhängig von der Rayleighlänge – zwischen z = 0 mm und z = -1 mm das Schweißergebnis nicht negativ beeinflusst wird, obwohl in den meisten Fällen die Rayleighlänge kleiner als 1 mm ist. In diesem Bereich wirkt sich eine Schwankung der Fokuslage aufgrund einer Bahnungenauigkeit der Bearbeitungsmaschine nicht negativ auf das Bearbeitungsergebnis aus. Falls mit einer Bahnungenauigkeit zu rechnen ist, sollte demzufolge in diesem Bereich gearbeitet werden.

Der Verlauf der prozentualen Tiefenänderung ist bei den Fokusdurchmessern mit gleichem Divergenzwinkel (d_f = 75 / 100 / 300 µm sowie d_f = 150 / 200 / 600 µm) sehr

ähnlich. Eine Ausnahme hiervon stellt der Fokusdurchmesser 600 µm bei positiven Fokuslagen dar. Aufgrund der in diesem Falle sehr großen Rayleighlänge von 3 mm sinkt die Einschweißtiefe weniger stark ab.

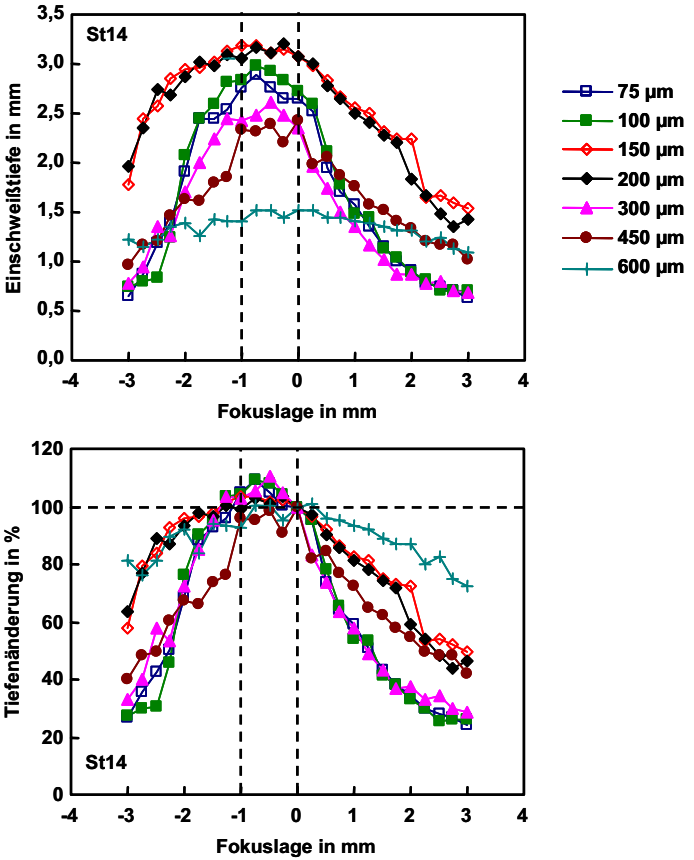

Bild 5.29: Variation der Fokuslage bei St14: Einschweißtiefe (links) und auf Fokuslage z = 0 mm (≡100%) bezogene Tiefenänderung (rechts). Bei einer negativen Fokuslage liegt der Fokus innerhalb des Werkstücks [66].

In Bild 5.30 ist für St14 der Vergleich von Schliffbildern bei verschiedenen Fokuslagen dargestellt. Bei den Fokusdurchmessern 600 µm und 200 µm (gleiches Abbildungsverhältnis und gleicher Divergenzwinkel) sind jeweils bei allen Fokuslagen nahezu identische Nahtformen zu erzielen. Der Fokusdurchmesser 150 µm verhält sich analog zu $d_f = 200$ µm (ohne Abb.). Dagegen sind bei allen anderen Fokusdurchmes-

sern (d_f = 75 µm identisch zu d_f = 100 µm, ohne Abb.) die Schweißnähte bei einer Fokuslage oberhalb der Werkstückoberfläche (z > 0 mm) breiter und weniger tief als bei Fokuslagen innerhalb des Werkstücks. Durch die Variation der Fokuslage ändert sich auch der Verlauf der Isophoten. Die Isophoten aus Bild 5.15 verlaufen punktsymmetrisch zu dem Ursprung, was in Bild 5.31 exemplarisch für die Fokusdurchmesser 600 mm (E/E_0 = 0,9) und 100 µm (E/E_0 = 0,3) dargestellt ist.

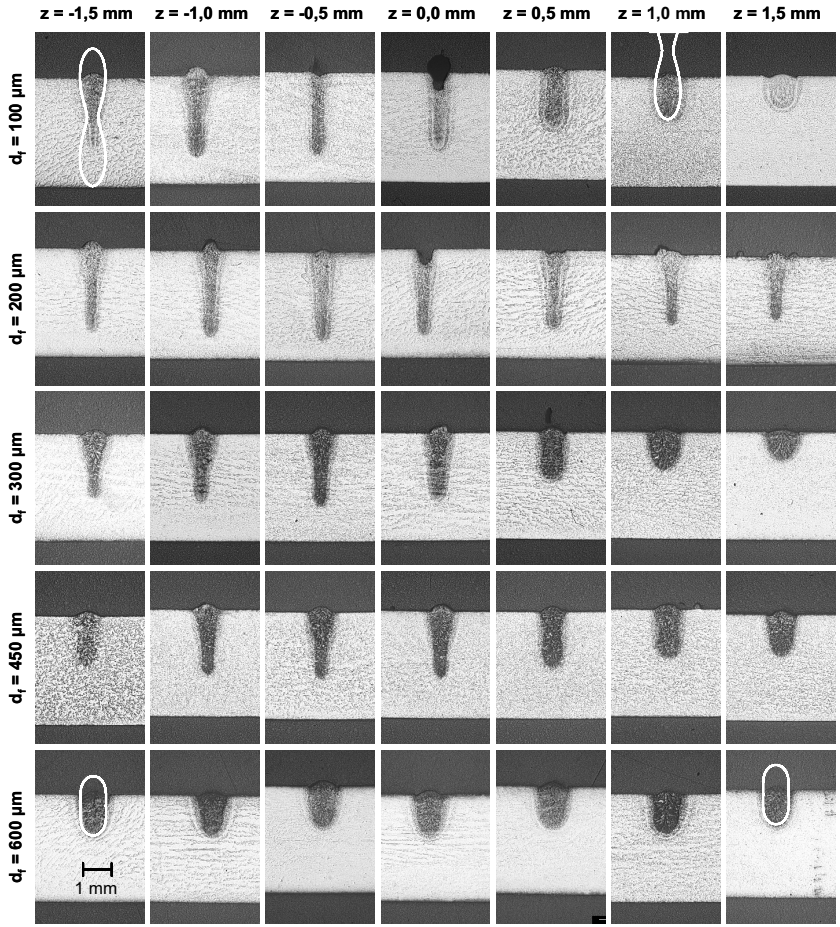

Bild 5.30: Nahtformen von St14 bei verschiedenen Fokusdurchmessern in Abhängigkeit der Fokuslage (P_L = 3 kW, v = 5 m/min, kein Schutzgas)

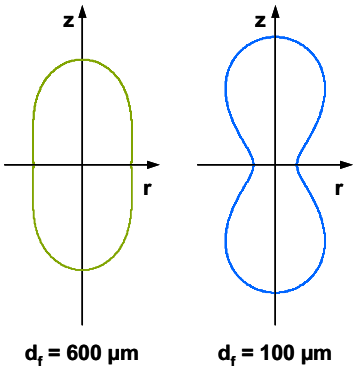

Bild 5.31: Verlauf der Isophoten für die Fokusdurchmesser 600 µm ($E/E_0 = 0,9$) und 100 µm ($E/E_0 = 0,3$) (nicht maßstäblich).

Eine Variation der Fokuslage bewirkt die Verschiebung der Isophoten entlang der Z-Achse, was dadurch die Veränderung von Nahtform und Einschweißtiefe bewirkt. Bei dem Fokusdurchmesser 600 µm ist die Leistungsdichte E_0 im Fokus am geringsten. Für die Verdampfungsisophote ist das Verhältnis E/E_0 nahe eins, dementsprechend ist keine Ausbauchung vorhanden. Wie aus Bild 5.30 ersichtlich ist, verändert sich die Nahtform bei der Variation der Fokuslage sowohl in positiver als auch in negativer Richtung nicht. Dagegen ergibt sich bei dem Fokusdurchmesser 100 µm nur bei der Fokuslage 0 mm bzw. -0,5 mm eine relativ schlanke Schweißnaht. Wird mit positiver Fokuslage gearbeitet, verschiebt sich die Ausbauchung der Isophoten in Richtung der Werkstückoberfläche (siehe skizzierte Isophote bei z = 1 mm in Bild 5.30), was zu einer Verbreiterung der Schweißnaht führt. Bei einer negativen Fokuslage (z = -1 mm) verschiebt sich die Ausbauchung, die bei z = 0 mm oberhalb der Werkstückoberfläche liegt, in das Werkstück, wodurch sich die Schweißnaht an der Oberseite verbreitert. Mit einer weiteren Vergrößerung der negativen Fokuslage (z = -1,5 mm) verschiebt sich die V-förmige Nahtverbreiterung weiter in das Werkstück hinein. Allerdings reicht die eingekoppelte Energie nicht mehr aus, um das Werkstück im Bereich der unteren Ausbauchung der Isophote aufzuschmelzen. Die anhand des Fokusdurchmessers 100 µm beschriebene Nahtveränderung ist gleichermaßen bei den Fokusdurchmessern 300 µm und 450 µm vorhanden (siehe Bild 5.30).

Die oben getroffenen Aussagen für Stahl gelten gleichermaßen auch für Aluminium. Der Kurvenverlauf für AlMgSi1 ist aus Bild 5.32 ersichtlich. Hierbei beeinflusst das Erreichen der Schwelle den Kurvenverlauf. Auffällig ist, dass bei fast allen Fokus-

durchmessern – ausgenommen $d_f = 150$ µm und $d_f = 200$ µm – die Schwelle bei der Fokuslage z = -2 mm bzw. z = 1,5 mm liegt.

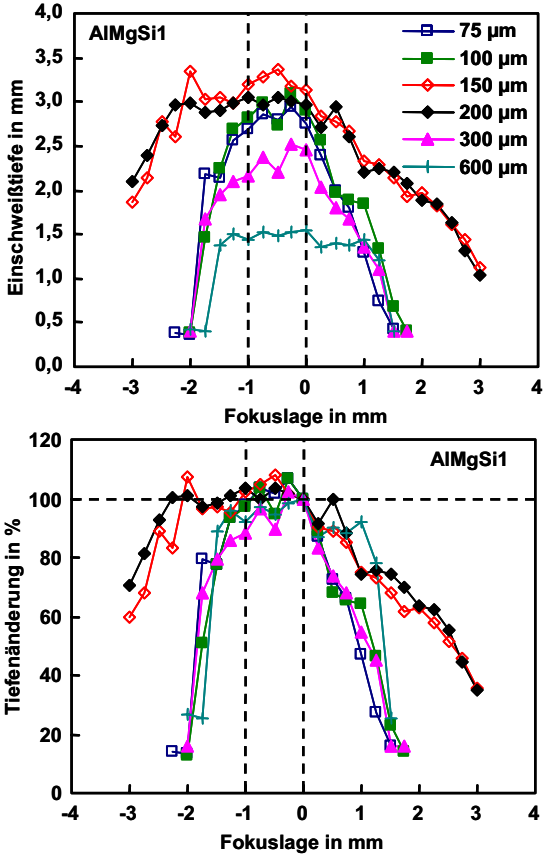

Bild 5.32: Variation der Fokuslage bei AlMgSi1: Einschweißtiefe (links) und auf Fokuslage z = 0 mm (≡100%) bezogene Tiefenänderung (rechts) [66].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass auch bei der Variation der Fokuslage dem Divergenzwinkel des fokussierten Laserstrahls eine große Bedeutung zukommt. Der Verlauf der Isophoten bestimmt maßgeblich die resultierende Nahtform und letztlich die Einschweißtiefe. Auch sehr kleine Fokusdurchmesser mit einer kurzen Rayleighlänge lassen sich sehr gut industriell einsetzen. Die Positioniergenauigkeit entlang der Schweißfuge ist bei den kleinen Fokusdurchmessern kritischer anzusehen als die Schwankung der Fokuslage um wenige zehntel Millimeter – sofern mit leicht negati-

ver Fokuslage gearbeitet wird. Eine weitere Verbesserung der Strahlqualität lässt eine positive Auswirkung hinsichtlich der Unempfindlichkeit des Schweißprozesses gegenüber einer Fokuslagenschwankung erwarten. Dies ist insbesondere für das robotergeführte Remoteschweißen von großer Bedeutung, das sich derzeit an der Schwelle der industriellen Einführung befindet [71].

