

Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

C.-D. Reiniger
Fluiddynamische Effekte beim Remote-
Laserstrahlschweißen von Blechen mit
Fügespalt

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. 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.

Fluiddynamische Effekte beim Remote-Laserstrahlschweißen von Blechen mit Fügespalt

von Dr.-Ing. Claus-Dieter Reiniger
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

Als Dissertation genehmigt
von der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel (i.R.)
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. Siegfried Schmauder
Mitberichter: Prof Dr. phil. nat. habil. Thomas Graf

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

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2015

D 93

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

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2015

ISBN 978-3-8316-4528-2

Printed in Germany

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

Kurzfassung der Arbeit

Das robotergeführte Remote-Laserstrahlschweißen mit programmierbaren Scanneroptiken in Verbindung mit brillanten, fasergekoppelten Festkörperlasern eröffnet wirtschaftliche Potenziale und neue Möglichkeiten der Prozessoptimierung zur Steigerung der Nahtqualität.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Remote-Laserstrahlschweißen verzinkter Bleche für den Karosserierohbau. Ziel der Arbeit war die Entwicklung einer prozesssicheren Schweißmethode. Dazu erforderlich ist ein detailliertes Prozessverständnis einschließlich phänomenologischer Deutungen der Fehlerentstehungsmechanismen. Aus den gewonnenen Erkenntnissen wurden Fehlervermeidungsstrategien abgeleitet und deren Serientauglichkeit nachgewiesen.

Eine erste Aufgabe bestand darin, die Technologie dieses Verfahrens für die Erzeugung eines notwendigen Entgasungsspalt durch Abstandsnoppen anzuwenden und den Entstehungsvorgang derartiger Oberflächenstrukturen zu deuten. Dies wurde durch Optimierung zahlreicher Parameter, wie beispielsweise Fokuslage, Prozesszeit und Einstrahlwinkel, für die üblicherweise im Automobilbau verwendeten beschichteten Stahlbleche erreicht. Für alle untersuchten Stähle konnten Verfahren zur Herstellung von Lasernoppen – z.T. unterschiedliche physikalische Phänomene ausnutzend – entwickelt werden, die den erforderlichen Fügspalt und damit die notwendige Zinkentgasung gewährleisten.

Schwerpunkt der Arbeit war sodann die Schweißprozessoptimierung und die Steigerung der Nahtqualität in Verbindung mit dem durch Lasernoppen realisierten Fügspalt. Es wurden sowohl anwendungsbedingte, als auch prozessbedingte Einflussgrößen auf die Fehlerentstehung herausgearbeitet und bewertet. Die gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen eine Vermeidung bzw. Reduzierung von Schweißfehlern und Nahtunregelmäßigkeiten. Noch verbleibende Nahtunregelmäßigkeiten können durch eine zweite Laserüberfahrt prozesssicher eliminiert werden.

Mit den erarbeiteten Prozessparametern sind qualitativ hochwertigere Schweißnähte als bei herkömmlichen Laserschweißverfahren möglich. Die Ergebnisse dieser Arbeit werden bereits weltweit in der Serienproduktion des Automobilbaus angewendet.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung der Arbeit	1
Inhaltsverzeichnis	3
Verzeichnis der Symbole	6
Extended Abstract	9
1 Einleitung	12
1.1 Motivation	12
1.2 Zielsetzung	13
1.3 Aufbau der Arbeit.....	14
2 Grundlagen und Stand der Technik	16
2.1 Laserschweißen und Schweißbarkeit von Stahl	16
2.1.1 Verfahren	16
2.1.2 Schweißbarkeit von Stahl	18
2.2 Korrosionsschutzschichten	20
2.3 Ausgangsproblematik	23
2.4 Bekannte Lösungsansätze zum Laserstrahlschweißen beschichteter Bleche. 26	
2.4.1 Prozesstechnische Ansätze zum Schweißen mit Nullspalt	27
2.4.2 Schweißen mit Spalt	33
2.4.3 Laserschweißbare Beschichtungen	38
2.4.4 Einschätzungen von Lösungsansätzen	39
2.5 Remote-Laserstrahlschweißen.....	41
3 Systemtechnik und experimentelle Durchführung	47
3.1 Systemhardware	47
3.1.1 Diodengepumpte Festkörperlaser	47
3.1.2 Komponenten zur Strahlführung und Fokussierung	49
3.1.3 Bearbeitungsanlagen	52

3.1.4	Spanntechnik	53
3.1.5	Programmierung der Schweißmuster	54
3.2	Untersuchte Werkstoffe und Beschichtungen	54
3.2.1	Werkstoffe	54
3.2.2	Beschichtungen	56
3.3	Untersuchungs- / Analysemethoden	57
4	Sicherstellung des erforderlichen Entgasungsspalts durch Lasernoppen	60
4.1	Grundsätzliche Möglichkeiten der Herstellung von Lasernoppen	60
4.2	Noppenerzeugung im Modus des Wärmeleitungsschweißens	64
4.2.1	Einfluss von Intensität und Pulsdauer auf die Noppenhöhe	66
4.2.1.1	Ergebnisse auf DC04, blank	67
4.2.1.2	Ergebnisse auf ZStE340, blank	69
4.2.1.3	Zusammenfassung der Auswirkungen von Intensität und Pulsdauer	71
4.2.2	Einfluss von Grundwerkstoff, Blechdicke und Beschichtung auf die Noppenhöhe	73
4.2.2.1	Einfluss der Stahlsorte	73
4.2.2.2	Einfluss der Blechdicke	74
4.2.2.3	Einfluss der Beschichtung	74
4.2.3	Einfluss des Einstrahlwinkels auf die Noppenhöhe	76
4.2.4	Einfluss verschiedener Umgebungsbedingungen auf die Noppenhöhe	78
4.2.4.1	Grundtemperatur des Materials	78
4.2.4.2	Noppenbildung unter Gasatmosphäre	79
4.2.4.3	Einfluss von Bahnungenauigkeiten	80
4.2.5	Zusammenfassung der experimentell festgestellten Einflussgrößen auf die Noppenhöhe	81
4.2.6	Noppenentstehung	82
4.2.6.1	Zeitliche Entstehung	82
4.2.6.2	Noppenform	86
4.2.7	Mechanismus der Noppenentstehung	87
4.3	Noppenerzeugung im Modus des Tiefschweißens	95
4.3.1	Einfluss der Laserparameter auf die Noppenbildung	95

4.3.2 Noppenentstehung.....	98
4.4 Fertigungstechnische Aspekte.....	102
5 Fluiddynamische Phänomene beim Laserstrahlschweißen mit Spalt	104
5.1 Nahtunregelmäßigkeiten und Schweißfehler	105
5.1.1 Definition Nahtunregelmäßigkeiten und Schweißfehler	106
5.1.2 Bedeutung und Klassifizierung von Nahtunregelmäßigkeiten	109
5.2 Spritzerbildung	110
5.2.1 Experimentelle Beobachtungen von Spritzerentstehung	110
5.2.2 Qualitative Deutung der Spritzerentstehung.....	113
5.3 Fehlerentstehung beim Schweißen mit Spalt	116
5.3.1 Experimentelle Untersuchung der Einflussgrößen auf die Fehlerentstehung	116
5.3.1.1 Material- und anwendungsbedingte Einflussgrößen.....	116
5.3.1.2 Laser- und prozessbedingte Einflussgrößen	120
5.3.1.3 Zusammenfassung der Einflussgrößen auf die Fehlerentstehung	132
5.3.2 Fehlerentstehung	132
5.3.2.1 Beobachtungen zur Lochentstehung	133
5.3.2.2 Deutungsansätze zur Lochentstehung.....	140
6 Maßnahmen zur Reduzierung von Schweißfehlern	152
6.1 Direkte Maßnahmen	153
6.1.1 Spritzervermeidung.....	153
6.1.2 Reduzierung des Schmelzbaddefizits beim Schweißen.....	155
6.1.2.1 Fokusbewegung während des Schweißprozesses	155
6.1.2.2 Gezielte Anpassung des Entgasungsspalts.....	156
6.2 Optimierung der Nahtqualität unmittelbar nach dem Schweißen	157
6.2.1 Minimierung des Endkraters durch Strahlbewegung.....	157
6.2.2 Kantenabschmelzen	158
6.3 Fertigungstechnische Aspekte.....	160
7 Zusammenfassung	162
8 Literatur- und Quellenverzeichnis	166

Verzeichnis der Symbole

Symbol	Einheit	Bedeutung
α	m^{-1}	Absorptionskoeffizient
Δp	Pa	Druckdifferenz
Δt	s	Schweißdauer
ΔT	K	Änderung der Temperatur
ΔU	kJ	Änderung der inneren Energie
ε_{kin}	kJ	Kinetische Energie
η_{A}	-	Einkoppelgrad
η_{Pr}	-	Prozesswirkungsgrad
η_{th}	-	thermischer Wirkungsgrad
κ	m^2/s	Temperaturleitfähigkeit
λ	nm	Wellenlänge
λ_{th}	$\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{K}$	Wärmeleitfähigkeit
ρ	kg/m^3	Dichte
Θ	rad	Divergenzwinkel des Strahls
σ	N/m	Oberflächenspannungskoeffizient
A	-	Absorptionsgrad
Al	-	Aluminium
Ar	-	Argon
a	mm	Schmelzbadabstand hinter der Dampfkapillare
BEO	-	Bearbeitungsoptik
BH	-	Bake-Hardening
B_{N}	mm	Schmelzbadbreite einer Noppe
b_{S}	mm	Schmelzfilmbreite
b	mm	Schweißnahtbreite
b_{entgas}	mm	Entgasungsbreite
b_{Zexp}	mm	Entzinkungsbreite, experimentell
b_{Zsim}	mm	Entzinkungsbreite, Simulation nach 907°C Isotherme