5.1.7 Nahtqualität

Insbesondere beim Laserstrahlschweißen von Aluminium und dessen Legierungen können Nahtfehler, wie z.B. Prozessporen und Schmelzbadauswürfe, aufgrund einer gestörten Abströmung des Metalldampfes aus der Dampfkapillare entstehen [65], [72]. Die sogenannte Doppelfokustechnik schafft eine störungsunempfindliche Kapillargeometrie durch deren Aufweitung und verhindert so eine Blockade der Metalldampfabströmung bzw. das Kollabieren der Kapillare, wodurch die o.g. Fehler reduziert oder sogar ganz verhindert werden können. Die Doppelfokustechnik mit Festkörperlasern wird u.a. in [8], [65], [72], [73], [74]und [75] ausführlich diskutiert. Deshalb ist an dieser Stelle die Frage interessant, inwieweit die sehr kleinen Fokusdurchmesser die Qualität der Schweißnaht beeinflussen. Die Untersuchung der Nahtqualität unter Einfluss verschiedener Schutzgase wird im Rahmen einer weiterführenden Arbeit [66] durchgeführt, weshalb hier lediglich ein Ausblick gegeben wird.

Bild 5.33 zeigt für verschiedene Fokusdurchmesser je einen Querschliff mit dazugehörigem Foto der Nahtoberraupe sowie das Röntgenbild der Schweißnaht. Bei den Ergebnissen mit dem Fokusdurchmesser 450 µm sind auf der Nahtoberraupe zahlreiche Schmelzbadauswürfe sowie im Röntgenbild z.T. große Poren erkennbar. Im Vergleich dazu ist die Nahtoberraupe bei dem Fokusdurchmesser 150 µm regelmäßiger. Obwohl das Aspektverhältnis der Dampfkapillare und die Einschweißtiefe größer sind, ist kein erhöhtes Porenvorkommen feststellbar. Des Weiteren sind die Poren aufgrund der schlankeren Dampfkapillare kleiner. Gleiches gilt für den Fokusdurchmesser 75 µm. Ein Grund hierfür kann die im Vergleich zu dem Fokusdurchmesser 450 µm deutlich höhere Energiedichte sein. Die hohe Leistungsdichte führt zu sehr hohen Abdampfraten in der Kapillarwand, was wiederum einen höheren Druck in der Dampfkapillare und somit eine störungsunempfindlichere Kapillargeometrie bewirkt. Ein sehr kleiner Fokusdurchmesser führt also nicht zwangsläufig zu einer schlechten Nahtqualität. Der Einsatz des Scheibenlasers mit kleinen Fokusdurchmessern und gleichzeitig hoher Leistungsdichte ist auch bezüglich der erzielbaren Nahtqualität sehr vielversprechend. Weiterführende Untersuchungen der Nahtqualität sind in [66] und [70] enthalten.

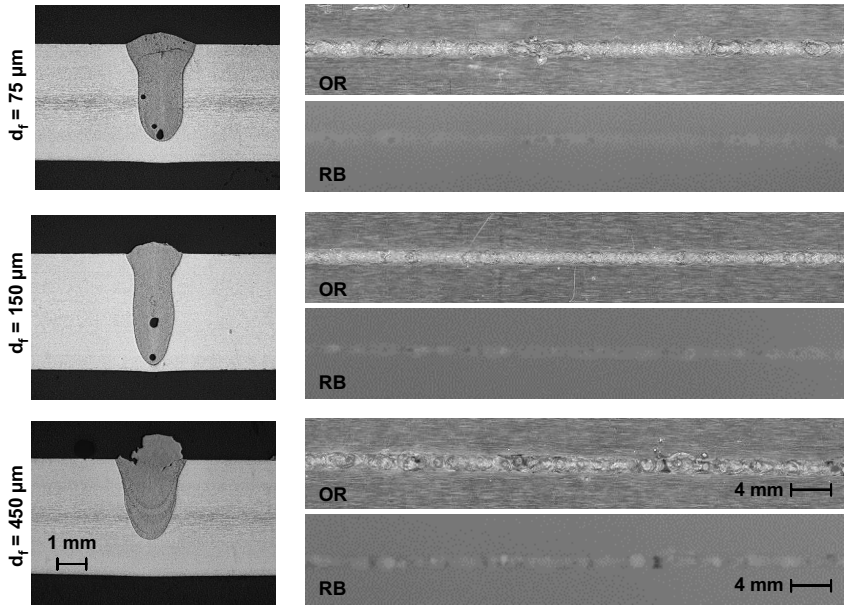

Bild 5.33: Nahtqualität von AlMgSi1 bei unterschiedlichen Fokusdurchmessern: Querschliffe (links) mit jeweils dazugehörigem Foto der Nahtoberraupe (OR) sowie Röntgenbild (RB) (P_L = 3 kW, v = 4 m/min, kein Schutzgas). Im Röntgenbild sind Poren schwarz, starke Nahtüberhöhungen bzw. Auswürfe weiß dargestellt [66, 70].

5.1.8 Synopsis

- Beim Schweißen mit dem Scheibenlaser ist auch bei dem sehr kleinen Fokusdurchmesser 75 µm und einer Leistungsdichte von der Größenordnung 10^8 W/cm^2 keine Plasmaabschirmung vorhanden.

- Die Verkleinerung des Fokusdurchmessers führt bei konstanter Laserleistung und konstantem Vorschub unabhängig von der Form des fokussierten Laserstrahls zu einer größeren Einschweißtiefe. Für Fokusdurchmesser ≤ 150 µm ist dies nur durch Verringerung des Divergenzwinkels möglich.

- Bei gleicher Einschweißtiefe kann mit kleinem Fokusdurchmesser die Vorschubgeschwindigkeit deutlich gesteigert werden. Deshalb ist eine gute Strahlqualität insbesondere für das Hochgeschwindigkeitsschweißen von Bedeutung.

- Der Prozesswirkungsgrad ist im Tiefschweißbereich unabhängig vom Fokusdurchmesser.

- Bei allen untersuchten Werkstoffen ist zwischen dem Tiefschweißbereich und dem Wärmeleitungsschweißen ein Übergangsbereich vorhanden. Dessen Beginn wird vom Strahlparameterquotienten P/d_f und den Materialeigenschaften bestimmt. Im Übergangsbereich führt ein kleines Aspektverhältnis zur Verringerung des Einkoppelgrades, weshalb der Prozesswirkungsgrad im Vergleich zum Tiefschweißen absinkt. Aufgrund der ausgebildeten Dampfkapillare ist der Übergangsbereich dem Tiefschweißen zuzurechnen.

- Bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten ist auch bei Aluminium kein ausgeprägter Sprung der Einschweißtiefe an der Schwelle und somit keine ausgeprägte Schwelle vorhanden.

- Die Form der Schweißnaht ist sowohl vom Fokusdurchmesser als auch dem Divergenzwinkel des fokussierten Laserstrahls abhängig.

- Die Ausbildung der Nahtform wird im Wesentlichen von dem Divergenzwinkel des fokussierten Laserstrahls bestimmt, da dieser den Verlauf der Isophoten maßgeblich beeinflusst. Unterschiedliche Materialeigenschaften können dabei zu veränderten Nahtformen führen.

- Bei kleinen Fokusdurchmessern kann durch die Verringerung des Divergenzwinkels die Einschweißtiefe gesteigert werden.

- Mit kleiner werdendem Fokusdurchmesser gewinnt die Fokussierbarkeit immer mehr an Bedeutung.

- Eine Fokuslagenvariation im Bereich zwischen $z = 0$ mm bzw. $z = -1$ mm führt zu einer geringfügig gesteigerten oder gleichbleibenden Einschweißtiefe, unabhängig von der Größe der Rayleighlänge.

- Bei der Variation der Fokuslage ist der Divergenzwinkel die bestimmende Größe. Ein kleiner Divergenzwinkel wirkt sich positiv auf die Unempfindlichkeit des Schweißprozesses gegenüber Fokuslagenschwankungen aus. Die Verbesserung des Strahlparameterprodukts wirkt sich hierbei weiter positiv aus.

- Mit der guten Fokussierbarkeit des Scheibenlasers lassen sich mit sehr kleinen Fokusdurchmessern und den daraus resultierenden schlanken Dampfkapillare mit gro-

ßem Aspektverhältnis Schweißnähte von guter Qualität erzielen. Dies ist vermutlich auf eine Stabilisierung aufgrund höherer Abdampfraten zurückzuführen.

5.2 Folienschweißen

Die gute Fokussierbarkeit des Scheibenlasers hat bereits nach kurzer Zeit neue Anwendungsgebiete für das Laserstrahlschweißen erschlossen. Ein Beispiel hierfür ist das Schweißen von Wärmetauschern für Brennstoffzellen (siehe Bild 5.34). Hierbei handelt es sich um eine Überlappverbindung zweier 150 µm dicken Edelstahlfolien. Die ebenfalls in Bild 5.34 dargestellten Querschliffe machen deutlich, dass bei ungenügendem Spannen Spalte bis hin zu der 0,7-fachen Foliendicke entstehen können. Die trotzdem sichere Anbindung verdeutlicht, dass es sich dabei um einen Tiefschweißprozess mit ausgebildeter Dampfkapillare handelt.

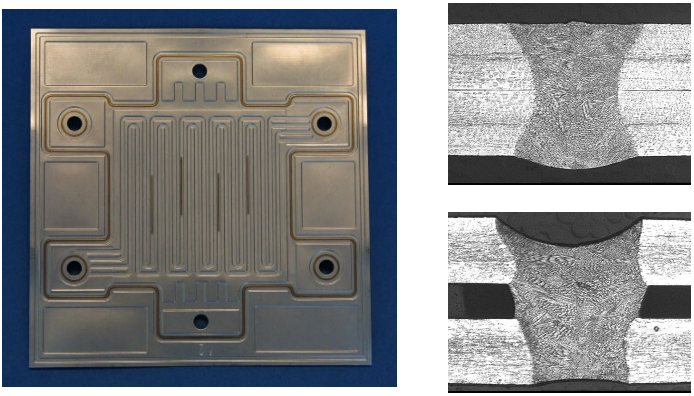

Bild 5.34: Mit dem Scheibenlaser geschweißter Wärmetauscher mit zwei aus einem Bauteil entnommenen Querschliffen (Quelle: IFSW / EADS Dornier). Überlappverbindung zweier 150 µm dicken Edelstahlfolien (d_f = 200 µm, P_L = 220 W, v = 3 m/min).

Die Vorschubgeschwindigkeit ist beim Schweißen der Wärmetauscher aufgrund kleiner Bahnradien und geringer Dynamik herkömmlicher Bearbeitungsmaschinen auf v < 4 m/min beschränkt. Im Hinblick auf eine wirtschaftliche industrielle Massenfertigung mit hochdynamischer Strahlführung stellt sich nun die Frage, ob eine Steigerung der Laserleistung sowie eine bessere Fokussierbarkeit in eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit umgesetzt werden kann und welche limitierenden Einflussfaktoren bestehen.

5.2.1 Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit

Die Prozessentwicklung wird für einen Überlappstoß durchgeführt. Um aber Störeinflüsse, wie z.B. durch das Spannen verursachte unterschiedliche Spalte, auszuschließen, werden die Versuche in einem ersten Schritt als Blindschweißung in 300 µm dicken Edelstahlfolien ausgeführt. Im Anschluss an diese Untersuchung erfolgt die Übertragung der Ergebnisse auf einen realen Überlappstoß. Es wird mit Laserleistungen von 250 W, 500 W und 750 W gearbeitet. Des Weiteren wird der Einfluss der Fokussierbarkeit unter der Verwendung der Fokusdurchmesser 100 µm, 200 µm (jeweils Scheibenlaser) und 300 µm (lampengepumpter Stablaser) untersucht.

Anhand einer vollständigen Durchschweißung kann in der Produktion eine ausreichende Anbindung sichergestellt werden. Die Geschwindigkeit, bei der gerade noch durchgeschweißt wird, bestimmt somit die maximale Vorschubgeschwindigkeit bei dieser Untersuchung. Das Auftreten von Löchern bzw. die Perforation der Naht aufgrund eines zu hohen Energieeintrags bestimmt den minimalen Vorschub. Für die Beurteilung der Schweißnähte wird die Nahtbreite in der Folienmitte herangezogen, welche für eine ausreichende Festigkeit einer Überlappschweißung entscheidend ist.

Laserleistung 250 W

Bild 5.35 zeigt die Nahtbreite in der Folienmitte als Funktion der Vorschubgeschwindigkeit für die Laserleistung 250 W. Die Kurven der drei verschiedenen Fokusdurchmesser verlaufen nah beieinander. Mit dem Fokusdurchmesser 100 µm kann eine wie oben definierte maximale Vorschubgeschwindigkeit von 15 m/min erreicht werden, die im Vergleich zu den beiden anderen Fokusdurchmessern etwa um den Faktor drei höher ist.

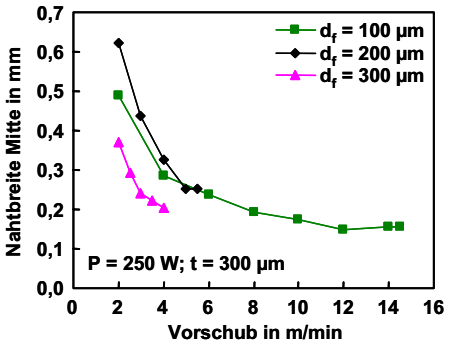

Bild 5.35: Nahtbreite in der Folienmitte als Funktion des Vorschubs für die Leistung 250 W.

In Bild 5.36 ist der Vergleich der Schliffbilder bei jeweils minimalem Vorschub dargestellt. Bei den beiden kleineren Fokusdurchmessern (200 µm und 100 µm) haben die Schweißnähte parallele Flanken, was auf eine beim Tiefschweißen vorhandene, hier auch nach unten geöffnete Dampfkapillare hindeutet. Der um 100 µm größere Fokusdurchmesser führt zu einer um 100 µm größeren Nahtbreite. Die Energie fließt aufgrund der nach unten geöffneten Dampfkapillare weitgehend radial in das Werkstück ab, was zu einer parallelen Ausbildung der Nahtflanken führt.

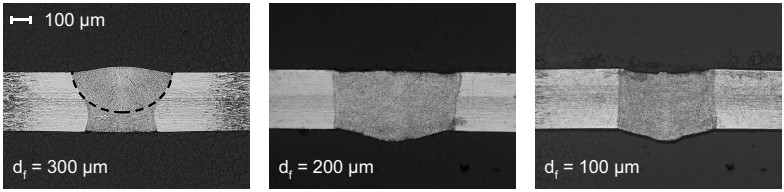

Bild 5.36: Vergleich der Schliffbilder bei jeweils minimalem Vorschub (P_L = 250 W, v = 2 m/min, t = 300 µm). Die gestrichelte Linie bei d_f = 300 µm skizziert den linsenförmigen Nahtquerschnitt beim Wärmeleitungsschweißen.

Bei dem Fokusdurchmesser 300 µm ist Wärmeleitungsschweißen anzunehmen (der Strahlparameterquotient ist $P_L/d_f < 1$ kW/mm, siehe Kapitel 4.3). Infolge von Wärmestau und/oder des Marangonieffektes kann durchgeschweißt werden, es ergibt sich ein von der Linsenform (gestrichelte Linie in Bild 5.36) abweichender Nahtquerschnitt. Diese Nahtform erklärt die kleinste Nahtbreite beim größten Fokusdurchmesser.

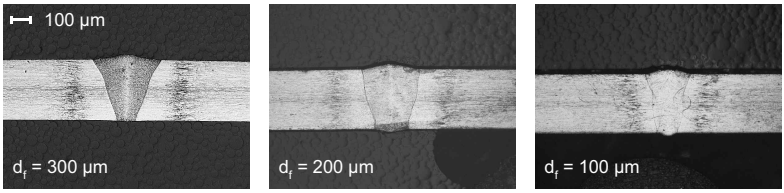

Bild 5.37: Vergleich der Schliffbilder bei jeweils maximalem Vorschub (P_L = 250 W, t = 300 µm, Vorschub: links 4 m/min, Mitte 5,5 m/min, rechts 14,5 m/min).

Für den jeweils maximalen Vorschub ist der Vergleich der Schliffbilder in Bild 5.37 dargestellt. Bei dem Fokusdurchmesser 100 µm ist selbst bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 14,5 m/min eine schlanke Schweißnaht zu erzielen, was auf eine vorhandene Dampfkapillare hindeutet. Mit dem Fokusdurchmesser 300 µm kann bei dem Vorschub 4 m/min infolge von Wärmestau und/oder des Marangonieffektes gerade noch durchgeschweißt werden, weshalb hier weiterhin Wärmeleitungsschweißen angenommen wird. Die Nahtform ist ähnlich der bei minimalem Vorschub ohne Nahtverbreiterung auf der Unterseite, was wiederum zu der geringsten Nahtbreite beim

größten Fokusdurchmesser führt. Die Vorteile eines kleinen Fokusdurchmessers sind offensichtlich.

Laserleistung 500 W

Den Kurvenverlauf für die Laserleistung 500 W zeigt Bild 5.38. Mit dem Fokusdurchmesser 200 µm kann eine maximale Vorschubgeschwindigkeit von 15 m/min erreicht werden, mit dem Fokusdurchmesser 100 µm bis 35 m/min.

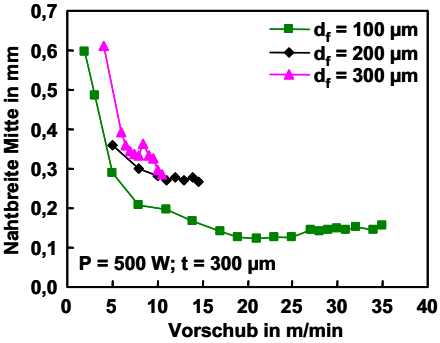

Bild 5.38: Nahtbreite in der Folienmitte als Funktion des Vorschubs für die Leistung 500 W.

In Bild 5.39 ist der Vergleich der Schliffbilder bei jeweils maximalem Vorschub dargestellt. Der Nahtquerschnitt für den Fokusdurchmesser 300 µm erinnert an eine Linsenform, wobei die Durchschweißung aufgrund eines Wärmestaus an der Blechunterseite erfolgt. Ein hierzu sehr ähnlicher Nahtquerschnitt ergibt sich für den Fokusdurchmesser 200 µm, weshalb in beiden Fällen Wärmeleitungsschweißen vermutet wird. Die Schweißnaht für den Fokusdurchmesser 100 µm ist bei der Vorschubgeschwindigkeit 35 m/min deutlich schlanker. Dabei handelt es sich um die Prozessform des Tiefschweißens.

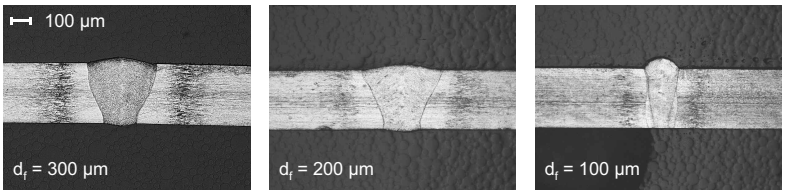

Bild 5.39: Vergleich der Schliffbilder bei jeweils maximalem Vorschub (P_L =500 W, t = 300 µm, Vorschub: links 10,5 m/min, Mitte 14,5 m/min, rechts 35 m/min).

Auf die mit einem Fokusdurchmesser von 100 µm erzielbaren Nahtformen wird nachfolgend näher eingegangen. So zeigt Bild 5.40 den Vergleich der Nahtbreite in der Mitte mit der Nahtbreite an der Oberseite. Mit dieser Darstellungsform kann eine Veränderung der Nahtform genauer untersucht werden, um Instabilitäten o.ä. nachzuweisen.

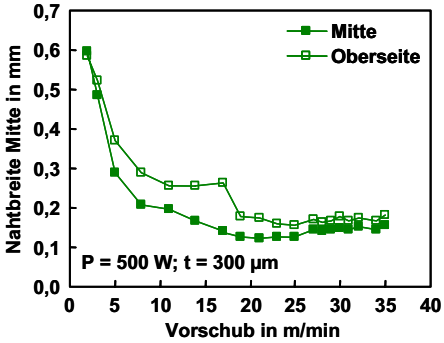

Bild 5.40: Nahtbreite in der Mitte und an der Oberseite im Vergleich für die Leistung 500 W (Scheibenlaser, d_f = 100 µm).

Die Nahtbreite ist an der Oberseite stets größer als in der Mitte. Infolge des zunehmenden Vorschubs sinkt die Nahtbreite ab (vgl. Kapitel 5.1.2). Eine Steigerung des Vorschubs von 25 m/min auf 27 m/min bewirkt einen leichten Anstieg der Nahtbreite sowohl an der Oberseite als auch in der Folienmitte. Damit verbunden ist ein geringfügiger Nahteinfall auf der Unterseite sowie eine vergrößerte Nahtüberhöhung auf der Oberseite, siehe Bild 5.41. Mit weiter steigendem Vorschub bleibt die Nahtbreite (Oberseite und Folienmitte) nahezu gleich groß, die veränderte Nahtform tritt bis zu dem Vorschub 35m/min gleichermaßen auf. Der Nahteinfall auf der Unterseite ist stets kleiner als 5% der Blechdicke. Die Nahtoberraupe ist in allen Fällen glatt und regelmäßig. Die Schweißnahtqualität kann somit bis zu dem Vorschub 25 m/min als sehr gut, bis 35 m/min als gut betrachtet werden. Dies bedeutet, dass mit dem Fokusdurchmesser 100 µm im Vergleich zu 300 µm die Vorschubgeschwindigkeit um 360% gesteigert werden kann.

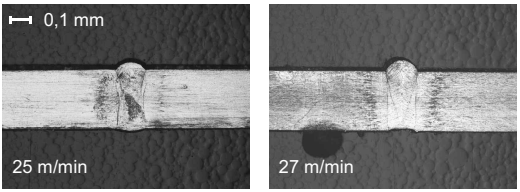

Bild 5.41: Vergleich der Schliffbilder bei den Vorschüben 25 m/min und 27m/min (P_L =500 W, t = 300 µm, d_f = 100 µm).

Laserleistung 750 W

Die Nahtbreite in der Folienmitte als Funktion der Vorschubgeschwindigkeit ist für die Laserleistung 750 W in Bild 5.42 dargestellt. Die Verwendung des Fokusdurchmessers 300 µm ermöglicht eine Durchschweißung von 10 m/min bis 13 m/min; mit einem Fokusdurchmesser 200 µm ist dies im Bereich von 12 m/min bis 21 m/min möglich. Eine weitere Reduzierung des Fokusdurchmessers auf 100 µm ermöglicht ein Prozessfenster von 2 m/min bis 56 m/min, in dem eine Durchschweißung ohne das Auftreten von Löchern erzielt werden kann. Die gute Schweißbarkeit selbst bei kleinen Vorschubgeschwindigkeiten kann damit erklärt werden, dass durch eine nach unten geöffnete Dampfkapillare Leistung „verloren“ geht. Daher wird trotz der hohen Laserleistung nicht zu viel Energie in das Bauteil eingekoppelt. Es entstehen keine Löcher infolge eines zu hohen Energieeintrags. Das große Prozessfenster sowie die schlanken Nähte (siehe dazu auch Bild 5.44) deuten auf eine Dampfkapillare hin. Ein weiteres Indiz für eine vorhandene Dampfkapillare ist der nur geringfügig abfallende Kurvenverlauf oberhalb von v = 20 m/min.

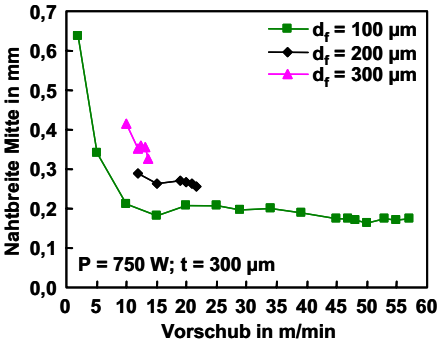

Bild 5.42: Nahtbreite in der Folienmitte als Funktion des Vorschubs für die Leistung 750 W.

Anhand des Vergleichs der Nahtbreiten in der Mitte und an der Oberseite in Bild 5.43 kann für den Fokusdurchmesser 100 µm eine Veränderung der Nahtform identifiziert werden. Der Kurvenverlauf lässt drei Bereiche deutlich werden, welche auch im weiteren Verlauf dieses Kapitels zur Klassifizierung verwendet werden. Im Bereich A ist die Nahtbreite an der Oberseite stets größer als in der Mitte und es sind bis zu der Vorschubgeschwindigkeit 15 m/min keine Nahtfehler vorhanden. Die Schweißnähte in diesem Bereich sind von sehr guter Qualität.

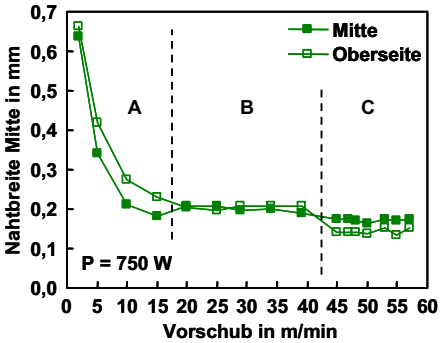

Bild 5.43: Nahtbreite in der Mitte und an der Oberseite im Vergleich für die Leistung 750 W (Scheibenlaser, $d_f = 100$ µm). Die Bereiche A, B und C kennzeichnen unterschiedliche Nahtformen.