Symbol	Einheit	Bedeutung
$C_{\bar{A}}$	-	Kohlenstoffäquivalent
CO_2	-	Kohlendioxid
c_p	$\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$	spezifische Wärmekapazität
cw	-	continuous wave = Dauerstrich(-betrieb)
d	mm	Poren-/Lochdurchmesser
d_f	μm	Fokusedurchmesser (Strahldurchmesser auf Werkstückoberfläche)
d_k	μm	Faserkerndurchmesser
d_z	mm	Zinkschichtdicke
D	mm	Strahldurchmesser auf der Fokussierlinse
DBL	-	Daimler-Benz Liefervorschrift
DC04	-	konventionelle, unlegierte Tiefziehstähle
e	mm	Einschweißtiefe
E	J/cm^2	Energiedichte
f	mm	Brennweite der Fokussierlinse
f_k	mm	Kollimationsbrennweite
F	mm^2	Fläche des Nahtquerschnitts
F	-	Fokussierzahl
Fe	-	Eisen
g	m/s^2	Erdbeschleunigung
h_N	μm	Noppenhöhe
h_s	J/kg	Schmelzenthalpie
H	kJ/mm^3	spezifischer Wärmebedarf
He	-	Helium
I	W/cm^2	Intensität (Leistungsdichte)
K	-	Strahlqualitätszahl
l	mm	Nahtlänge
LAM	-	laseraktives Medium
LLK	-	Lichtleitkabel
m_i	kg	beteiligte Massen
M^2	-	Beugungsmaßzahl (Kennzahl für Strahlqualität)
MAG	-	Metall-Aktiv-Gasschweißen
Mg	-	Magnesium
MIG	-	Metall-Inert-Gasschweißen

Symbol	Einheit	Bedeutung
n	-	Brechungsindex
Nd:YAG	-	Neodym:Yttrium-Aluminium-Granat ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$)
p_σ	Pa	Druck durch die Oberflächenspannung
P_Z	Pa	Zinkdampfdruck
P_L	kW	Laserleistung
PFO	-	programmierbare Fokussieroptik
PS	-	Fügeverfahren Punktschweißen
PSK	-	Fügeverfahren Punktschweißkleben
RS	-	Fügeverfahren RobScan
s	mm	Spaltweite
S	-	Schachtverhältnis (Aspektverhältnis)
Si	-	Silizium
SL	-	Scheibenlaser
SPP	mm*mrad	Strahlparameterprodukt ($d_f \cdot \Theta_0/4$)
t	mm	Blechdicke
t_{kap}	mm	Kapillartiefe
t_N	mm	Schmelzbادتiefe einer Noppe
t_p	s	Pulszeit
T	K	Raumtemperatur
T_{max}	K	maximale Temperatur
T_S	K	Schmelztemperatur
T_v	K	Verdampfungstemperatur
T_Z	K	Zinkdampftemperatur
TKS	-	Thyssen Krupp Stahl
TRIP	-	Transformation Induced Plasticity
v	m/min	Vorschubgeschwindigkeit (Schweißgeschwindigkeit)
$V_{Z\text{fest}}$	mm^3	Zinkvolumen im festen Zustand
$V_{Z\text{gas}}$	mm^3	Zinkvolumen im gasförmigen Zustand
WEZ	-	Wärmeeinflusszone
WIG	-	Wolfram-Inert-Gasschweißen
Yb:YAG	-	Ytterbium:Yttrium-Aluminium-Granat ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$)
z_{rf}	mm	Rayleighlänge des fokussierten Strahls
z	mm	Fokuslage (bezogen auf Werkstückoberkante)
ZStE340	-	mikrolegierter Stahl

Extended Abstract

Robot-guided laser welding has firmly established itself as a valuable extension to conventional joining technologies in automotive body-in-white production. Robot-guided remote laser welding with programmable scanner optics in combination with brilliant, fiber-coupled solid-state lasers leverages further economic potential and new possibilities in process optimization for improvements in weld seam quality.

The goal of this dissertation is the development of a stable weld strategy for joining coated sheet steel in body-in-white production. These coatings consist mainly of zinc and organic materials and serve as a corrosion protection layer. Since their melting and boiling temperatures are much lower than the corresponding temperatures for the base steel, zero-gap overlap weld seam quality is adversely affected by outgassing within the melt pool. Controlled outgassing can be achieved by creating a gap between the parts to be welded. Typically, a gap of 0.1 to 0.2 mm ensures successful outgassing without affecting weld quality.

In a literature search on welding coated sheet steels, a summary and evaluation of previous approaches was performed. Introducing a reproducible gap to ensure controlled outgassing was found to be the only method both effective and fit for volume production. Other approaches suggested in literature such as beam movement, pulsing, dual-focus techniques, hybrid techniques and introduction of filler materials could not provide proof of reliable performance under zero-gap volume production conditions.

The requirement of a reliably constant part gap of around 0.1 mm for the degassing of vaporizing coating elements was the driver for the development of topographically raised elements on the steel surface through laser interaction. One of the two main topics of this work was to generate a method for creating part gap through laser pulses. These so-called laser nubs are created with the laser before the actual welding process on one of the two sheets to be joined. With the help of these laser nubs as spacers between the parts to be welded, the necessary part gap for welding coated steels can easily be realized.

Evaluation of numerous tests series and high-speed videos revealed details of the laser nub creation process. Two completely different formation mechanisms were demon-

strated and explained. Nub formation on materials up to 400 MPa – created in heat conduction welding mode – is based on the mechanism of surface tension, while nub formation on ultra-high-strength TRIP steel – created in keyhole welding mode – is due to melt flow effects behind the capillary.

Nubbing parameters for ductile DC04 steel, for high-strength steel up to 400 MPa, and for ultra-high strength TRIP steel up to 700 MPa were developed. Nub heights between 50 and 250 μm were realized. Parameters relevant to nub creation are process time, laser beam intensity (defocusing), material type, sheet thickness, coating type and beam angle. Process times for heat conduction type nubs range from 12 to 50 ms. The most important controlling variables for nub height and shape are defocusing and process time, in other words intensity and energy density. With higher defocusing, and corresponding longer process time, the nub height can be increased. However, outside of the ideal combination of pulse duration and defocusing, nub height scattering increases.

Focus of this work was the optimization of the weld process and the increase in weld quality through the introduction of a part gap realized via laser nubs. The variables affecting weld fault occurrence and weld fault mechanisms, attributable to both process and application, were identified and evaluated.

The experimentally determined minimum gap for fault-free welding of galvanized steels of sheet thickness between 0.7 and 1.5 mm with laser power of 4 kW and a focal diameter of 680 μm ranges from 0.07 to 0.1 mm. An investigation of the influence of gap width on weld quality for various focal diameters showed that for smaller focal diameters, end crater holes and insufficient bond occurred already at smaller gap widths.

The parameters gap, sheet thickness, and focal diameter predominantly determine process stability in laser welding of galvanized steel.

With increasing gap, the bonding surface area and the seam undercut increase. Throughout all trials, the part gap width proved to be the single most important variable in affecting weld quality. Studies of high-speed process videos revealed an open melt pool behind the capillary which grows with increasing weld seam length. This can be attributed to a melt pool deficit caused by a material redistribution along the seam. Weld spatter and large part gap increase the melt pool deficit, resulting in end crater holes and pores caused by a detaching melt pool.

Furthermore, different types of spatter were identified and avoidance strategies defined. In general, spatter is due to a high melt pool dynamic and increases with higher laser power and weld speed. Accordingly, spatter at the beginning of the weld can be avoided by use of a short laser power ramp and an optional weld speed ramp.

A second laser pass over the seam following the actual weld can reduce or even eliminate weld bulge, undercut, end craters, holes and spatter. This second laser pass incorporates low energy density and high speed. It can be controlled such that the beam is guided around the fault in a spiraling motion. This approach melts material in the vicinity and lets it flow into the weld fault. The result is a uniform seam cross-section with reduced undercut and very smooth weld surface as well as optimized bonding area and strength with reduced stress concentration.

The weld quality resulting from remote laser welding with the above mentioned post-processing poses a new quality standard in laser welding of galvanized steel.

The results of this work offer a thorough understanding of the laser nub creation process for remote laser welding. The key weld fault creation processes for laser lap welding of galvanized steels were identified and successful counter-measures were presented. The discussed remote welding processes were developed to series production levels and are currently in use in worldwide large-scale automobile production.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Nach der Realisierung einer ersten Laserstrahlquelle im Jahre 1960 fanden in der Folgezeit entwickelte Nd:YAG- und CO₂-Laser schon bald zunehmende Bedeutung in der industriellen Produktion. Speziell bei kontinuierlich arbeitenden Festkörperlasern ist die Weiterentwicklung in Richtung einer deutlichen Steigerung von Strahlqualität und Laserleistung gelungen. Heute erreichen diodengepumpte cw-betriebene Yb:YAG-Laser 16 kW und mehr bei einem Wirkungsgrad von bis zu 25%. Aufgrund dieser rasanten Entwicklung der Laserstrahltechnologie hat sich der Laser in vielen Bereichen der Materialbearbeitung als thermisches Werkzeug etablieren können. In der Fügetechnik wird der Laserstrahl zum Schweißen von metallischen und nichtmetallischen Werkstücken verwendet und ersetzt heute bereits in vielen Bereichen konventionelle Fertigungsverfahren.

Abhängig von seiner Wellenlänge wird der Laserstrahl durch optische Elemente wie Spiegel oder flexible Glasfasern zu dem Werkstück geleitet und über Spiegel oder Linsen auf die für den Bearbeitungsprozess erforderliche Leistungsdichte gebündelt. Hochdynamische Portalanlagen und vielachsige Industrieroboter bewegen das Werkstück oder den Laserstrahl so, dass beliebige dreidimensionale Bearbeitungsbahnen erzeugt werden können. Die Führung der Festkörper Strahlung innerhalb einer flexiblen Glasfaser ist gerade dann von Vorteil, wenn einerseits schnelle Bewegungen und große räumliche Distanzen während einer Bearbeitung notwendig werden oder andererseits ein Laser mehrere Arbeitsstationen im time-sharing Betrieb mit Laserlicht versorgt. Der Einsatz des Lasers ist dann besonders wirtschaftlich, wenn hohe Bearbeitungsgeschwindigkeiten erforderlich sind, sowie ein hoher Grad an Automatisierung realisiert werden kann.

Eine Vielzahl von Werkstoffen, neue und effizientere Anwendungen einhergehend mit immer höher werdenden Ansprüchen an die Bearbeitungsqualität stellen neue Herausforderungen für die Prozessentwicklung dar. Ein seit einigen Jahren in der Entwicklung befindliches Schweißverfahren, das robotergeführte Remote-Schweißen, vereint eine hohe Laser- und Anlagenauslastung infolge geringer Nebenzeiten und hochflexib-

le Bearbeitungen, die individuell auf die Bauteilgeometrie und die Beanspruchungsarten ausgelegt werden können. Die exakte und ebenso variable Führung des Laserstrahls wird mit Hilfe von programmierbaren Fokussieroptiken – auch Scanner genannt – realisiert. In Verknüpfung mit einem modernen Festkörperlaser – Scheiben- oder Faserlaser – lassen sich Arbeitsabstände bis zu 500 mm bei einem Fokusedurchmesser von 600 µm realisieren.