Im Bereich B ist die Nahtbreite an der Oberseite und in der Mitte gleich groß. Eine Betrachtung der Querschliffe (siehe Bild 5.44) offenbart hier eine „Ausbeulung" in der Nahtmitte. Des Weiteren ist ein geringfügiger Nahteinfall auf der Unterseite sowie eine im Vergleich zum Bereich A etwas größere Nahtüberhöhung vorhanden, was bereits bei der Leistung 500 W für Vorschübe oberhalb von 25 m/min (vgl. Bild 5.41) zu beobachten war. Dies tritt bei allen Vorschubgeschwindigkeiten dieses Bereiches gleichermaßen auf. Die Nahtoberraupe ist, wie aus Bild 5.45 ersichtlich, stets glatt und regelmäßig, weshalb die Nahtqualität im Bereich B immer noch als gut eingestuft wird.

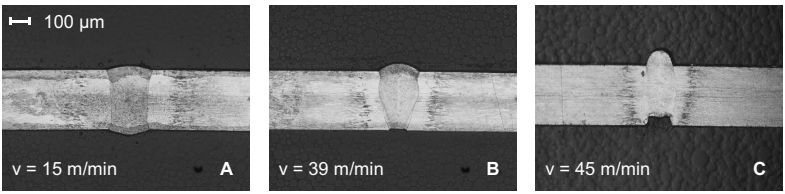

Bild 5.44: Querschliffe für die Vorschübe 15 m/min (Bereich A), 20 m/min (Bereich B) und 45 m/min (Bereich C) (Scheibenlaser, P_L =750 W, t = 300 µm, $d_f = 100$ µm).

Im Bereich C (v > 40 m/min) ist die Nahtbreite im Vergleich zu den beiden anderen Bereichen etwas geringer und in der Mitte stets größer als an der Oberseite (siehe Bild 5.44). Aus dem Querschliff ist des Weiteren ersichtlich, dass die Kerbe auf der Unterseite und die Nahtüberhöhung der Oberraupe im Vergleich zum Bereich B deutlich größer sind, was zu einer Herabsetzung der Nahtqualität führt. Im Bereich C ist die Grundstruktur der Nahtoberraupe in allen Fällen glatt und regelmäßig. Hierzu ist das Humping in unregelmäßigen Intervallen überlagert, siehe Bild 5.45. In Kapitel 5.2.4 wird auf das Humping näher eingegangen. Auffällig ist, dass das Humping nur dann auftritt, wenn die Nahtbreite in der Mitte größer ist als an der Oberseite.

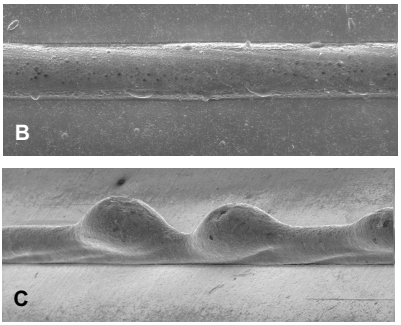

Bild 5.45: REM-Aufnahmen zweier Nahtoberraupen aus den Bereichen B und C (Scheibenlaser, t = 300 µm, d_f = 100 µm).

5.2.2 Reduzierung der Foliendicke

Die eingangs des Kapitels gezeigten Wärmetauscher werden in Brennstoffzellen hintereinandergeschaltet eingesetzt. Mit dieser Stapelung ist ein großer Bauraum sowie ein hohes Gewicht verbunden. Eine Reduzierung der Foliendicke wirkt sich direkt auf den Bauraum bzw. das Gewicht aus. So lässt sich z.B. mit einer Reduzierung der Foliendicke von 300 µm auf 200 µm sowohl das Gewicht als auch die Stapelhöhe um 33% reduzieren. In diesem Kapitel wird untersucht, wie sich die Reduzierung der Foliendicke auswirkt, wenn die bisher verwendeten Parameter (Fokusdurchmesser und Laserleistung) beibehalten werden.

Foliendicke 200 µm

Bei gleicher Leistung sind mit den drei verschiedenen Fokusdurchmessern Ergebnisse analog zu der Foliendicke 300 µm zu erzielen (siehe Kapitel 5.2.1), jedoch ist mit den Fokusdurchmessern 300 µm und 200 µm das erzielbare Prozessfenster noch einge-

schränkter. Nachfolgend wird daher nur der Fokusdurchmesser 100 µm näher betrachtet.

Bild 5.46 bestätigt die bisherigen Ergebnisse. Mit dem Fokusdurchmesser 100 µm lässt sich eine Leistungssteigerung in einen höheren Vorschub umsetzen. Die hier vorhandene Dampfkapillare ermöglicht bei allen eingesetzten Werten der Laserleistung das Schweißen von sehr kleinem bis hin zu großem Vorschub. Mit der Laserleistung 250 W ist über den gesamten Vorschubbereich eine sehr gute Nahtqualität zu erzielen. Die höheren Leistungen 500 W bzw. 750 W werden nachfolgend getrennt betrachtet.

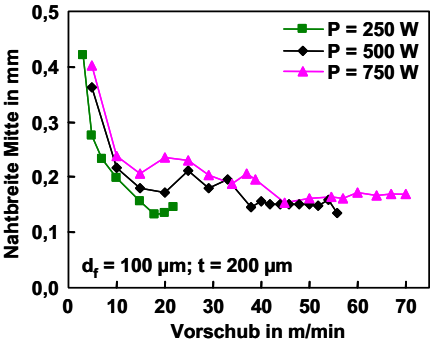

Bild 5.46: Nahtbreite in der Folienmitte als Funktion des Vorschubs für drei verschiedene Leistungen (Scheibenlaser, d_f = 100 µm).

Bild 5.47 zeigt für die Leistung 500 W den Vergleich der Nahtbreite an der Oberseite mit der in der Mitte. Das Diagramm lässt sich in zwei Bereiche einteilen. Bis zu einem Vorschub von 33 m/min (Bereich B) sind beide Nahtbreitenbedingt durch eine Ausbeulung der Schweißnaht in der Mitte der Folie von gleicher Größe (siehe Bild 5.48). Ähnliches war bereits bei der Foliendicke 300 µm und der Leistung 750 W zu beobachten (siehe Bild 5.43 Bereich B).

Der Übergang von Bereich B in C ist durch das Absinken der Nahtbreite (Oberseite und Nahtmitte) gekennzeichnet. Damit verbunden ist das Auftreten von Nahteinfall auf der Unterseite bei dem Vorschub 38 m/min, siehe Bild 5.48. Im Bereich C ist die Nahtbreite an der Oberseite stets größer als in der Mitte. Mit steigendem Vorschub steigt die Nahtbreite an der Oberseite im Vergleich zur Mitte an. Damit verbunden ist die Verkleinerung der Ausbeulung sowie die Reduzierung des Nahteinfalls auf der Unterseite. Der Humping-Effekt ist in diesem Bereich nicht zu beobachten. Das Absinken beider Nahtbreiten beim Übergang vom Bereich B zu C war bereits bei der Foliendicke 300 µm und der Leistung 750 W zu beobachten (siehe Bild 5.43). Allerdings

ist bei der Foliendicke 200 µm im Gegensatz zu 300 µm die Nahtbreite an der Oberseite stets größer als in der Folienmitte.

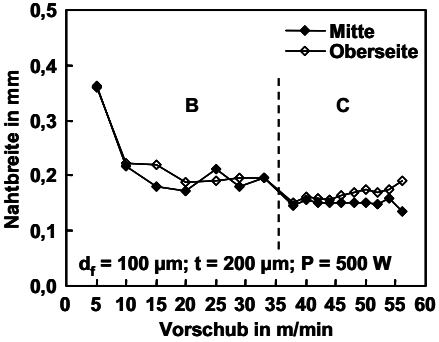

Bild 5.47: Nahtbreite in der Mitte und an der Oberseite im Vergleich für die Leistung 500 W (Scheibenlaser, P_L = 500 W d_f = 100 µm).

Das Diagramm für die Leistung 750 W in Bild 5.49 lässt sich ebenfalls in die Bereiche B und C einteilen. Eine Ausbeulung in der Mitte der Folie hat im Bereich B wiederum vergleichbare Nahtbreiten zur Folge (siehe auch Bild 5.50). Mit steigendem Vorschub verstärkt sich die Nahtüberhöhung an der Oberseite sowie der Nahteinfall auf der Unterseite.

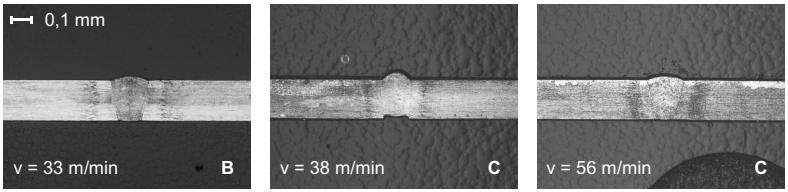

Bild 5.48: Querschliffe für die Vorschübe 33 m/min (Bereich B) sowie 38 m/min und 56 m/min (jeweils Bereich C) (Scheibenlaser, P_L = 500 W, d_f = 100 µm, t = 200 µm).

Der Übergang in den Bereich C ist wiederum mit einem Absinken beider Nahtbreiten verbunden. Im Gegensatz zu der Leistung 500 W (siehe Bild 5.47, Bereich C), ist die Nahtbreite in der Mitte größer als an der Oberseite, verbunden mit stärker ausgeprägter Nahtüberhöhung an der Oberseite sowie Nahteinfall auf der Unterseite. Über den gesamten Bereich C tritt der Humping-Effekt auf.

Der Übergang vom Bereich B zu C ist sowohl bei der Foliendicke 300 µm (Bild 5.43) als auch bei der Foliendicke 200 µm (Bild 5.47 und Bild 5.49) mit einem Absinken

beider Nahtbreiten verbunden. Humping tritt offensichtlich nur dann in Erscheinung, wenn die Nahtbreite in der Folienmitte größer ist als an der Oberseite. Hierbei scheint die Änderung der Nahtform und die damit verbundene Änderung der Schmelzbadströmung ausschlaggebend zu sein. In Kapitel 5.2.4 wird auf das Humping eingegangen.

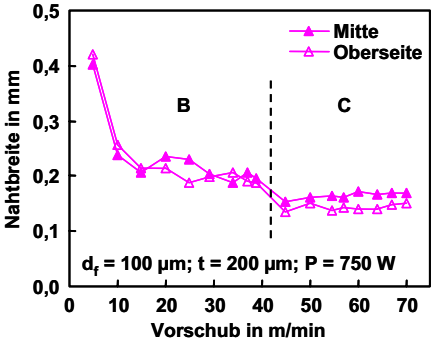

Bild 5.49: Vergleich von Nahtbreite in der Mitte und an der Oberseite für die Leistung 750 W (Scheibenlaser, P_L = 750 W d_f = 100 µm).

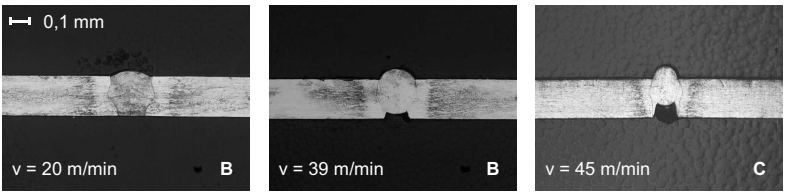

Bild 5.50: Querschliffe für die Vorschübe 33 m/min und 39 m/min (jeweils Bereich B) sowie 45 m/min (Bereich C) (Scheibenlaser, P_L = 750 W d_f = 100 µm, t = 200 µm).

5.2.3 Übertragung auf eine Überlappverbindung

In Kapitel 5.2.1 und Kapitel 5.2.2 konnte gezeigt werden, dass sich mit der besseren Fokussierbarkeit des Scheibenlasers die Vorschubgeschwindigkeit beim Folienschweißen erheblich steigern lässt. Während diese Untersuchungen anhand von Blindschweißungen durchgeführt wurden, soll in diesem Kapitel dargelegt werden, ob und wie sich die gewonnenen Erkenntnisse auf einen Überlappstoß und somit auf das Schweißen von Wärmetauschern übertragen lassen.

Foliendicke 300 µm bzw. 2 x 150 µm

Bild 5.51 zeigt den Vergleich von Blind- und Überlappschweißung bei vergleichbarer Vorschubgeschwindigkeit. Für alle drei verwendeten Leistungen ergeben sich sehr ähnliche Schweißnahtformen. Die bei Blindschweißungen eventuell vorhandene Ausbeulung in der Folienmitte, die Nahtüberhöhung auf der Oberseite bzw. der Nahteinfall auf der Unterseite sind bei der jeweils vergleichbaren Überlappschweißung ebenfalls ausgeprägt. Dies bedeutet, dass die anhand von Blindschweißungen gewonnenen Erkenntnisse sich direkt auf einen realen Überlappstoß und somit auf das Schweißen der Wärmetauscher übertragen lassen.