Im Vergleich zur Anwendung mit robotergeführter Standardschweißoptik kann die Prozessführung beim Remote-Schweißen um ein vielfaches flexibler gestaltet werden, was beispielsweise eine signifikante Verbesserung der Schweißnahtqualität zur Folge haben kann. Die Matrix der Bearbeitungsparameter wird mittels exakt programmierbarer Scanneroptiken vielfältiger und setzt in Folge dessen ein umfangreiches Prozess-Know-how voraus.

Die zu erwartende Produktivitätssteigerung beim Remote-Schweißen und die Qualitätsverbesserung durch Optimierung der Prozessparameter mit Hilfe der programmierbaren Scanneroptik sind Motivation, dieses Verfahren für die industrielle Serienanwendung weiter zu entwickeln.

Die Literaturrecherche zum Thema Prozessentwicklung des Laserstrahlschweißens von verzinkten Stahlblechen ergab, dass hierzu experimentelle Untersuchungen meist exemplarischen oder grundsätzlich physikalischen Charakter haben und sich als nur wenig praxistauglich erweisen.

1.2 Zielsetzung

Primäres Ziel der Arbeit ist demgemäß die Entwicklung einer prozesssicheren Schweißmethode, mit der sich beschichtete Stahlbleche im Bereich des Karosserierohbaus fügen lassen. Diese Beschichtungen setzen sich überwiegend aus Zink und organischen Materialien zusammen und dienen dem Korrosionsschutz. Da im Vergleich zum Stahl der Schmelz- respektive Siedepunkt dieser Schichten deutlich niedriger ist, gasen sie innerhalb des Schmelzbades aus und bewirken eine Verschlechterung der Schweißnahtqualität bei Überlappnähten im Nullspalt. Um eine ausreichende und kontrollierte Ausgasung zu erreichen, müssen beispielsweise Abstände zwischen den Fügepartnern erzeugt werden. In der Regel ist ein Spalt zwischen 0,1 und 0,2 mm zur Gewährleistung der Zinkentgasung innerhalb der Fügeebene ausreichend. Die Entwicklung einer geeigneten Methode für die Zinkentgasung ist somit sekundäres Ziel der Arbeit.

Das bevorzugte Schweißverfahren ist das Laserstrahlschweißen mit dynamischer Strahlbewegung unter Vermeidung von zusätzlichen Hilfsstoffen.

Ein wichtiges Qualitätsmerkmal von Laserschweißnähten ist die Lochfreiheit. Löcher können einerseits zu Festigkeitsproblemen führen und stellen andererseits ein Dichtigkeitsproblem dar. Deshalb ist es wichtig, die verschiedenen Arten der Lochentstehung zu kennen, um beim Auftreten dieser gezielte Gegenmaßnahmen einleiten zu können. Unterschiedliche Fehlerentstehungen und deren Deutungsansätze müssen verstanden werden, um geeignete Gegenmaßnahmen entwickeln zu können.

Um die gesamten Prozesspotenziale des Remote-Schweißens ausnutzen zu können, ist ein grundlegendes Prozessverständnis für das Laserstrahlschweißen von Blechen in Überlappanordnung zu erarbeiten.

1.3 Aufbau der Arbeit

Bereits die kurze Beschreibung der Remote-Schweißtechnik lässt erkennen, dass in Folge der vielen möglichen Prozessparameter und deren Zusammenwirkung eine gezielte Nutzung qualitätsverbessernder Maßnahmen möglich ist. Daher wird das Thema Prozessverständnis ein zentraler Punkt in verschiedenen Kapiteln der Arbeit sein.

Das Kapitel 2 der Arbeit befasst sich mit dem Stand der Technik zum Thema Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche und gibt eine Übersicht zu prozesstechnischen Ansätzen sowie deren Einschätzung im Vergleich zu dem in der Arbeit entwickelten Verfahren.

In Kapitel 3 wird die verwendete Systemhardware, die verwendeten Materialien beschrieben, und es werden die in dieser Arbeit verwendeten Untersuchungs- und Auswertemethoden erläutert.

Innerhalb Kapitel 4 wird die Spaltgestaltung durch Lasernoppen behandelt. Nach Vorstellung dieser Verfahrenstechnik werden die Einflüsse von Parameter wie Laserleistung, Prozesszeit etc. auf die Höhe der Lasernoppen diskutiert. Weiter werden unterschiedliche Entstehungsmechanismen von Lasernoppen vorgestellt.

Nach dem der zwingend benötigte Spalt durch Lasernoppen gewährleistet ist, befasst sich das Kapitel 5 mit dem Laserstrahlschweißen von Überlappnähten mit Spalt. Nach der Definition und Bedeutung von Nahtfehlern werden verschiedene Fehlerent-

stehungsmechanismen anhand von Deutungsmodellen und experimentellen Versuchen beschrieben. Insbesondere wird auf die Oberflächenspannung der Schmelze eingegangen, die eine große Rolle bei der Fehlerentstehung beim Schweißen mit Spalt spielt.

Das Kapitel 6 umfasst die Qualitätsverbesserungen von Schweißnähten mit Hilfe des gewonnenen Prozessverständnisses. Es werden Maßnahmen sowohl zur Fehlervermeidung als auch Maßnahmen, welche direkt nach dem Schweißprozess die Nahtqualität optimieren, beschrieben.

Am Ende der Arbeit erfolgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse, und es wird ein Ausblick für die Realisierung zukünftiger Anwendungsmöglichkeiten der Remote-Schweißtechnik in einer Serienproduktion gegeben.

2 Grundlagen und Stand der Technik

Im Karosserierohbau sind gegenwärtig eine Vielzahl von Fügeverfahren eingesetzt. Nach wie vor dominieren die Widerstandsschweißverfahren und dabei insbesondere das Punktschweißen. In großem Umfang wird auch das Bolzenschweißen eingesetzt, während das Schutzgasschweißen bei Stahlkarosserien rückläufig ist. Das Laserstrahlschweißen ist innerhalb der automobilen Serienproduktion zurzeit auf einige Anwendungsfälle beschränkt, es wird aber zukünftig vermehrt andere Fügeverfahren ersetzen. Bei der Fertigung von Tailored Blanks ist das Laserschweißen bereits in hohem Maße etabliert. Von großer Bedeutung für einen wirtschaftlichen Großserieneinsatz der Lasertechnik ist dabei die erreichbare Fertigungsqualität in Verbindung mit korrosionsschützenden Beschichtungen auf nahezu allen im Karosserierohbau verwendeten Stahlblechen.

2.1 Laserschweißen und Schweißbarkeit von Stahl

Der folgende Abschnitt befasst sich mit den Grundlagen des Laserschweißens. Es wird jedoch nicht auf Details eingegangen, da eine Vielzahl von vorangegangenen Arbeiten ausführlich darüber berichten. In [1] sind Grundlagen zum Laserstrahlschweißen aufgeführt.

2.1.1 Verfahren

Wärmeleitungsschweißen

Beim Wärmeleitungsschweißen wird der Werkstoff nur nahe der Oberfläche aufgeschmolzen. Es entstehen Schweißnähte von einigen Zehntel Millimetern Tiefe. Bei diesem Verfahren wird der Laserstrahl mit Hilfe eines Spiegels oder einer Linse auf die Fügestelle fokussiert. Die absorbierte Laserleistung heizt die Werkstücke lokal auf. Bei ausreichender Intensität schmelzen die Werkstoffe auf, fließen ineinander und erstarren nach Abkühlung in einem gemeinsamen Schweißpunkt oder einer gemeinsamen Schweißnaht. Die Intensität des Laserstrahls genügt beim Wärmeleitungsschweißen für das Aufschmelzen, jedoch nicht zum Verdampfen des Werkstoffes.

Durch einen hohen reflektierten Anteil wird nur wenig elektromagnetische Strahlung im Werkstück absorbiert und in Wärme umgewandelt. Theoretische Betrachtungen sind in [2] und [3] zu finden.

Tiefschweißen

Beim Tiefschweißen entstehen dagegen tiefe und schmale Nähte. Das Verfahrensprinzip beruht auf der Ausbildung einer Dampfkapillare mit einem Durchmesser vergleichbar dem des fokussierten Strahls. Der Dampfdruck wirkt dem hydrostatischen und dynamischen Druck der umgebenden Schmelze sowie deren Oberflächenspannung entgegen und verhindert das Schließen der Kapillare. Von deren Wandungen gelangt die dort eingekoppelte Energie durch Wärmeleitung in die Schmelze und weiter in das feste Material. Durch die Relativbewegung zwischen Kapillare und Werkstück entlang einer vorgegebenen Bahn wird stetig neues Material aufgeschmolzen, das die Kapillare seitlich umströmt und dahinter, in Folge Abkühlung durch Wärmeleitung in das Bauteil, wieder erstarrt. Dieser als Tiefschweißen bekannte Effekt wird beim Laserstrahlschweißen angestrebt, da er die Energieeinkopplung in das Werkstück durch Mehrfachreflektion um ein Vielfaches gegenüber dem Fall des Wärmeleitungsschweißens erhöht. Dabei hängen beim Tiefschweißen die Schmelzbadströmungen stark von der Temperaturabhängigkeit des Oberflächenspannungskoeffizienten des zu bearbeitenden Materials ab. Diese Strömungen werden auch als Marangoni-Strömungen bezeichnet. In [4] werden die Einflussgrößen und die Entstehung dieser Strömungen ausführlich diskutiert. Für die Entstehung der Lasernoppen (siehe Kapitel 4.2.6) spielt die Oberflächenspannung von flüssigen Metallschmelzen eine bedeutende Rolle. Bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten indessen wird das Strömungsfeld durch die Ablationsvorgänge im Kapillarbereich, insbesondere an deren Front, bestimmt [1].

Doppelfokustechnik

Die Ausbildung der Dampfkapillare wird durch die Wechselwirkung zwischen Laserstrahl und Material bestimmt, wobei schon geringe Schwankungen sowohl der Laserstrahlstabilität als auch der Werkstoffeigenschaften eine starke Beeinflussung des Prozessablaufs und der resultierenden Nahtqualität verursachen können. Eine Modifizierung der Leistungsdichteverteilung auf dem Werkstück stellt eine geeignete Möglichkeit zur Stabilisierung der Dampfkapillare und damit der resultierenden Nahtqualität dar.