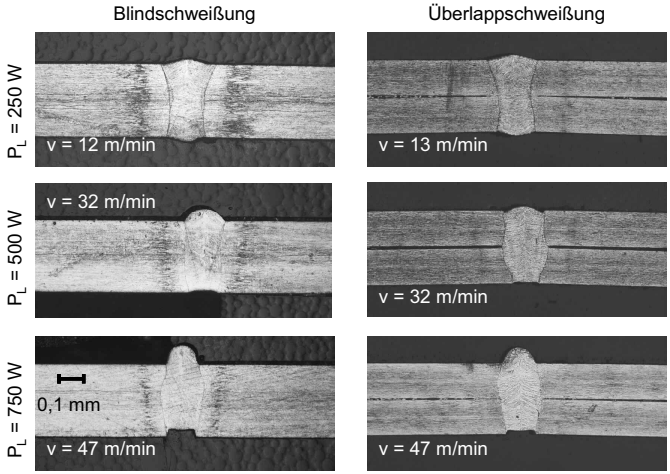

Bild 5.51: Vergleich von Blindschweißung (t = 300 µm) und Überlappschweißung (t = 150 + 150 µm) bei verschiedenen Leistungen (Scheibenlaser, d_f = 100 µm).

Foliendicke 200 µm bzw. 2 x 100 µm

Wie Bild 5.52 zeigt, lassen sich auch bei der Foliendicke 200 µm die Ergebnisse der Blindschweißungen auf Überlappschweißungen übertragen. Bei der Überlappschweißung ist zwischen den beiden Folien ein Fügespalt von etwa 25 µm vorhanden. Die trotzdem sichere Anbindung zeigt, dass es sich auch bei einem Vorschub von 52 m/min noch um einen Tiefschweißprozess mit ausgebildeter Dampfkapillare handelt.

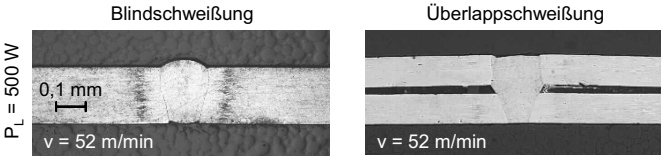

Bild 5.52: Vergleich von Blindschweißung (t = 200 µm) und Überlappschweißung (t = 100 + 100 µm) bei der Laserleistung 500 W und dem Vorschub 52 m/min (Scheibenlaser, d_f = 100 µm).

Durch ungenügendes Spannen können zwischen den Folien Spalte entstehen, deren Spalthöhe ein Vielfaches der Foliendicke betragen kann. Das Negativbeispiel in Bild 5.53 mit einem Fügespalt von 500 µm zeigt sehr eindrucksvoll, dass es sich selbst beim Schweißen dieser sehr dünnen Folien bei der extremen Vorschubgeschwindigkeit von 56 m/min tatsächlich um einen Tiefschweißprozess mit ausgebildeter Dampfkapillare handelt. In der oberen Folie entsteht eine im Vergleich zu der Foliendicke sehr breite Naht. Das Austropfen der Schmelze kann von der Oberflächenspannung gerade noch verhindert werden. Die in der oberen Folie ausgebildete Dampfkapillare ist nach unten geöffnet. Der auf die untere Folie treffende Laserstrahl schafft zwar nicht die Ausbildung einer Dampfkapillare, es entsteht aber eine für das Wärmeleitungsschweißen typische linsenförmige Schweißnaht (siehe Einkreisung in Bild 5.53).

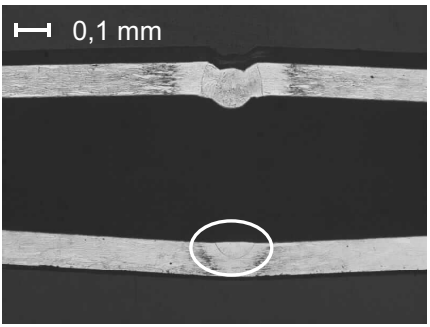

Bild 5.53: Überlappschweißung zweier 100 µm dicken Edelstahlfolien ohne Anbindung aufgrund eines Fügespalts von 500 µm (Scheibenlaser, d_f = 100 mm, P = 500 W, v = 56 m/min).

5.2.4 Anhebung der Schmelze und Humping

Obwohl bereits 1968 vom Humping-Effekt beim Lichtbogenschweißen berichtet wurde [76], ist dessen Entstehungsprinzip auch heute nicht vollständig verstanden. Vom

Humping-Effekt ist neben dem Lichtbogenschweißen [76], [77] auch beim Elektronen- [78], [79] und Laserstrahlschweißen [15], [80], [81], [82], [83], [84], [85], [86] berichtet worden, sodass zumindest als gesichert gelten darf, dass es sich hierbei um einen hydrodynamischen Effekt im Schmelzbad handelt. Da eine tiefergehende Untersuchung des Entstehungsmechanismus den Rahmen dieser Arbeit gesprengt hätte, sollen an dieser Stelle lediglich wichtige Aussagen aus Literaturstellen aufgeführt und daraus sowie aus den Ergebnissen des Folienschweißens eine Modellvorstellung abgeleitet werden. Folgende Aussagen sind in der Literatur zu finden:

- Der Humping-Effekt tritt meist als periodische Nahtunregelmäßigkeit in Erscheinung [15], [80], [81]. Beim Folienschweißen ist dies nicht der Fall (siehe Kapitel 5.2.1).

- Mit steigender Einschweißtiefe sinkt die Grenzgeschwindigkeit, bei der Humping auftritt. Bei dünnen Blechen tritt der Effekt erst bei hohem Vorschub auf [81].

- Humping kann auch bei langsamen Vorschüben und großen Einschweißtiefen auftreten [80].

- Der Humping-Effekt kann sowohl bei Einschweißungen als auch bei Durchschweißungen auftreten [81].

- Mit kleiner werdendem Fokusdurchmesser sinkt die Grenzgeschwindigkeit, bei der Humping beginnt [82]. Dagegen wurde in [83] beim Schweißen von dünnen Metallfolien mit einem sehr kleinen Fokusdurchmesser von 10 µm auch bei Vorschubgeschwindigkeiten von 55 m/min noch kein Humping beobachtet.

- Humping entsteht am Schmelzbadende durch das „Abbremsen“ eines „Schmelze-Jets“ hinter der Dampfkapillare [84].

- Die beherrschende Größe ist das Längen-Breiten-Verhältnis des Schmelzbades, welches unterhalb einer bestimmten Größe sein sollte, um Humping zu vermeiden [15]. Daraus folgt, dass die Breite des Schmelzbades groß sein sollte.

- Die Schmelzbadoberfläche wölbt sich unmittelbar hinter der Dampfkapillare auf und bewegt sich wellenartig auf die Erstarrungsfront zu [15], [85].

- Mit Hilfe der Doppelfokustechnik kann die Grenzgeschwindigkeit erhöht werden [86].

Wie bereits erwähnt, ist der Entstehungsmechanismus vermutlich auf einen hydrodynamischen Effekt zurückzuführen. Daher kommt der Umströmung der Dampfkapillare eine zentrale Bedeutung zu. Nach [23] nimmt die Neigung der Dampfkapillare entgegen die Vorschubrichtung mit steigendem Vorschub zu. Diese Neigung hat einen entscheidenden Einfluss auf die Strömung im Schmelzbad.

In Kapitel 5.2.1 und Kapitel 5.2.2 hat sich gezeigt, dass sich der Verlauf der Nahtbreite in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit in die Bereiche A, B und C einteilen lässt. Im Bereich B sind die Nahtbreiten in der Folienmitte sowie an der Oberseite von gleicher Größe. In diesem Bereich tritt noch kein Humping-Effekt in Erscheinung, die Nahtbreite ist mit 0,2 mm selbst bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten doppelt so groß wie der Fokusdurchmesser 100 µm (siehe Bild 5.43, Bild 5.47 und Bild 5.49). Etwa bei der Vorschubgeschwindigkeit 40 m/min sinken beide Nahtbreiten auf ungefähr 0,15 mm ab. Der Humping-Effekt tritt nur dann auf, wenn die Nahtbreite in der Folienmitte größer ist als an der Oberseite. Aus diesen Beobachtungen lässt sich ein einfaches Modell der Strömungsausbildung bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten ableiten, welches in Bild 5.54 skizziert ist.

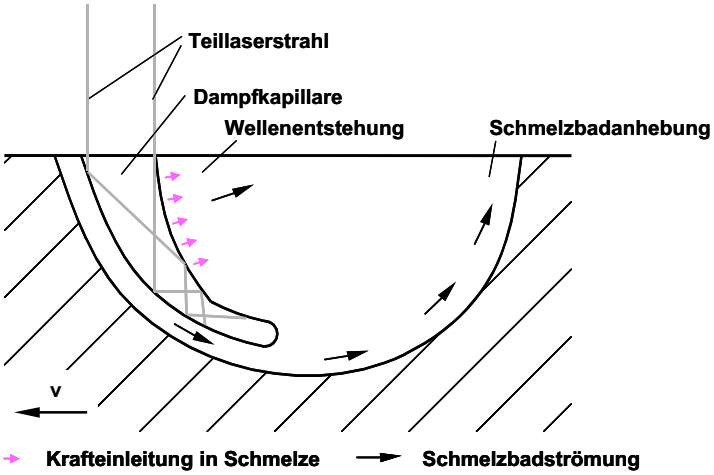

Bild 5.54: Modell der Strömungsausbildung im Schmelzbad bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten.

Aufgrund der Vorschubbewegung ergibt sich im Wesentlichen eine Umströmung der Dampfkapillare, ein Teil der Schmelze fließt bei einer Einschweißung auch unter dieser hindurch [87], [88]. Die Dampfkapillare ist entgegen der Vorschubrichtung geneigt

[23]. Mit steigender Vorschubgeschwindigkeit nimmt die Neigung zu [89], was in [23] durch Überlagerung von der Eindringgeschwindigkeit der Kapillare und der Vorschubgeschwindigkeit erklärt wird. Der Ablationsdruck führt zu einer senkrecht auf die Kapillaroberfläche wirkende Reaktionskraft, was zu einer Krafteinleitung in die Schmelze und somit zu einer Schmelzeströmung führt. Mit zunehmender Neigung wird dadruch die nach unten gerichtete Geschwindigkeitskomponente größer und es fließt mehr Schmelze unter der Dampfkapillare hindurch. Die hinter der Dampfkapillare nach oben gerichtete Strömung führt zu einer Anhebung des Schmelzbades. Bei einer Durchschweißung mit nach unten geöffneter Dampfkapillare, wie das beim oben diskutierten Folienschweißen der Fall ist, ergeben sich ähnliche Verhältnisse. Die hohe Vorschubgeschwindigkeit sowie die Neigung bewirken auch in diesem Fall eine nach unten gerichtete Schmelzströmung, die jedoch aufgrund der unten offenen Dampfkapillare nicht unter dieser hindurch erfolgen kann. Es dominiert eine starke Umströmung in der Folienmitte, was zu der in Kapitel 5.2.1 und Kapitel 5.2.2 beschriebenen Ausbeulung in der Folienmitte führt. Auch bei der Durchschweißung führt eine hinter der Dampfkapillare nach oben gerichtete Schmelzströmung zu einer Anhebung des Schmelzbades.

An der Vorderseite der Dampfkapillare entsteht durch die Wechselwirkung mit dem Laserstrahl ein Dampfdruck, der die Rückseite der geneigten Kapillare deformiert [23], was zu einer Aufweitung führt (kleine Pfeile in Bild 5.54). Wie bereits erwähnt, wird mit steigendem Vorschub die Neigung der Dampfkapillare immer größer [89]. Dadurch verlagert sich die Wechselwirkungszone in Richtung der Nahtoberseite (z.B. bei einer Neigung von 45° verläuft der an der Vorderseite reflektierte Laserstrahl horizontal), was ebenfalls eine Aufweitung der Dampfkapillare im oberen Bereich bewirkt [23]. Eine Aufweitung wurde in [80] experimentell nachgewiesen.