Untersuchungen an verschiedenen Aluminiumwerkstoffen haben gezeigt, dass Nahtaussetzer, Schmelzauswürfe und Poren nahezu vollständig vermeidbar sind, wenn eine angepasste Intensitätsverteilung durch die Kombination zweier einzelner Strahlen realisiert wird [5].

2.1.2 Schweißbarkeit von Stahl

Stahl ist das meist verwendete Metall, dessen Einsatz sich auf fast alle Gebiete der Technik erstreckt. Die Geometrie der Bauteile umfasst ein weitreichendes Spektrum von einfachen Gegenständen bis in den Bereich hoch beanspruchter und komplexer Konstruktionen. Bevor neue Stahlwerkstoffe im Großserienbau verwendet werden können, müssen die Werkstoffeigenschaften in vielfältiger Hinsicht untersucht werden, wie beispielsweise die Prüfung, ob ein bisherig eingesetztes Fügeverfahren für die neuen Werkstoffe geeignet ist [6].

Die Schweißbarkeit metallischer Bauteile ist in DIN 8528 [7] ausgeführt. Diese ist abhängig von folgenden Parametern:

- Eignung des Werkstoffs (chemisch, metallurgisch, physikalisch)
- Sicherheit der Konstruktion (Gestaltung und Beanspruchung)
- Möglichkeit der Fertigung (Vorbereitung, Ausführung, Nachbehandlung)

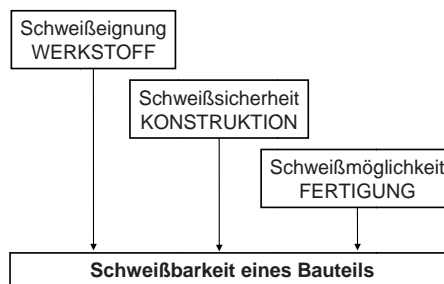


Abbildung 2.1: Abhängigkeit der Schweißbarkeit von der Schweißeignung, der Schweißsicherheit und der Schweißmöglichkeit.

Der gedanklich unscharfe und teilweise nicht genau definierte Begriff der Schweißbarkeit wird durch die leichter überschaubaren Teileigenschaften (siehe Abbildung 2.1) beschrieben. In den folgenden Abschnitten wird ausschließlich auf die Schweißeignung – also die Voraussetzung für prozesssicheres Laserschweißen – eingegangen.

Die Schweißbarkeit eines Bauteils aus metallischem Werkstoff ist gegeben, wenn der Stoffschluss durch Schweißen mit einem Schweißverfahren bei Beachtung eines geeigneten Fertigungsablaufes erreicht werden kann. Dabei müssen die Schweißungen hinsichtlich ihrer örtlichen Eigenschaften und ihres Einflusses auf die Konstruktion, deren Teil sie sind, die gestellten Anforderungen in Qualität und Festigkeit erfüllen [8], [9].

Schwierigkeiten bei der Einführung des Laserstrahlschweißens von Stahl in die industrielle Fertigung stellen die häufig auftretenden Schweißnahtunregelmäßigkeiten dar, welche die statische, vor allem aber die dynamische Festigkeit der Schweißnähte erheblich herabsetzen (siehe Kapitel 5.1 Nahtunregelmäßigkeiten und Schweißfehler). Derartige Nahtunregelmäßigkeiten reduzieren zusätzlich die Korrosionseigenschaften in Folge scharfer Kanten oder Spritzeranhaftungen an den und um die Schweißnähte. Weiterhin können wasserdichte Nähte nicht mehr gewährleistet werden.

Die Schwingfestigkeit von verschiedenen höherfesten Stählen wurde in [10] untersucht. Es wurde festgestellt, dass bei Zugschwellbeanspruchung der Probe das Material eine untergeordnete Rolle spielt. Vielmehr scheint die geometrische Ausbildung der Naht einen Einfluss auf die Dauerfestigkeit zu haben. Werden die zwischen Schweißnaht und Grundwerkstoff entstehenden Randkerben durch Schleifen bzw. Kugelstrahlen der Naht vermindert, kann die Dauerfestigkeit deutlich verbessert werden [11].

Kohlenstoffgehalt und Kohlenstoffäquivalent

Beim Schmelzschweißen von Stahl ist zu beachten, dass nur bei einfachen Stählen mit einem Kohlenstoffgehalt bis 0,25% C ohne weiteres dauerhafte Schweißverbindungen zu Stande kommen. Mit weiter steigendem Kohlenstoffgehalt nimmt die Schweißbeugung von Stählen ab. Bei hochfesten und legierten Stählen sind, um Rissbildung und Brüchen vorzubeugen, eventuelle Zusatzmaßnahmen erforderlich, wie z. B. Vorwärmen, langsames Abkühlen oder Anlassen.

Die Schweißbeugung von Werkstoffen wird im Allgemeinen durch die Legierungszusammensetzung, sowie deren Behandlungszustand bestimmt. Die Legierungsbestandteile (chemische Zusammensetzung) haben einen wesentlichen Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften, die Härbarkeit, die Kalt- oder Heißrissneigung, die Gefügeausbildung, sowie auf das Schmelzbadverhalten. Legierungsbestandteile verschlechtern im Allgemeinen die Schweißbeugung.

Bei niedrig legierten Stählen wird die Schweißbarkeit durch das Kohlenstoffäquivalent $C_{\bar{A}}$ ausgedrückt und stellt eine Vergleichsgröße, die über die Schweißbeugung Auskunft gibt, dar.

$$C_{\bar{A}} = C + \frac{Mn + Si}{6} + \frac{Ni + Cr + Cu}{15} + 2 \cdot P + 4 \cdot S \quad (2.1)$$

Für das Laserschweißen sind vor allem die thermophysikalischen Eigenschaften von großer Bedeutung. Die Wärmeleitfähigkeit λ_{th} spielt dabei eine wichtige Rolle.

Die Eigenschaften der Wärmeeinflusszone von Schmelzschweißverbindungen werden im Wesentlichen von Schweißparameter, Bauteilabmessung, Geometrie der Nahtform und der chemischen Zusammensetzung des Grundwerkstoffes bestimmt. Sowohl die Wärmeeinflusszone als auch das Schweißgut sollten idealerweise weitgehend die mechanisch-technologischen Eigenschaften des Grundwerkstoffes haben.

Der Einsatz von hochlegierten, bedingt laserschweißbaren Stählen und höchstfesten Stählen mit Kohlenstoffgehalten über 0,25% finden in der Automobilindustrie mehr und mehr Einzug.

2.2 Korrosionsschutzschichten

Die Entwicklung verzinkter Stahlbleche war ein erster Beitrag der Stahlindustrie zur deutlichen Verbesserung des Korrosionsschutzes und zum Automobil-Leichtbau. So wurde es möglich – in den letzten Jahren auch in Verbindung mit höherfesten Feinblechsorten – die Blechdicken, z.B. im Außenhautbereich, auf durchschnittlich etwa 0,8 mm zu reduzieren. Gleichzeitig konnten die Garantiezeiten gegen Durchrosten beträchtlich verlängert werden. Je nach Korrosionsschutzkonzept der Fahrzeughersteller reicht die Verwendung von verzinktem Stahlfeinblech für einzelne durch Korrosion besonders stark belastete Komponenten bis hin zur voll verzinkten Karosserie. Bei neuen Modellen beträgt der durchschnittliche Anteil dieser Bleche heute über 70% [12].

Unter Korrosion versteht man den von der Oberfläche ausgehenden Abtrag eines Metalls in Folge elektrochemischer Reaktion mit Partnern aus der Umgebung. Dabei gehen Metallatome aus dem metallischen in den nichtmetallischen Zustand über. Man spricht hierbei von einer Oxidation (Weißrost). Das Zink oxidiert unter Bildung von Hydroxiden und Karbonaten. Dadurch verringert sich mit der Zeit die zum Schutz vor Korrosion aufgebrauchte Zinkschichtdicke. Grundsätzlich besteht für die Wirksamkeit

des Korrosionsschutzes kein Unterschied, ob Bauteile elektrolytisch oder durch Tauchen im Schmelzfluss verzinkt werden.

Maßgebend für die Lebensdauer ist die Dicke der aufgetragenen Schicht. Der Korrosionsschutz von Stahl kann auf zwei Arten wirksam werden [13]:

- An offener Atmosphäre bilden sich an der Zinkoberfläche Hydroxide und Karbonate, die eine Schutzschicht bilden und somit Korrosion verhindern.
- An Stellen lokaler Zerstörung der Zinkschicht bleibt der kathodische Fernschutz erhalten, soweit die Schädigungen eine bestimmte Größe nicht überschreiten.

Generell gibt es zwei Korrosionsarten, zwischen denen im Automobilbau hauptsächlich unterschieden wird:

- Kosmetische Korrosion
- Durchrosten

Kosmetische Korrosion wird durch Beschädigungen der Lackschicht wie Kratzer oder Steinschlag verursacht. Dies führt zur Unterwanderung der Lackschicht an den Defekten sowie zur Korrosion und Verfärbung durch Korrosionsprodukte. Diese Art der Schädigung ist durch Verzinkung der Karosserie seit den 80er Jahren im Prinzip gestoppt. Der Schutzmechanismus besteht dabei durch den kathodischen Korrosionsschutz.

Im Gegensatz dazu setzt das Durchrosten in Hohlräumen, Flanschen oder Falzen an der Innenseite der Karosserie ein und dringt nach außen vor. Gegen diese Art der Korrosion schützt die Verzinkung der Bleche nicht. Erst durch den Synergieeffekt einer zusätzlichen organischen Beschichtung kann eine deutliche Verbesserung erreicht werden [14].

Beschichtungen lassen sich grundsätzlich in zwei Gruppen unterteilen – metallische und organische Beschichtungen.

Metallische Beschichtungen

Zu den metallischen Beschichtungen gehört die elektrolytische Verzinkung, die Feuerverzinkung und die Beschichtung Galvanealed (in den USA häufig verwendet), die sowohl elektrolytisch als auch im Schmelztauchverfahren erzeugt werden kann und sich durch einen etwas geringeren Zinkanteil unterscheidet. Um die elektrolytische

Beschichtung aufzutragen, wird das Metall gereinigt, gebeizt und anschließend in einer großen Stahlband-Behandlungsanlage als Kathode in eine elektrisch leitende Flüssigkeit getaucht. Der Anteil an Zink beträgt bei der elektrolytischen Verzinkung etwa 99% und bei Galvanealed 89 – 92%. Die Schichtdicke beträgt 7 – 10 μm .

Die Feuerverzinkung wird mittels des Schmelztauchverfahrens aufgetragen. Das gebeizte und mit Flussmittel benetzte Metall wird in das flüssige Zink getaucht. An den Phasengrenzen entstehen Legierungsschichten zur Gewährleistung der Haftung der Deckschicht auf dem Metall. So können deutlich größere Schichtdicken erreicht werden als beim Galvanisieren [15] möglich wären. Bei dieser Methode muss das Stahlband nachgewalzt werden, um die notwendigen technologischen Eigenschaften für die Verformung sowie eine ausreichende Oberflächenqualität zu erreichen [16].

Organische Beschichtungen

Um den Korrosionsschutz weiter zu verbessern, wurden organische Beschichtungen entwickelt. Organische Beschichtungen werden auch als Gleitprimer bzw. als Dünnschichtversiegelung bezeichnet. Sie bestehen aus Bindemitteln, leitfähigen Korrosionsschutzpartikeln, Gleitadditiven und Lösungsmitteln. Sie werden auf galvanisierte und speziell vorbehandelte Substrate aufgebracht, die größtenteils noch chromatisiert sind. Unterscheiden lassen sich diese Beschichtungen in die Sorten Bonazink und Granocoat sowie in die erste und zweite Generation der jeweiligen Beschichtungsart. Die Unterschiede zwischen der ersten und zweiten Generation liegen in modifizierten Bindemittelgemischen, stärkeren Schichtdicken und dem Wegfall der giftigen Chrom-(VI)-Verbindungen. Zu den Überzügen der ersten Generation gehören Bonazink® 3000 und Granocoat® ZE, diese sind sich in der Zusammensetzung und den Eigenschaften sehr ähnlich. Als Bindemittel fungiert bei beiden Epoxydharz, in welchem Zinkpartikel eingebettet sind. Bei einer Einbrenntemperatur von 250 °C beträgt die Schichtdicke ungefähr 2,5 – 4 μm . Der Korrosionsschutz steigt gegenüber einem elektrolytisch verzinkten Stahlblech mit einer Zinkschichtdicke von 7,5 μm um das 3- bis 4-fache. Bei Verwendung einer organischen Beschichtung der zweiten Generation steigt der Korrosionsschutz gegenüber elektrolytisch verzinkten Blechen um das 6- bis 8-fache. Eine tabellarische Zusammenfassung des Gesagten findet sich in Abbildung 2.2.

Ein weiterer Vorteil, der sich durch die Verwendung organischer Beschichtungen ergibt, ist die Möglichkeit einer Wandstärkenreduktion der Karosserie aufgrund des höheren Korrosionswiderstandes. Die sich ergebenden Festigkeitseinbußen können durch Verwendung von höherfesten Stählen ausgeglichen werden [17], [18].

	Organische Beschichtung	Korrosionsschutz*	Schichtdicke / μm	Einbrenntemperatur	Vorbehandlung	Hersteller	Leitfähige Pigmente
1. Gen.	Bonazinc 3000	10 Wochen	2,5 - 4	250 °C	Chromhaltig	Fa. PPG	Zink
	Granocoat ZE	10 Wochen	2,5 - 4	250 °C	Chromfrei möglich	Fa. Henkel	Zink
2. Gen.	GardoProtect 9491	20 Wochen	4,5 - 6	mind. 200 °C	Chromfrei	Fa. Chrometall/ Fa. André	Eisenphosphid & Zink
	GranocoatPlus	20 Wochen	4 - 5	mind. 200 °C	Chromfrei	Fa. Henkel	Zink

* Korrosionswechseltest nach VDA

** Wegen Schwierigkeiten beim Tiefziehen nicht mehr gültig!

Abbildung 2.2: Übersicht organischer Beschichtungen verschiedener Generationen [Quelle: Daimler].

2.3 Ausgangsproblematik

Nicht unkritisch beim Laserstrahlschweißen korrosionsgeschützter Bleche ist die im Vergleich zum Stahl deutlich geringere Schmelz- und Siedetemperatur der Beschichtung. Zink hat einen Schmelzpunkt von $T_S = 420^\circ\text{C}$ und einen Siedepunkt von $T_V = 906^\circ\text{C}$. Stahl hingegen hat einen Schmelzpunkt von $T_S = 1536^\circ\text{C}$. Trägt man in Abbildung 2.3 die vier Isothermen für die Schmelz- und Siedepunkte von Zink und Stahl ein, erhält man geometrisch einen Bereich in der Fügeebene, in welchem Zink bereits verdampft und Stahl gerade schmilzt. Während des Schweißprozesses kommt es daher zu einer Verdampfung der Zinkschicht "im Vorlauf" und in Folge dessen zu einer Volumenvergrößerung und lokalen Erhöhung des Druckes vor der Kapillare.

Nur geringfügigen Einfluss auf die Schweißnahtqualität hat die Zinkschicht auf der oberen und unteren Seite der Blechpaarung, da hier der Zinkdampf ungehindert über die jeweiligen freien Oberflächen verdampfen kann. Die Beschichtungen in der Fügeebene führen jedoch beim Verdampfen zu erheblichen Qualitätseinbußen. Falls sich zwischen den Fügepartnern kein Spalt befindet, in den dieser Dampf entweichen kann, dringt er durch die Schmelze explosionsartig hindurch und wirft geschmolzenes Material aus der Schweißnaht (Abbildung 2.3).

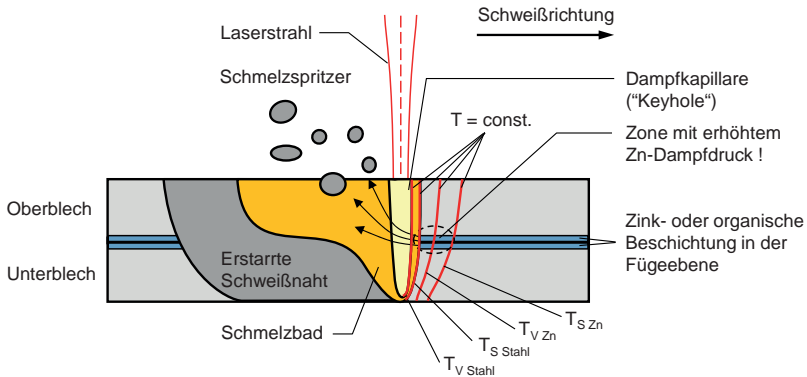


Abbildung 2.3: Grundproblematik der Entgasung beim Laserstrahlschweißen zinkbeschichteter Stahlbleche im Überlapstoß. Bei Nullspaltschweißungen entweicht der Zinkdampf über die Schmelze – Auswürfe sind die Folge.

Da die Zeit bis zum Verschluss der Kapillaröffnung nicht für einen vollständigen Austritt des Zinkdampfes ausreicht, entstehen in der erstarrenden Schmelze zusätzlich zu den Löchern auch Poren. In Bereichen der Wärmeeinflusszone, die durch Wärmeleitung erst verzögert die Verdampfungstemperatur des Zinks erreicht, kann auch nach Verschluss der Kapillaröffnung noch Zinkdampf entstehen.

Befindet sich zwischen den Blechen ein Spalt, dann kann dieser Dampf entweichen ohne die Schweißnahtqualität negativ zu beeinträchtigen. Die Praxis hat gezeigt, dass ein Spalt von 50 μm bereits ausreichen kann, um eine Zinkentgasung zu gewährleisten. Im Wesentlichen hängt das notwendige Spaltmaß für eine qualitativ gute Naht von der Blechdicke, der Blechsorte, der Beschichtungstärke und der Beschichtungsart ab. Laserleistung und Fokusbereich spielen auf Grund des Wärmeeintrages ebenfalls eine Rolle. In [19] werden Prozessdynamik und Schmelzbadverhalten beim Laserstrahlschweißen mit Spalt ebenfalls untersucht.

Um diesen Spalt zu realisieren, gibt es eine Vielzahl an Möglichkeiten. So kann eine Fügeebene des Bleches mechanisch aufgeraut werden und gewährleistet durch die feinen Spuren eine Entgasung. Durch konstruktive Maßnahmen können die Bleche so in Form gebracht werden, dass beim Spannen ein Spalt zwischen den Fügepartnern entsteht oder durch eine spezielle Spanntechnik selbst ein Abstand zwischen den Blechen erzwungen wird. Konkrete derartige Ansätze und Anwendungen zum Schweißen verzinkter Stahlbleche aus der Literatur werden in Kapitel 2.4 dargestellt.

In Abbildung 2.4 sind verschiedene Fügeanordnungen korrosionsgeschützter Bleche entsprechend ihrer Schweißbeignung dargestellt. Die Lage der Beschichtung an der Stoßfuge ist von wesentlicher Bedeutung für die Prozessstabilität.


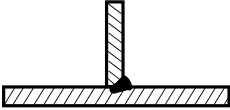

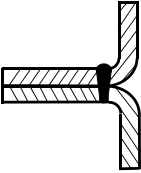


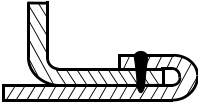

	I-Naht am Stumpfstoß	<div style="text-align: center;">+</div> <div style="text-align: center;">↓</div> <div style="text-align: center;">-</div>
	Kehlnaht am T-Stoß	
	Kehlnaht am Überlappstoß	
	I-Naht am Flanschanfang	
	Durchgeschweißte I-Naht am Überlappstoß	
	Eingeschweißte I-Naht am Überlappstoß	
	I-Naht am Falz	
	Bördelnaht am Flanschanfang	

Abbildung 2.4: Eignung verschiedener Nahtarten zum Laserstrahlschweißen bei Zinkbeschichtung [20]. Der von “+” nach “-” verlaufende Pfeil soll die zunehmende Schwierigkeit andeuten, qualitativ hochwertige Nähte zu realisieren.

Bei der I-Naht am Stumpfstoß befindet sich kein Überzug in der Fügeebene, so dass ein kritischer Wert an Zinkdampf, der die Schmelzbaddynamik negativ beeinflusst, nicht erreicht wird. Auf Grund der hohen Genauigkeitsanforderungen an die Spanntechnik wird diese Konfiguration aber kaum eingesetzt. Kehlnähte sind etwas kritischer zu fügen. Prozesstechnisch schwieriger beherrschbar sind Überlapp- oder Bördelnähte, bei denen eine starke Behinderung der Entgasung gegeben ist. Für 3D-Bauteilkonturen werden vorwiegend Kehl- und Überlappanordnung beim Laserstrahlschweißen verwendet, was eine exakte Spaltgestaltung erfordert [21].