In [90] wird davon ausgegangen, dass die geneigte Kapillarfront aufgrund direkter Bestrahlung mit Laserstrahlung quasi-stationär ist. Da die Rückseite der Dampfkapillare nicht direkt und damit definiert, sondern undefiniert über die Reflexionen der Kapillarfront erfolgt, ergibt sich eine fluktuierende Kapillarrückwand [90]. Der Dampfdruck in der Dampfkapillare hält diese entgegen der Oberflächenspannung, dem hydrodynamischen Druck und dem hydrostatischen Druck der umgebenden Schmelze offen. Verändert sich eine dieser Größen, so ändert die Dampfkapillare so lange ihre Form, bis wieder Kräftegleichgewicht zwischen öffnenden und schließenden Kräften besteht [72]. Störungen des Gleichgewichts können z.B. durch Fluktuation der Laserleistung hervorgerufen werden. Über die fluktuierende Rückwand der Dampfkapillare erfolgt eine Krafteinleitung in die Schmelze hinter der Kapillare, was zu einer Schmelzbadströ-

mung führt (kleine Pfeile in Bild 5.54). Direkt hinter der Dampfkapillare bildet sich eine Schmelzewelle aus, die sich der eigentlichen Schmelzbadbewegung überlagert. In [80] wird die Entstehung von Schmelzewellen direkt hinter der Dampfkapillare beobachtet. Da der Entstehungsmechanismus der Schmelzewelle ein instationärer Prozess ist, ist das Humping nicht periodisch.

Bei genauer Betrachtung der Nahtoberraupe mit Humping in Bild 5.55 sind mehrere Indizien vorhanden, die zur Unterstützung des obigen Modells beitragen. In allen Fällen ist die Grundstruktur der angehobenen Nahtoberraupe glatt und regelmäßig. Die direkt hinter der Dampfkapillare entstehenden Schmelzewellen laufen auf dem angehobenen Schmelzbad entgegen der Vorschubrichtung. In Bild 5.55 ist deutlich zu erkennen, wie sowohl die Schmelzewelle als auch die der Welle nachlaufende Schmelze von oben über die Schmelzanhebung nach unten läuft und dabei erstarrt (siehe Pfeile in Bild 5.55). Aufgrund nicht periodischer Fluktuation der Dampfkapillare sowie möglicher anderer äußerer Einflüsse ist das Humping ebenfalls nicht periodisch. Dieses Modell sollte im Rahmen einer weiterführenden Arbeit mit geeigneten Diagnosemitteln überprüft werden.

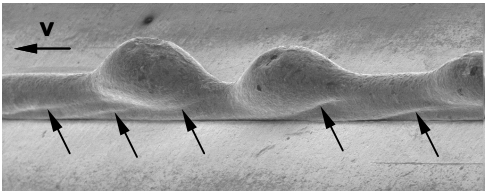

Bild 5.55: REM-Aufnahme einer Schweißnahtoberraupe mit Humping. Die Grundstruktur ist glatt, wobei ein Teil der Schmelze von oben nach unten fließt und dabei erstarrt (siehe Pfeile).

5.2.5 Synopsis

- Mit kleinem Fokusdurchmesser sind beim Folienschweißen deutliche Vorteile gegenüber großem Fokusdurchmesser zu erzielen.
- Eine sehr gute Nahtqualität kann über große Geschwindigkeitsbereiche hinweg erreicht werden, was auf einen sehr stabilen Schweißprozess hindeutet.
- Eine Leistungserhöhung kann in eine Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit umgesetzt werden. Mit einer Steigerung von 500 W auf 750 W kann zwar die Vor-

schubgeschwindigkeit weiter erhöht werden, jedoch tritt Humping für Vorschübe größer als 40 m/min in Erscheinung.

- Bei kleinem Fokusdurchmesser vergrößert sich mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit die Nahtbreite in der Mitte. Erst wenn die Nahtbreite in der Mitte größer ist als an der Oberseite, kommt es zum Auftreten des Humping-Effektes.

- Die Ergebnisse der Blindschweißungen lassen sich ohne Weiteres auf einen Überlappstoß übertragen.

6 Zusammenfassung

Bei der ersten Generation diodengepumpter Festkörperlaser wurden die Pumplampen durch Pumpdioden ersetzt, Kristallgeometrie und Kühltechnik blieben dabei unverändert. Damit war es möglich, gleichzeitig sowohl eine höhere Effizienz als auch eine etwas bessere Fokussierbarkeit zu erzielen. Aufgrund der notwendigerweise über die Mantelfläche des zylindrischen Kristalls erfolgenden Kühlung ist der thermische Linseneffekt jedoch grundsätzlich nicht vermeidbar. Zur deutlichen Verbesserung des Wirkungsgrades und insbesondere der Fokussierbarkeit ist daher ein neues Laserkonzept erforderlich. Der aussichtsreichste Vertreter der Festkörperlaser neuester Generation, der auch bei hohen Laserleistungen die Realisierung bester Fokussierbarkeit prinzipiell erlaubt, ist der Scheibenlaser.

Die Vorteile besserer Fokussierbarkeit können auf verschiedene Weise genutzt werden. Eine bessere Fokussierbarkeit führt entweder bei gleichbleibender Fokussierung zu einem kleineren Fokusdurchmesser oder bei gleichbleibendem Fokusdurchmesser zu einer Vergrößerung des Arbeitsabstandes. Obwohl sich Scheibenlaser der Multikilowatt-Klasse kurz vor der industriellen Einführung befinden, sind die Einflüsse kleiner Fokusdurchmesser auf den Schweißprozess weitgehend unbekannt. Mit dieser Arbeit soll ein Beitrag zum Prozessverständnis beim Laserstrahlschweißen mit besonders kleinen Fokusdurchmessern geschaffen werden, um die Erweiterung bestehender bzw. die Erschließung neuer Anwendungsgebiete zu ermöglichen.

Das Laserstrahlschweißen lässt sich in die Prozessformen Wärmeleitungsschweißen und Tiefschweißen einteilen. Der Übergang von der einen Prozessform zur anderen wird als Schwelle bezeichnet, deren Lage mit dem Strahlparameterquotienten P_S/d_f korreliert. Beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen steigt aufgrund der Ausbildung einer Dampfkapillare direkt an der Schwelle die Einschweißtiefe sprunghaft an. Das Vorhandensein der Dampfkapillare ist charakteristisch für das Tiefschweißen. Mit kleiner werdendem Fokusdurchmesser verschiebt sich die Schwelle in Richtung kleinerer Leistungen. Da die Laserleistung als ausbringender Faktor das aufschmelzbare Volumen bestimmt, ist bei kleineren Leistungen der Sprung der Einschweißtiefe kleiner. Dies bedeutet, dass für das Schweißen von dünnen Blechen eine gute Fokussierbarkeit von großer Bedeutung ist.

Stahlwerkstoffe verhalten sich grundsätzlich wie Aluminiumlegierungen, jedoch ergeben sich aufgrund der anderen Werkstoffeigenschaften etwas andere Verhältnisse. Bei Stahl liegt die Schwelle bei einem kleineren Strahlparameterquotienten. Die Ausbildung der Dampfkapillare erfolgt bereits bei einem kleinen Aspektverhältnis Fokus, weshalb Einkoppelgrad und Prozesswirkungsgrad noch vergleichsweise gering sind. Mit steigender Laserleistung steigt der Einkoppelgrad zunächst stark an, wodurch auch der Prozesswirkungsgrad stark ansteigt. Der Bereich mit noch vergleichsweise geringem Einkoppelgrad wird als Übergangsbereich bezeichnet. Da aber bereits eine Dampfkapillare ausgebildet ist, ist der Übergangsbereich eindeutig dem Tiefschweißbereich zuzuordnen.

Der Vergleich der Werkstoffe St 37-K, AlMgSi1 und AlMg4,5Mn zeigt, dass das an der Schwelle vorhandene Aspektverhältnis Fokus unterschiedlich groß und somit werkstoffabhängig ist. Dies bedeutet, dass das Tiefschweißen nicht anhand eines bestimmten Aspektverhältnisses bestimmt werden kann. Hierzu eignet sich am besten der Prozesswirkungsgrad. Bei den Aluminiumlegierungen ist oberhalb des Sprungs der Anstieg des Einkoppelgrades noch vergleichsweise groß, sodass ebenfalls ein Übergangsbereich vorhanden ist.

Die gute Fokussierbarkeit des Scheibenlasers ermöglicht mit Standardkomponenten einen kleinsten Fokusdurchmesser von 75 µm. Es konnte nachgewiesen werden, dass auch bei der dabei sehr hohen Leistungsdichte keine Plasmaeffekte in der Wechselwirkung vorhanden sind. Aus prozesstechnischer Sicht ist daher kein Schutzgas erforderlich, sofern eine Oxidation der Schweißnaht akzeptiert werden kann.

Mit kleiner werdendem Fokusdurchmesser kann bei ansonsten gleichen Prozessparametern die Einschweißtiefe gesteigert werden. Diese Aussage gilt – wie hier gezeigt werden konnte – nur für Fokusdurchmesser $d_f \geq 200$ µm. Die Verkleinerung auf 150 µm bringt eine nur mehr geringfügige Steigerung der Einschweißtiefe mit sich, eine weitere Verkleinerung führt sogar zu einem Absinken. Gleichzeitig findet auch eine Veränderung der Nahtgeometrie statt.

Als Ursache für beide Effekte konnte der Divergenzwinkel des fokussierten Laserstrahls identifiziert werden. Die starke Fokussierung (d.h. großer Divergenzwinkel) bei sehr kleinen Fokusdurchmessern und hohen Energiedichten führt zu einer Veränderung des radialen Verlaufs der Isophoten, womit die Veränderung der Energieeinkopplung gegenüber den mit lampengepumpten Festkörperlasern verwendeten Fokusdurchmessern einhergeht. Bei Stahl nähert sich vermutlich die Dampfkapillare sowie das Schmelzbad dem Verlauf der Isophoten an. Aluminium zeigt prinzipiell das glei-

che Verhalten, aber aufgrund anderer Werkstoffeigenschaften (Absorptionsgrad, Temperaturleitfähigkeit) ergeben sich andere Nahtformen.

Bei Fokusdurchmessern unterhalb von $d_f = 200$ µm kann die Einschweißtiefe durch die Verringerung des Divergenzwinkels dennoch gesteigert werden, wodurch sich die vermeintliche Prozessgrenze überwinden lässt. Um die Vorteile sehr kleiner Fokusdurchmesser noch besser nutzen zu können, ist eine weitere Verbesserung der Fokussierbarkeit – also die Verringerung des Divergenzwinkels – erforderlich.

Sehr kleine Fokusdurchmesser sind nur mit starker Fokussierung zu erreichen, weshalb die Rayleighlänge sehr klein ist. Die Variation der Fokuslage hat gezeigt, dass zwischen der Fokuslage 0 mm und -1 mm die Einschweißtiefe annähernd gleich bleibt oder sogar um etwa 10% gesteigert werden kann. Liegt der Fokus weiter im Werkstück oder oberhalb der Werkstückoberfläche, sinkt die Einschweißtiefe stark ab. Für einen Schweißprozess, bei dem mit einer Schwankung der Fokuslage zu rechnen ist, ist eine leicht negative Fokuslage zu bevorzugen, damit sich diese Schwankung nicht negativ auf das Schweißergebnis auswirkt. Die prozentuale Tiefenänderung ist bei gleichem Divergenzwinkel gleich und für einen kleinen Winkel geringer als für einen großen. Somit ist auch bezüglich der Variation der Fokuslage eine bessere Fokussierbarkeit vorteilhaft. Eine weitere Verbesserung der Fokussierbarkeit wirkt sich auch hier vor allem dann positiv aus, wenn der Divergenzwinkel weiter reduziert werden kann.

Es wurde anhand von Röntgenuntersuchungen der Schweißnähte nachgewiesen, dass auch bei kleinen Fokusdurchmessern trotz des sehr großen Aspektverhältnisses der Dampfkapillare kein erhöhtes Porenvorkommen gegenüber den großen Fokusdurchmessern festzustellen ist. Bei kleinem Fokusdurchmesser sind die entstehenden Prozessporen aufgrund der schlankeren Dampfkapillaren sehr klein. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass bei hohen Energiedichten die Abdampfraten hoch sind, was zu einer Stabilisierung der Dampfkapillare führt.

Weiterhin ist beim Folienschweißen ein kleiner Fokusdurchmesser und damit eine gute Fokussierbarkeit von großer Bedeutung. Damit lässt sich ein Tiefschweißprozess auch bei Foliendicken ≤ 300 µm mit geringem Energieeintrag und hohen Vorschubgeschwindigkeiten prozesssicher realisieren. Ist die Nahtbreite in der Mitte größer als an der Oberfläche, tritt auf der Nahtoberseite der sogenannte Humping-Effekt in Erscheinung. Ein Scheibenlaser mit 500 W Ausgangsleistung ist für den Blechdickenbereich ≤ 300 µm als ausreichend anzusehen. Bei weiterer Reduzierung der Foliendicke ist eine bessere Fokussierbarkeit ebenfalls sehr wichtig.

Insgesamt lässt sich sagen, dass eine gute Fokussierbarkeit für den Schweißprozess wichtig ist. Insbesondere die Verringerung des Divergenzwinkels hat darauf einen positiven Einfluss. Für eine weitere Steigerung der Fokussierbarkeit ist im Schweißprozess noch Potential vorhanden, das in Zukunft weitere Verbesserungen und die Erschließung neuer Anwendungsgebiete erwarten lässt.