2.4 Bekannte Lösungsansätze zum Laserstrahlschweißen beschichteter Bleche

Die Verfahrenstechnik zum Laserstrahlschweißen von verzinkten Blechen wird in der Literatur sowohl bei technischem Nullspalt, als auch der Schweißvariante mit einem Entgasungsspalt ausgiebig diskutiert. In [22] werden Varianten zum Schweißen verzinkter Bleche übersichtlich dargestellt (siehe Abbildung 2.5) und Versuche zu ausgewählten Varianten zum Schweißen mit Nullspalt gemacht.

Schematic	Technical details	Drawbacks
	The zinc vapor was degassed through the keyhole or the enlarged molten pool during welding	
	Zinc vapor was mitigated in the pulsed laser welding and effectively exhausted through a stable keyhole	Low processing speed or unstable weld qualities that limit the application in production
	Suppressed the formation of the laser induced zinc plasma or interacted of the zinc vapor with the shielding gas during welding	
	The zinc reacted chemically with the added metal before the steel started to melt	Difficulties will be implemented in production
	The generated zinc vapor vented out through the gap	
	The generated zinc vapor vented out through the gap	The additional prewelding procedure increases the production cost
	The generated zinc vapor vented out through the vent holes	
	The leading laser melted the zinc coating at the interface	Complex equipment that would be difficult to implement in the production environment.
	The leading laser cut the slot through which the zinc vapor was vented out	Moreover, a specific offset is needed between these two heat sources that could limit the application of this welding procedure
	The preheating increased the absorption of the laser beam that contributes to a formation of a stable keyhole through which the zinc vapor is evacuated	

Abbildung 2.5: Methoden zum Laserstrahlschweißen zinkbeschichteter Stahlbleche. [22]

So sind nach [22] bei geringen Laserleistungen und geringen Vorschubgeschwindigkeiten im Nullspalt akzeptable Schweißnähte zu erzielen. In einer weiteren Verfahrensvariante werden Versuche im Nullspalt gemacht, bei dem zunächst mit einer ersten Laserüberfahrt die Zinkschicht verdampft und mit einer zweiten Laserüberfahrt geschweißt wird.

Im Folgenden werden darüber hinaus gehende Methoden erläutert, die das Laserschweißen insbesondere am Überlappstoß von beschichteten Werkstoffen behandeln. Unterschieden wird dabei nach Art der Prozessführung, mit und ohne Entgasungsspalt. Eine Einschätzung zur Anwendbarkeit dieser teilweise nur in Grundlagen oder auf Laborbasis erarbeiteten Versuchen wird in Kapitel 2.4.4 gegeben.

2.4.1 Prozesstechnische Ansätze zum Schweißen mit Nullspalt

Abtragen der Beschichtung an den Schweißstellen

Mit dem Abtragen der Beschichtung vor dem eigentlichen Fügeprozess im Bereich der Naht ist eine gute Qualität beim Schweißen ohne einen Fügspalt zu erzeugen, da kein Zinkdampf durch die Lasernaht entweichen muss [23]. Einen Beschichtungsabtrag erreicht man beispielsweise durch einen hochenergetischen Laserstrahl, welcher auch den nachfolgenden Fügeprozess übernimmt [24]. Dieser zusätzliche kostenintensive Fertigungsschritt ist jedoch für industrielle Anwendungen innerhalb der Automobilindustrie nicht tragbar [25].

Durch einen defokussierten Laserstrahl, der vorlaufend – vor dem Schweißprozess – über das Werkstück geführt wird, kann das Zink erhitzt und verdrängt werden. Gleichzeitig ergibt sich durch die Schrumpfspannungen ein Fügspalt. Die Nahtoberflächenqualität ist hier nahezu spritzerfrei herstellbar. Der Einsatz von mehreren Laserstrahlquellen macht dieses kombinierte Verfahren allerdings unwirtschaftlich [21], [26].

Variation der Leistungsdichte und des Einstrahlwinkels

Der Einfluss der Leistungsdichte und -verteilung eines Gauß-ähnlichen Laserstrahls ohne zeitliche bzw. örtliche Variation ist ebenso Gegenstand einer bereits erwähnten Studie [25]. Zufriedenstellende Ergebnisse auf die Schweißbarkeit beschichteter Bleche konnten hier nicht nachgewiesen werden.

Durch Schweißen unter großen Einstrahlwinkeln wird versucht, ob die geringere Intensität in Folge des dann elliptischen Brennflecks im vorderen Bereich des Fokus

zur Verdrängung des Zinkdampfes aus der Fügezone ausreicht und somit eine Spritzer- und Porenbildung vermieden werden kann. Versuche zum Schweißen mit verschiedenen Einstrahlwinkeln bzw. die Verwendung elliptischer Foki sind in [27] und [28] zu finden. Beobachtet wird hier eine Stabilisierung des Prozesses, hervorgerufen durch eine Erweiterung der Dampfkapillare, welche ein Zusammenbrechen dieser in Folge Dampf- und Schmelzströmungen verhindert. Bei Einstrahlwinkel um 60° stechend kann die Anzahl der Spritzer etwas reduziert werden, eine akzeptable Nahtqualität wird aber nicht erreicht [21].

Gepulstes Schweißen

In einigen Artikeln wird das Nullspaltschweißen verzinkter Bleche mit gepulster Laserstrahlung beschrieben. Die jeweiligen Ergebnisse in Bezug auf die erreichbare Nahtqualität unterscheiden sich allerdings sehr.

In [29] können akzeptable Nahtqualitäten mit dieser Methode erreicht werden. Der Schweißprozess stellt sich aber als sehr empfindlich gegenüber Beschichtungstyp, Beschichtungsstärke, Blechdicke und Laserleistung dar, was ein sehr enges Prozessfenster zur Folge hat.

Unter Beobachtung der konkreten, mittleren Spitzenleistungsdichte können durch geeignetes Rechteckpulsen und mit entsprechenden Verfahrensgeschwindigkeiten innerhalb des Prozessfensters gute Nähte geschweißt werden [30]. Ziel beim gepulsten Schweißen verzinkter Bleche im Nullspalt ist es, die Zinkdampfmenge pro Puls so gering zu halten, dass ein Entgasen in Verbindung mit Auswürfen vermieden wird. Ein eventuell entstandener Zinkdampfeinschluss in Form einer Pore wird durch den darauf folgenden Laserpuls beseitigt. So kann nach mehreren Pulsen dieser Prozess in einen stabilen Zustand versetzt werden.

Unabhängig der Pulsgeometrien und der Vorschubgeschwindigkeiten können hingegen mit den verwendeten Materialien in [25] nur Schweißnähte mit vielen Defekten wie Spritzer und Poren hergestellt werden.

In einer Erfindung der DaimlerChrysler AG [31] werden nur sehr kurze Lasernähte geschweißt, um die Zinkdampfmenge so gering zu halten, dass es nicht zu Auswürfen innerhalb der Schweißnaht kommt. Damit soll die andernfalls mit zunehmender Schweißnahtlänge kritische Eruptionsgrenze (Zinkdampfmenge, die gerade noch keine Spritzer beim Schweißen verursacht) beim Schweißen von Überlappnähten nicht überschritten werden.

Schweißen mit Strahlbewegung

Durch Wendelbewegungen (Spinnings) soll die Dampfkapillare erweitert werden, um eine Aufweitung dieser zu erzielen. Dabei werden hauptsächlich Frequenz und Geometrie der Schweißmuster variiert. Die Untersuchungsergebnisse beziehen sich auf Stähle mit elektrolytischer Verzinkung und Stähle mit organischer Beschichtung. Spritzerfreie Nähte im Überlappstoß lassen sich nicht darstellen. Leichte Verbesserungen des Schweißergebnisses sind dennoch zu verzeichnen. Alle Variationsmöglichkeiten der Schweißmuster sind in der zitierten Ausarbeitung jedoch nicht vollständig ausgeschöpft worden [32].

Schweißen mit Multifokustechnik

Das Laserschweißen mit der Mehrstrahltechnik stellt, ähnlich wie bei Aluminium, auch bei verzinkten Blechen einen Ansatz zur Erzeugung fehlerfreier Nähte dar. Durch die Erweiterung und deshalb gegen Störungen unempfindlichere Kapillargeometrie, die ein gezieltes Ausströmen des Zinkdampfes gewährleistet, lassen sich spritzer- und porenfreie Nähte erzeugen. Aufgrund der Nahtgeometrie lässt sich sogar die Spaltüberbrückbarkeit etwas verbessern. An verzinkten Blechen mit einem Auflagengewicht von ca. 50 g/m² (entspricht einer Zinkschichtdicke von ca. 3,5 – 5 µm) durchgeführte Untersuchungen zeigen eine leichte Verbesserung der Nahtqualität mit einer glatten Oberraupe [33] und [34].

Für eine verbesserte Zinkentgasung schneidet ein vorlaufender, in der Intensität veränderbarer Brennfleck in [35] das Oberblech durch, der zweite Brennfleck schweißt die beiden Bleche im Überlappstoß zusammen.

Eine Vorreinigung der Blechoberfläche ist bei einem vorlaufenden Laserstrahl in [36] realisiert. Ähnlich zum beschriebenen Verfahren „Abtragen der Beschichtung“ wird hier eine Doppelfokusoptik eingesetzt. Die Reinigung der Blechoberfläche bewirkt eine Möglichkeit zur Steigerung der Schweißgeschwindigkeit in Folge

- erhöhter Absorption durch Anschmelzen der Blechoberfläche bereits durch den vorlaufenden Reinigungsstrahl,
- wegfallender Reflexion der Laserstrahlung an der Zinkschicht und
- höhere Leistungsdichte an der Schweißstelle durch Wegfall der Laserstrahlstreuung durch Zinkdämpfe.

In [37] und [38] werden umfangreiche Untersuchungen zum Nullspalt-Schweißen von beschichteten Stahlblechen durchgeführt. Das Versuchsprogramm beinhaltet die Variation von Beschichtungen, Blechdicke und Blechart sowie eine Reihe von Schweißparametern in Verbindung mit einer Doppelfokusoptik.

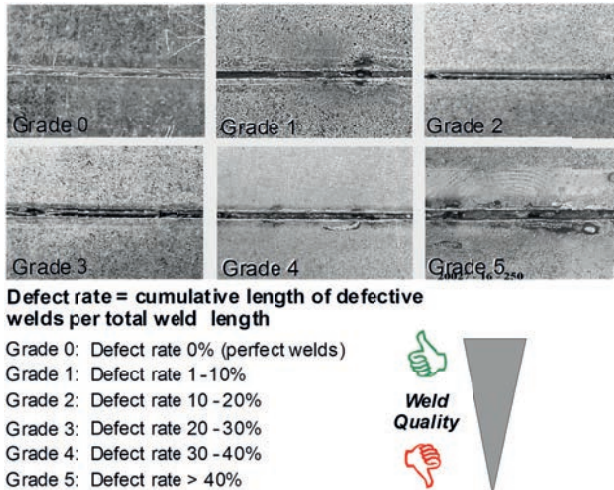


Abbildung 2.6: Klassifizierung der Schweißnahtqualität nach [37]: Dabei entspricht Grade 0 einer fehlerfreien Schweißnaht.

Zur Erzeugung des Doppelfokus kommt eine Bifokal-Optik zum Einsatz. Diese Studie belegt, dass die Nahtqualität mit der angewandten Doppelfokustechnik verbessert werden kann. Eine Klassifizierung der Nahtqualität, je nach Anteil und Anzahl der Defekte, ist in Abbildung 2.6 dargestellt. Es können mit diesem Verfahren bestenfalls Lasernähte mit „Grade 1 – 3“ realisiert werden, bei denen noch immer mehrere Auswürfe pro Schweißnaht vorkommen; fehlerfreie Schweißnähte („Grade 0“) sind nicht zu erreichen.

Der Schweißprozess reagiert zudem sehr empfindlich auf die Leistungsdichte und auf die Schweißgeschwindigkeit. Letztere muss erheblich reduziert werden, um eine akzeptable Naht zu erhalten. Exemplarisch wird in Abbildung 2.7 dargestellt, wie sich die Nahtqualität in Abhängigkeit der Schweißgeschwindigkeit ändert. Die verwendeten Bleche haben eine Dicke von 0,7 mm und sind feuerverzinkt. Weitere Aussagen der Untersuchungen sind, dass die Nahtqualität mit steigender Blechdicke abnimmt. Generell ist ein Ausgasen bei Durchschweißungen in das Unterblech nicht zu vermeiden und resultiert in schlechter Oberflächenbeschaffenheit.

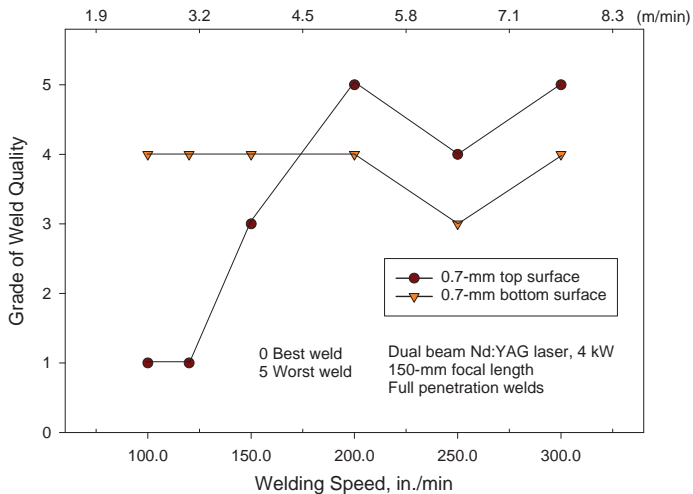


Abbildung 2.7: Laserschweißen von verzinkten Blechen im Nullspalt: Klassifizierung der Nahtqualität nach Definition der Abbildung 2.6 [37].

Auch in [39] sind diese Ergebnisse wieder zu finden. Für das Schweißen mit Spalt ist die Verfahrensvariante mit Doppelfokustechnik ebenfalls erwähnt. Dabei geht es hauptsächlich um die Steigerung der Schweißgeschwindigkeit. Insbesondere beim Schweißen von Aluminium kann die Doppelfokustechnik zur Verbesserung der Nahtqualität beitragen [40], [41], [42].

Kombinierte Verfahren und Hybridschweißen

Im Rahmen mehrerer Studien sind kombinierte Verfahren und Hybridversuche veröffentlicht, welche sich mit dem Laserstrahlschweißen von verzinkten Blechen im Nullspalt beschäftigen.

Bei kombinierten Verfahren kann ein vorlaufender Laserstrahl das Oberblech schneiden, während zeitgleich und nur wenige Millimeter hinter dem Schneidprozess ein weiterer Laserstrahl so geführt wird, dass dieser die beiden Bleche miteinander verbindet. Idealerweise soll durch das Schneiden des Oberbleches die in der Fügeebene vorhandene Zinkschicht abdampfen und beim Schweißen keine Auswürfe mehr verursachen. Schwierig stellt sich bei dieser Variante die erforderliche Füllung der vorangehenden Schneidfuge dar.

Unter Hybridverfahren wird im Allgemeinen die Kombination zweier oder mehrerer Verfahren an derselben Wirkungsstelle verstanden – also beispielsweise die Kombination zweier Laserstrahlen oder ein Laserstrahl kombiniert mit einem Lichtbogenverfahren.

Die Hybridvariante wird beispielsweise durch die Kombination eines Diodenlasers und eines YAG-Lasers bzw. durch eine zusätzliche Lichtbogenquelle erreicht. Die Position zueinander und die Intensität der Brennfleckgrößen sind dabei die Stellgrößen für derartige Versuche. Das Hybridverfahren mit Hilfe zweier Laser kommt dem Multifokusschweißen am nächsten, jedoch sind die Prozessparameter, auf Grund der beiden autarken Strahlquellen, vielfältiger. Die Foki können dabei in Superposition, neben- oder hintereinander geführt werden [43.]

Keines der oben genannten Verfahren führt erfolgreich zur Herstellung von fehlerfreien Schweißnähten bei aktuellen Korrosionsschutzschichten für die Automobilindustrie. Technische Nullspalte können auch hier nicht prozesssicher bei guter Nahtqualität realisiert werden.

Schweißen mit Zusatzwerkstoffen und Gasen

Um ein stabiles Ausgasen von Beschichtungsdämpfen aus der Schmelze zu gewährleisten, werden in einer Patentschrift der Fraunhofer Gesellschaft [44] Untersuchungen mit der Zuführung von Schutz- und Arbeitsgasen beschrieben. Sinn dieser Zuführung ist es, durch Vorbeiführung des Gases auf der laserzugewandten Seite und auf der laserabgewandten Seite mit dem damit erzeugten Unterdruck die Dämpfe kontrolliert aus der Schmelze herauszuführen. Dabei ist es unbedingt notwendig, dass eine an beiden Seiten der Blechverbindung offene Dampfkapillare vorhanden ist. Um ein stärkeres Ausgasen an der laserabgewandten Seite zu erreichen, strömt das Gas an der Unterseite schneller, wobei ein größerer Unterdruck als an der laserzugewandten Seite erzeugt wird. Der große Nachteil dieses Verfahrens besteht jedoch in der Untauglichkeit der Gaszuführung bei Schweißprozessen mit flexibler Strahlpositionierung durch Scannerspiegel beim Remote-Schweißen.

Der Einsatz von Schutz- und Prozessgas beim Schweißen von verzinkten Blechen soll den Zinkdampf abbinden und die Schmelze viskos halten, damit diese die entstandenen Poren schließen kann. Als Prozessgase sollen Sauerstoff und CO_2 das Zink abbinden. Als Schutzgase kommen Helium, Argon und CO_2 sowie deren Mischungen zum Einsatz, um die Schmelze zu schützen und dünnflüssiger zu halten. Problematisch ist dieses Verfahren bei Überlappnähten, da das Gas nicht in die Fügeebene eindringen

kann, um so mit dem Zinkdampf zu reagieren. Eine leichte Prozessstabilisierung ist lediglich bei Kehlnähten zu beobachten.

Durch schwere Gase wie Argon oder Kohlendioxid kann nach [45] auf mechanischem Wege eine leichte Aufweitung der Dampfkapillare mit der Folge einer reduzierten Porosität erreicht werden. Reaktive Gase wie CO_2 oder N_2 können die Eigenschaften der Schmelze und des Gefüges negativ beeinflussen. Gasströmungen unterhalb oder beidseitig des Schweißbereichs führen dabei auch den Zinkdampf ab, der zu einer verstärkten Plasmabildung führen kann und somit die Prozessstabilität beeinträchtigt.

Auch in [46] werden im Nullspalt unter Zugabe von verschiedenen Gasen Untersuchungen gemacht. Beobachtet wird hier eine Stabilisierung des Schweißprozess mit verzinkten Blechen durch die Verwendung von aktiven Zusatzgasen wie Sauerstoff und CO_2 bei gleichzeitiger Erhöhung der Einschweißtiefe.

Das Schweißen verzinkter Bleche im Nullspalt wird in der Literatur auch mit verschiedenen Zusatzwerkstoffen diskutiert. Im Jahr 2000 wurde in [47] zwischen die beiden verzinkten Bleche eine dünne Kupferfolie gelegt. Das verwendete Material ist 0,8 mm dick und mit einer feuerverzinkten Auflage von 70 g/m^2 beschichtet. Die Kupferfolie schmilzt bei 1083°C und geht mit dem Zinkdampf eine Legierung ein, was ein Ausgasen und die damit verbundenen Nahtunregelmäßigkeiten verhindert. Durchgehend gute Schweißergebnisse können auf Grund von Porosität auch innerhalb des Nahtquerschnittes und einzelnen Auswürfen jedoch nicht nachgewiesen werden. Eine Anwendung in einer Serienfertigung gibt es bisher nicht.

Die Verwendung eines chemischen Partners zur Bindung des Zinks ist ebenfalls der Ansatz in folgender Studie. Reagiert das Zink vor dem Verdampfen nahezu vollständig mit dem Zusatzwerkstoff, können porenfreie Schweißnähte hergestellt werden, da die Entgasung unterbunden wird und das Zink in der Schmelze gebunden wird. Als Bindemittel werden Materialien wie Nickelpulver [48], Metalldrähte [49] oder dünne chemische Schichten zwischen den Blechen eingesetzt [50].