7 Literaturverzeichnis

[1] N.N.: *DIN 1910-1: Schweißen – Begriffe, Einteilung der Schweißverfahren.* Berlin: Beuth Verlag, 1997.

[2] N.N.: *DIN 1910-2: Schweißen – Schweißen von Metallen – Verfahren*. Berlin: Beuth Verlag, 1997.

[3] BEHNISCH (HRSG.): *Kompendium der Schweißtechnik – Band 1: Verfahren der Schweißtechnik.* Düsseldorf: VDS-Verlag, 1997 (Fachbuchreihe Schweißtechnik Bd. 128/1).

[4] HÜGEL, H.: *Strahlwerkzeug Laser: Eine Einführung*. Stuttgart: Teubner, 1992 (Teubner Studienbücher Maschinenbau).

[5] DAUSINGER, F.; GREF, W.: *Braucht man zum Schweißen starke Fokussierbarkeit?* In: Tagungsband der Stuttgarter Lasertage (SLT), Stuttgart, 2001, S.22.

[6] DAUSINGER, F. GREF, W.; RUß, A.: *Festkörperlaser zum Schweißen: Präziser Strahl schafft neue Potenziale*. Laser Magazin **4** (2002), S. 20.

[7] MÜLLER, M.G.: *Innovativer Leichtbau durch energiereduziertes Fügen mit Lasersystemen neuester Generation (LEICHTER)*. Laser Magazin **2** (2000), S. 18.

[8] GREF, W.: *Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen mit der Fokusmatrixtechnik.* München: Herbert Utz Verlag Wissenschaft, 2004. Universität Stuttgart, Maschinenbau, Dissertation, 2004 (Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW).

[9] SCHINZEL, C. M..: *Nd:YAG-Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Automobilbau*. München: Herbert Utz Verlag Wissenschaft, 2002. Universität Stuttgart, Maschinenbau, Dissertation, 2002 (Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW).

[10] DAUSINGER, F.: *Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und Prozesseffektivität*. Universität Stuttgart, Habilitationsschrift, 1994. Stuttgart: Teubner, 1994 (Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW).

[11] BECK, M.: *Modellierung des Lasertiefschweißens*. Universität Stuttgart, Dissertation, 1996. Stuttgart: B. G. Teubner-Verlag, 1996. Universität Stuttgart, Maschinenbau, Dissertation, 1996 (Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW).

[12] FUHRICH, T.: *Marangoni-Effekt beim Laserstrahlschweißen von Stahl*. München: Herbert Utz Verlag Wissenschaft, 2005. Universität Stuttgart, Maschinenbau, Dissertation, 2005 (Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW).

[13] HÄRTL, J.; ZÄH, M.F.: *Diode laser welding: basic processing parameters and applications.* In: Proc. of the 2nd International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing (LIM), München, 2003, S. 73.

[14] HEIPLE, C.R.; ROPER, J.R.: *Mechanism for minor element effect on GTA fusion zone geometry*. Welding Journal **61** (1983) Nr. 4, S. 97.

[15] GRATZKE, U.; KAPADIA, P.; DOWDEN, J; KROOS, J; SIMON, G.: *Theoretical approach to the humping phenomenon in welding processes*. In: Journal of Physics D: Applied Physics **25** (1992) Nr. 11, S. 1640.

[16] KI, H.; MOHANTY, P.S.; MAZUMDER, J.: *A self-consistent three dimensopnal laser keyhole welding model.* In: Proc. of the Laser Apllications in the Automotive Industry Conference (ICALEO), 2000, Dearborn (MI), S. D-34.

[17] BECK, M.; KERN, M.; BERGER, P.; HÜGEL, H.: *Einfluss der Plasmawolke auf Einkopplung und Prozessstabilität beim Lasertiefschweißen mit CO_2-Lasern*. Laser und Optoelektronik **28** (1996) Nr. 4, S. 72.

[18] RUß, A.: *Untersuchungen zum Nd:YAG-Zweistrahlschweißen mit variablem Fokusabstand und Strahlpendeln*. Universität Stuttgart, Diplomarbeit, 2000 (Inst. f. Strahlwerkzeuge: IFSW 00-19).

[19] MATSUNAWA, A.; KIM, J.-D.; KATAYAMA, S.: *Spectroskopic studies on laser induced plume of aluminium alloys.* In: Mazumder, J.; Matsunawa, A.; Magnusson, C. (Hrsg.): Proc. of the Laser Materials Processing Conference (ICALEO), 1995, San Diego, S. 719.

[20] DUMORD, E.; JOUVARD, J.-M.; GREVEY, D.: *Modelling of high power cw Nd:YAG laser welding*. In: Farrukh, U.O.; Basu, S. (Hrsg.): Proc. of the Conference om Modeling and Simulation of Higher-Power Laser Systems IV, San Jose, 1997. Bellingham (WA): SPIE, 1997, S.236 (Proc. SPIE Vol. 2989).

[21] METZBOWER, E.A.: *Absorption in the Keyhole*. In: Fabbro, R.; Kar, A.; Matsunawa, A. (Hrsg.): Proc. of the Laser Materials Processing Conference (ICALEO), 1997, San Diego, S. G-16.

[22] SCHELLHORN, M.: *CO-Hochleistungslaser: Charakteristika und Einsatzmöglichkeiten beim Schweißen*. München: Herbert Utz Verlag Wissenschaft, 2000. Universität Stuttgart, Maschinenbau, Dissertation, 2000 (Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW).

[23] FABBRO, R.; SLIMANI, S.; COSTE, F.; BRIAND, F.: *Study of keyhole behavior for full penetration Nd:YAG cw laser welding*. In: Proc. of the 23th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO), 2004, San Francisco, USA.

[24] HÜGEL, H.; DAUSINGER, F.; BERGER, P.: *Modelling of physical mechanisms in laser keyhole welding*. In: Proc. of the 3rd International Conference on Computational Modeling and Simulation of Materials (CIMTEC), Acireale (CT) Sicily, Italy, 2004.

[25] FUHRICH, T.; BERGER, H.; HÜGEL, H.: *Numerical calculation of the weld pool in deep penetration welding*. In: Cerjak, H. (Hrsg.): Proc. of the Conference on Mathematical Modelling of Weld Phenomena 6, Graz, 2000. London: Maney Publishing, 2001, S. 93.

[26] KILLING, R.: *Angewandte Schweißmetallurgie: Anleitung für die Praxis*. Düsseldorf: DVS-Verlag, 1996 (Fachbuchreihe Schweißtechnik, Bd. 113).

[27] BARGEL, H.J.; SCHULZE, G. (HRSG.): *Werkstoffkunde*. Berlin: Springer, 2003.

[28] GOUFFE, A.: Rev. Optique **24** (1945), S. 1.

[29] RAMSAYER, R.: *Experimentelle Bestimmung der Wirkungsgrade beim Nd:YAG-Zweistrahlschweißen von Stahl und Aluminium*. Universität Stuttgart, Studienarbeit, 2000 (Inst. f. Strahlwerkzeuge: IFSW 00-15).

[30] SWIFT-HOOK, D.T.; GICK, A.E.F.: *Penetration welding with lasers.* Welding Research Supplement **493-s** (1973) S. 492.

[31] REAM, S. L.: *Laser welding efficiency and cost: CO_2, YAG, fiber and disc*. In: Proc. of the 23th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO), 2004, San Francisco, USA.

[32] SEILER, P.: *Anwendungsbeispiele und –möglichkeiten zu diodengepumpten Festkörperlasern*. LaserOpto **31** (1999) Nr. 1, S.50.

[33] KNEUBÜHL, F. K.; SIGRIST, M. W.: *Laser*. Stuttgart: Teubner, 1999 (Teubner Studienbücher Physik).

[34] HÜGEL, H.; BOHN, W. L.: *Solid state thin disk laser*. In: Boreisho, A.S.; Baranov, G.A. (Hrsg.): Proc. of the 12th International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers and Highpower Laser Conference (GCL/HPL), St. Petersburg, 1998. Bellingham (WA): SPIE, 1998, S. 15 (Proc. SPIE Vol. 3574).

[35] KARSZEWSKI, M.: *Scheibenlaser höchster Strahlqualität*. München: Herbert Utz Verlag Wissenschaft, 2000. Universität Stuttgart, Maschinenbau, Dissertation, 2000 (Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW).

[36] IFFLÄNDER, R.: *Festkörperlaser zur Materialbearbeitung.* Berlin: Springer, 1990.

[37] MANN, K.; HUTFLESS, J.; RUß, A.: *Mit dem Scheibenlaser zu neuen Anwendungen.* In: Hügel, H.; Dausinger, F.; Müller, M. (Hrsg.): Tagungsband Stuttgarter Lasertage (SLT), 2003, S. 71.

[38] GIESEN, A.; OPOWER, H.: *Diodenlaser und diodengepumpte Festkörperlaser für die Materialbearbeitung*. In: Dausinger, F.; Bergmann, H.W.; Sigel, J. (Hrsg.): Proc. of the 6th European Conference on Laser Treatment of Materials (ECLAT), Stuttgart, 1996. Wiesbaden: Dinges & Frick, 1996, S. 11.

[39] HÜGEL, H.; SEILER, P.; WOLLERMANN-WINDGASSE, R.: *Neue Hochleistungslaser – Entwicklungstendenzen und fertigungstechnische Einsatzpotentiale*. In: Gesellschaft für Fertigungstechnik Stuttgart (Hrsg.): Tagungsband Fertigungstechnisches Kolloquium (FTK), Stuttgart, 2000. Berlin: Springer, 2000, S. 63.

[40] HÜGEL, H.: *New solid-state lasers and their application potentials*. Optics and Lasers in Engineering **34** (2000) Nr. 4/6, S.213.

[41] VOSS, A.; BRAUCH, U.; GIESEN, A.; KARSZEWSKI, M.; STEWEN, C.; WITTIG, K.: *Efficient high power diode-pumped thin-disc Yb:YAG laser*. In: Shladov, I. (Hrsg.): Proc. of the 9th Meeting on Optical Engineering in Israel, Tel Aviv, 1994. Bellingham (WA): SPIE, 1995, S.501 (Proc. SPIE Vol. 2426).

[42] GIESEN, A.; HÜGEL, H.; VOSS, A.; WITTIG, K.; BRAUCH, U.; OPOWER, H.: *Diode-pumped high-power solid-state laser: concept and first results with Yb:YAG*. In: Fan, T.Y. (Hrsg.): OSA Proceedings on Advanced Solid State Lasers, 1994, Vol. 20. Washington (DC): Optical Society of America, 1994, S. 91.

[43] STEWEN, C.: *Scheibenlaser mit Kilowatt-Dauerstrichleistung*. München: Herbert Utz Verlag Wissenschaft, 2000. Universität Stuttgart, Maschinenbau, Dissertation, 2000 (Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW).

[44] CONTAG, K.; BRAUCH, U.; GIESEN, A.; JOHANNSEN, I.; KARSZEWSKI, M.; SCHIEGG, U.; STEWEN, C.; VOSS, A.: *Multi-hundred watt diode pumped Yb:YAG thin disc laser*. In: Scheps, R. (Hrsg.): Solid State Lasers VI. Bellingham (WA): SPIE, 1997, S.2 (Proc. SPIE Vol. 2986).

[45] SCHMITZ, C.: Trumpf Laser GmbH, persönliche Mitteilung, Mai 2005.

[46] HÜGEL, H.; RUß, A.; WEBERPALS, J.; DAUSINGER, F.: *Welding with the thin disc laser – new processing and application potentials.* In: Abramski, K. M.; Lapucci, A.; Plinski, E.F. (Hrsg.): Proc. of the international Society for optical engineering. Warschau: SPIE, 2005, S. 37 (Proc. SPIE Vol. 5958).

[47] BERGER, P.: *Gasdynamische Komponenten für die Materialbearbeitung*. In: Tagungsband der Stuttgarter Lasertage (SLT) , Stuttgart, 2003, S. 77.

[48] RUß, A.: *Makrobearbeitung am IFSW*. Lasermagazin **1** (2004) S. 17.

[49] KERN, M.: *Gas- und magnetofluiddynamische Maßnahmen zur Beeinflussung der Nahtqualität beim Laserstrahlschweißen*. Stuttgart: Teubner, 1999. Universität Stuttgart, Maschinenbau, Dissertation, 1999 (Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW).

[50] KERN, M.: *Analyse und Weiterentwicklung von bestehenden Konzepten der Prozessgasführung und Entwurf eines effizient arbeitenden Querjets zum Laserschweißen.* Universität Stuttgart, Diplomarbeit, 1993 (Inst. f. Strahlwerkzeuge: IFSW 93-72).

[51] KERN M.; BERGER, P.; HÜGEL, H.: *Querjetkonzept mit minimierter Sogwirkung und optimiertem Spritzerschutz*. In: Dausinger, F.; Bergmann, H.W.; Sigel, J. (Hrsg.): Proc. of the 6th European Conference on Laser Treatment of Materials (ECLAT), Vol. 1, Stuttgart, 1996. Wiesbaden: Dinges & Frick, 1996, S. 227.

[52] KERN, M.; BERGER, P.; HÜGEL, H.: *Optimiertes Querjetkonzept zur effizienten Spritzerablenkung und gesicherten Schutzgaszufuhr beim Laserschweißen*. Laser und Optoelektronik **28** (1996) Nr. 4, S. 62.

[53] GEWANDT, H.: *Entwicklung, Konstruktion und Erprobung eines Prozessadapters für die Bearbeitungsoptik BEO D35.* Universität Stuttgart, Diplomarbeit, 2002 (Inst. f. Strahlwerkzeuge: IFSW 02-21).

[54] BAYER, O.: *Weiterentwicklung und Erprobung einer Doppelfokusoptik für das Schweißen mit dem Scheibenlaser*. Universität Stuttgart, Diplomarbeit, 2002 (Inst. f. Strahlwerkzeuge: IFSW 02-23).

[55] BACHMANN, F.: *Diodenlaser erobern die Verbindungs- und Oberflächentechnik*. In: Tagungsband Fertigungstechnisches Kolloquium Stuttgart (FTK), Stuttgart, 2000. Berlin: Springer, 2000, S. 256.

[56] POPRAWE, R.; PETRING, D.; BENTER, C.: *Schweißen mit Diodenlasern*. In: Dilthey (Hrsg.): Hochleistungsfügeverfahren : Grundlagen, Anwendungen, Ausrüstungen (Tagungsband 7. Internationales Aachener Schweißtechnisches Kolloquium, 2001, Aachen). Aachen: Shaker, 2001, S.117.

[57] N.N.: *Neue Anwendungen für das Laserstrahlschweißen*. Gießerei **89** (2002) Nr. 3, S. 65.

[58] BÖHM, M.: *Aktuelle Trends beim Laserschweißen*. Schweizer Maschinenmarkt **49** (2001), S. 48.

[59] DANZER, W.: *Eine Frage des Gases: Argon-CO_2-Prozessgas ermöglicht das Tiefschweißen mit dem Hochleistungsdiodenlaser*. Maschinenmarkt. Das Industrie Magazin **11** (2002), S.44.

[60] 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.

[61] DUBBEL: *Taschenbuch für den Maschinenbau*. Berlin: Springer, 1995.

[62] LANDOLT-BÖRNSTEIN: *Laser physics and applications,* Group VIII, Vol. 1: Advanced materials and technologies, , Subvolume C: Laser applications. Berlin: Springer, 2004.

[63] DAUSINGER, F.; HÜGEL, H.: *Prozeßadäquate Systemtechnik als Schlüssel für das Aluminiumschweißen*. In: Geiger, M. (Hrsg.): Schlüsseltechnologie Laser: Herausforderungen an die Fabrik 2000 (Tagungsband des 12. Internationalen Kongresses LASER 95, 1995, München). Bamberg: Meisenbach, 1995, S. 211.

[64] ALUMINIUM-ZENTRALE (HRSG.): *Aluminium-Taschenbuch, Bd. 1: Grundlagen und Werkstoffe*. Düsseldorf: Aluminium-Verlag, 1998.

[65] RAPP, J.: *Laserschweißeignung von Aluminiumwerkstoffen*. Stuttgart: B. G. Teubner-Verlag, 1996. Universität Stuttgart, Maschinenbau, Dissertation, 1996 (Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW).

[66] WEBERPALS, J. P.: Dissertation in Vorbereitung.

[67] BAHMÜLLER, J.: *Charakterisierung gepulster Laserstrahlung zur Qualitätssteigerung beim Laserbohren.* München: Herbert Utz Verlag Wissenschaft, 2000. Universität Stuttgart, Maschinenbau, Dissertation, 2000 (Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW).

[68] LEIMSER, M.: Dissertation in Vorbereitung.

[69] WEBERPALS, J.; RUß, A.; DAUSINGER, H.; HÜGEL, H.: *Influence of the focus diameter in laser welding with thin disk laser*. In: Lasers in Manufacturing (LIM) 2005 (Proc. of the Third International WLT- Conference on Lasers in Manufacturing, München, 2005). Stuttgart: AT-Fachverlag, 2005, S. 39.

[70] WEBERPALS, J.; DEININGER, C.; DAUSINGER, F.: *Anwendungspotential stark fokussierender Laser*. In: Tagungsband der Stuttgarter Lasertage (SLT) , Stuttgart, 2005, S. 13.

[71] BECKER, W.; BECK, M.; BERNHARDT, R.: *Potential of robot-guided remote laser welding*. In: Geiger, M.; Otto, A. (Hrsg.): Proc. of the 4th International Conference on Laser Assisted Net Shape Engineering (LANE) 2004, Erlangen. Bamberg: Meisenbach, 2004, S. 201.

[72] HOHENBERGER, B.: *Laserstrahlschweißen mit Nd:YAG-Doppelfokustechnik – Steigerung von Prozessstabilität, Flexibilität und verfügbarer Strahlleistung*. München: Herbert Utz Verlag Wissenschaft, 2003. Universität Stuttgart, Maschinenbau, Dissertation, 2003 (Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW).

[73] RUß, A.; GREF, W.; LEIMSER, M.; DAUSINGER, F.; HÜGEL, H.: *Double focus technique – influence of focal distance on the welding process*. In: Dausinger, F.; Konov, V.I.; Baranov, V.Y.; Panchenko, V.Y. (Hrsg.): Proc. of the International Conference on Lasers, Applications and Technologies (LAT) 2002, Moscow, Russia. Bellingham (WA): SPIE, 2003, S. 362 (Proc. SPIE Vol. 5121).

[74] HOHENBERGER, B.; FAIßT, F.: *Laserstrahlschweißen mit der Doppelfokustechnik – Grundlagen und industrielle Anwendung*. In: Tagungsband Fertigungstechnisches Kolloquium Stuttgart (FTK), Stuttgart, 2000. Berlin: Springer, 2000, S. 276.

[75] 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.

[76] BRADSTREET, B.J.: *Effect of surface tension and metal flow on weld bead formation*. Welding Journal **47** (1968) S. 314.

[77] KOKURA, S.; NIHEI, M.; KOZONO, U.; ASHIDA, E.; ONUMA, A.: *Studies on twin electrode switching arc welding method (report 1) - High speed welding with twin electrode switching TIG*. In: Journal of the Japan Welding Society **49** (1980) Nr. 4, S. 39.

[78] TSUKAMOTO, S.; IRIE, H.; INAGAKI, M.; HASHIMOTO, T.: *Effect of beam current on humping bead formation in electron beam welding*. In: Transaction of National Research Institute for Metals **26** (1984) Nr. 2, S. 35.

[79] TSUKAMOTO, S.; IRIE, H.; INAGAKI, M.; HASHIMOTO, T.: *Effect of focal position on humping bead formation in electron beam welding*. In: Transaction of National Research Institute for Metals **25** (1983) Nr. 2, S. 8.

[80] SCHMIDT, H.: H*ochgeschwindigkeits-Schweißen von Feinstblechen mit CO_2-Laserstrahlung unter besonderer Berücksichtigung des Humping-Effekts*. Aachen: Verlag Mainz, 1994. RWTH Aachen, Dissertation 1994.

[81] ALBRIGHT, C.E.; CHIANG, S.: *High speed laser welding discontinuities.* In: Bruck, G. (Hrsg.): Proc. of the 7th International Congress on Applications of Lasers and Electrooptics (ICALEO), Santa Clara (CA), 1988. Berlin: Springer, 1989, S. 207.

[82] HIRAMOTO, S.; OHMINE, M.; OKUDA, T.; SHINMI, A.: *Deep penetration welding with high power CO2-laser*. In: Proc. of the International Conference on Laser Advanced Materials Processing (LAMP), Osaka, Japan, 1987, S. 157.

[83] MIYAMOTO, I.; PARK, S.-J.; OOIE, T.: *Ultra-fine keyhole welding with single-mode fibre 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. 221.

[84] BECK, M.; BERGER, P.; DAUSINGER, F.; HÜGEL, H.: *Aspects of keyhole/melt interaction in high speed welding*. In: Orza, J.M.; Domingo, C. (Hrsg.): Proc. of the 8th International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers (GCL), Madrid, 1991. Bellingham (WA): SPIE, 1991, S.769 (Proc. SPIE Vol. 13977).

[85] PIRCH, N.; SCHMIDT, H.; OLLIER, B.; KREUTZ, E.W.; BECKER, D.: *Die Humping Instabilität beim Schweißen mit Laserstrahlung*. In: Waidelich, W. (Hrsg.): Tagungsband des 10. Internationalen Kongresses Laser in der Technik (LASER), 1991, München. Berlin: Springer, 1992, S. 552.

[86] GLUMANN, C.: *Verbesserte Prozeßsicherheit und Qualität durch Strahlkombination beim Laserschweißen*. Stuttgart: B. G. Teubner-Verlag, 1996. Universität Stuttgart, Maschinenbau, Dissertation, 1996 (Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW).

[87] FABBRO, R.; CHOUF, K.: *Keyhole behaviour for deep penetration laser welding*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference (ICALEO), 1999, San Diego, S. D-92

[88] MATSUNAWA, A.; SEMAK, V.: *The role of the recoil pressure in energy balance during laser materials processing*. In: J. Phys. D.: Appl. Phys. **30** (1997) S. 2541.

[89] FABBRO, R.; CHOUF, K.; SABATIER, L.; COSTE, F.: *Dynamical interpretation of deep penetration of cw laser welding*. In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference (ICALEO), 1998, San Diego, S. F-186.

[90] FABBRO, R.; CHOUF, K.: *Keyhole description in deep penetration laser welding.* In: Proc. of the Laser Materials Processing Conference (ICALEO), 1999, San Diego, S. C-979.

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 CO_2-Laserschneiden von Metallen
1993, 130 Seiten, ISBN 3-519-06207-0

Rudlaff, Thomas
Arbeiten zur Optimierung des Umwandlungshärtens mit Laserstrahlen
1993, 152 Seiten, ISBN 3-519-06208-9

Borik, Stefan
Einfluß optischer Komponenten auf die Strahlqualität von Hochleistungslasern
1993, 200 Seiten, ISBN 3-519-06209-7

Paul, Rüdiger
Optimierung von HF-Gasentladungen für schnell längsgeströmte CO_2-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 längsgeströmten CO_2-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 CO_2-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 CO_2- 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
Laserschweißeignung 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 CO_2-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 CO_2-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 CO_2-Laseroptiken
1998, 158 Seiten, ISBN 3-519-06235-6

Schaller, Markus K. R.
Lasergestützte Abscheidung dünner Edelmetallschichten zum Heißgaskorrosionsschutz für Molybdän
1998, 163 Seiten, ISBN 3-519-06236-4

Hack, Rüdiger
System- und verfahrentechnischer Vergleich von Nd:YAG- und CO_2-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 CO_2-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 CO_2-Hochleistungslasersystemen zur Materialbearbeitung
1999, 121 Seiten, ISBN 3-519-06244-5

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

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

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

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

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von
Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel, Universität Stuttgart
Forschungsberichte des IFSW ab 2000 erschienen im Herbert Utz Verlag, München

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

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

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

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

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

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

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

Schellhorn, Martin Carl Johannes
CO-Hochleistungslaser: Charakteristika und Einsatzmöglichkeiten beim Schweißen
2000, 142 Seiten, ISBN 3-89675-849-7

Angstenberger, Birgit
Fliehkraftunterstütztes Laserbeschichten
2000, 153 Seiten, ISBN 3-89675-861-6

Bachhofer, Andreas
Schneiden und Schweißen von Aluminiumwerkstoffen mit Festkörperlasern für den Karosseriebau
2001, 194 Seiten, ISBN 3-89675-881-0

Breitschwerdt, Sven
Qualitätssicherung beim Laserstrahlschweißen
2001, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0032-5

Mochmann, Gunter
Laserkristallisation von Siliziumschichten auf Glas- und Kunststoffsubstraten für die Herstellung verbesserter Dünnschichttransistoren
2001, 170 Seiten, ISBN 3-89675-811-X

Herrmann, Andreas
Fertigungsorientierte Verfahrensentwicklung des Weichlötens mit Diodenlasern
2002, 133 Seiten, ISBN 3-8316-0086-4

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Hohenberger, Bernd
Laserstrahlschweißen mit Nd:YAG-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
Evaluierung 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 CO_2-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

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von
Prof. Dr. phil. nat. habil. Thomas Graf, Universität Stuttgart
Forschungsberichte des IFSW ab 2005 erschienen im Herbert Utz Verlag, München

Thomas Fuhrich
Marangoni-effekt beim Laserstrahltiefschweißen 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

Wolfgang Gref
Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen mit der Fokusmatrixtechnik
2005, 136 Seiten, ISBN 3-8316-0537-8