2.4.2 Schweißen mit Spalt

Ein Fügespalt kann durch verschiedene konstruktive Maßnahmen wie Sicken und Keilspalte bzw. durch fertigungstechnische Maßnahmen wie beispielsweise Abstandshalter oder Rändelungen gewährleistet werden. Der Literatur zu Folge wird bei weit über 90% der Anwendungen, bei denen beschichtete Bleche im Einsatz sind, mit einem Entgasungsspalt gearbeitet. Anspruch auf Vollständigkeit wird daher im Fol-

genden nicht erhoben, es sollen lediglich einige praxisnahe Verfahren genannt werden, wie ein Fügespalt realisiert werden kann. Auf Maßnahmen, die zur Verbesserung der Nahtqualität führen, wird hingewiesen.

Spalterzeugung mit Hilfe konstruktiver Maßnahmen

In der Patentschrift [51] wird die Schaffung eines Entgasungsspaltcs durch konstruktive Maßnahmen, z.B. das Einbringen von Sicken, beschrieben. Diese werden vorzugsweise mit der Formgebung des Bauteils im Presswerk hergestellt. In einer weiteren Erfindung [52], [53] gewährleiste unterschiedliche Krümmungsradien im Verbindungsbereich ein problemloses Ausdampfen des Zinks in die durch das Sicken bzw. Einbringen von Radien geschaffenen Hohlräume (siehe Abbildung 2.8). Konstruktive Lösungen sind am jeweiligen Bauteil auf die Anwendbarkeit zu untersuchen. Nachteilig wirkt sich das Prägen als zusätzlicher Fertigungsschritt auf die Produktionskosten aus, daher ist das Schweißen in der Nähe von unterschiedlichen bauteil- und funktionsbedingten Krümmungsradien wesentlich kostengünstiger.

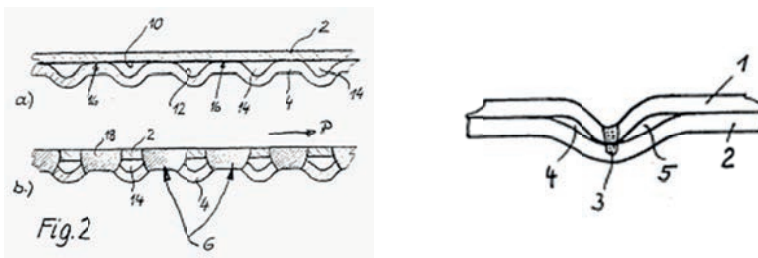


Abbildung 2.8: Patentauszug: Spalterzeugung durch Einbringen von Sicken (links) und unterschiedlichen Krümmungsradien (rechts), [51], [52]

Spalterzeugung durch Strukturierung der Fügezone

Ein weiteres Verfahren zum Erzeugen von Fügespalten sind Oberflächenstrukturen wie in [54] beschrieben. Bei diesem Verfahren werden rändelungsartig angeordnete Oberflächenstrukturen mittels getakteter Hochleistungsstrahlung hergestellt. Vor dem eigentlichen Schweißprozess werden, senkrecht zur Schweißrichtung, Mikrokanäle in die Oberfläche geschweißt. Um ein gleichmäßiges Ausgasen der Zinkdämpfe zu gewährleisten, müssen diese Kanäle in kurzen Abständen gesetzt werden, was aber den Nachteil einer größeren Beeinträchtigung der Schutzwirkung der Beschichtung mit sich bringt.

Analog dazu ist seit 1997 ein Verfahren aus den USA unter dem Begriff „Laser knurling“ bekannt. Auch hier werden mit dem Laser kleine Mikrokanäle für die Zinkentgasung auf einen der Fügepartner aufgebracht, sodass beim Schweißen eine Art Spalt verbleibt (Abbildung 2.9). Die Vertiefungen haben eine Länge von 5 – 8 mm und werden mit einzelnen Laserpulsen mit einer Energie von 15 – 25 J (pro Puls) in die Blechoberfläche eingebracht. Es können bei guter Nahtqualität mehrere Stähle, darunter auch hochfeste Materialien, und verschiedene Beschichtungen mit dieser Methode geschweißt werden. Materialdicken bewegen sich zwischen 0,7 mm und 1,96 mm, das Auflagegewicht der Beschichtung beträgt maximal 100 g/m^2 , was einer Zinkschichtdicke von etwa $7,5 \text{ }\mu\text{m}$ entspricht [55]. Eine weitere Methode wird in [56] derart beschrieben, dass vor dem Schweißprozess mit einem gepulsten Nd:YAG Laser Löcher in das Oberblech gebohrt werden, durch die der Zinkdampf während des anschließenden Schweißprozess entweichen kann.

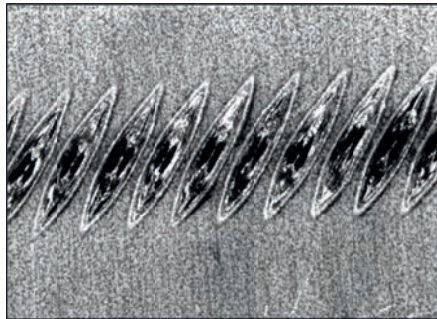


Abbildung 2.9: Gewährleistung der Entgasung bei zinkbeschichteten Blechen: Blechoberfläche mit „Knurling“ Muster [55].

Auch in [29] wird erläutert, dass mittels einer eingepressten Rinne im Oberblech, welche linienförmig auf dem Fügepartner aufliegt, hochwertige Schweißnähte zu realisieren sind. Die Lasernaht muss exakt entlang dieser Rinne gelegt werden, welche durch ein Nahtverfolgungssystem über die sichtbare Rinne im Oberblech geführt werden kann. Während die beiden Fügepartner durch Spannzangen fest miteinander verbunden sind, ist der Entlüftungsweg problemlos sichergestellt. Kritisch ist die Anfälligkeit gegen lateralen Versatz der Schweißnaht, da sonst eine ungenügende Anbindung erfolgen kann.

Bereits im Presswerk eingebrachte Prägesicken, die zur Spalterzeugung dienen, kommen in verschiedenen Serienanwendungen zum Einsatz [57], [58]. Die Höhe einer derartigen Sicke bewegt sich um 0,2 mm und hat einen Durchmesser zwischen 8 und

10 mm (siehe Abbildung 2.10). Als Spannelement beim Schweißen kommt ein an der Optik fixierter, mitschleifender Andrückfinger zum Einsatz, der die beiden Fügepartner zusammen drückt.

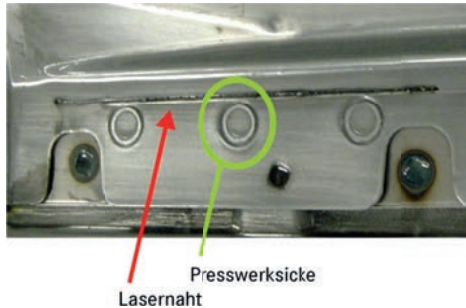


Abbildung 2.10: Prägesicken am Überlapp zur Spalteinhaltung beim Laserstrahlschweißen verzinkter Bleche [57].

Spaltgenerierung mit Hilfe der Spanntechnik

Die wichtigste Aufgabe der Spanntechnik beim Schweißen verzinkter Werkstoffe ist das Sicherstellen verfahrenstechnisch erforderlicher, optimaler Spaltverhältnisse zwischen den zu fügenden Blechen.

Bei geeigneten Bauteilen lässt sich ein Fügespalt auch über die Spanntechnik in Form einer Spreizrolle – auch Entgasungsrade genannt – realisieren. Auch hierzu sind einige Anwendungen der Literatur zu entnehmen.

In Abbildung 2.11 ist ein Laserbearbeitungskopf mit einer Entgasungsscheibe dargestellt. Die obere Rolle (oberer Spannkegel) ist als hohle Kegelrolle ausgeführt, durch die der Laserstrahl hindurchgeführt wird. Man erhält somit einen Druckpunkt, der sehr nahe an der zu schweißenden Stelle liegt. Dadurch ist ein exaktes Einhalten des Spaltmaßes zwischen den Blechen gewährleistet. In die offene Flanschseite taucht die Entgasungsscheibe ein und sorgt zwischen Ober- und Unterblech für ein konstantes Spaltmaß von etwa 0,1 mm für die Zinkentgasung. Diese Art der Spanntechnik wird beispielsweise bei VW im Rohbau des Golf V eingesetzt [59], [60]. Sie kann nur bei zugänglichen Überlappverbindungen und deshalb nur für Bauteile verwendet werden, welche ausschließlich flanschnah zu schweißen sind.

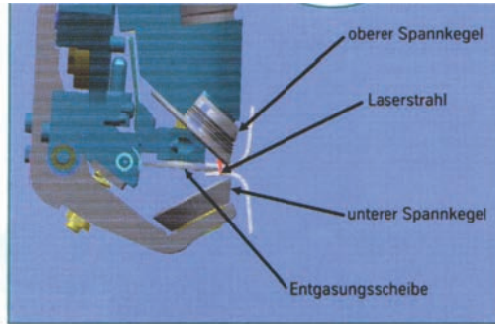


Abbildung 2.11: Bearbeitungskopf mit doppeltem Spannkegel und Entgasungsscheibe, einsetzbar an offenen Flanschverbindungen [59].

Auch bei Audi ist ein System im Einsatz, welches mit Hilfe eines mitlaufenden Spann-fingers die Bleche lokal distanziert, um so eine Zinkentgasung zu gewährleisten. Die Abbildung 2.12 zeigt diesen Bearbeitungskopf mit einer geraden Standardlaser-schweißoptik [61].

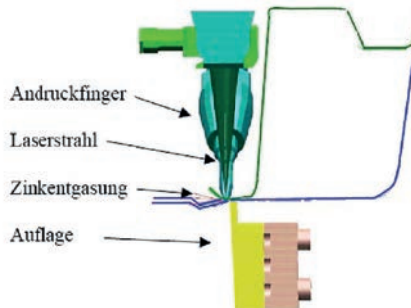


Abbildung 2.12: Laserschweißkopf mit integriertem Spannfinger im Serieneinsatz beim Audi A3 [Quelle: Audi].

Eine Weiterentwicklung der Laserbearbeitungsköpfe mit integrierter Spanntechnik ist die von Scansonic entwickelte FSO (Flanschschweißoptik). Hierbei kommen zusätzlich eine Naherkennung und ein Kleinraumscanner zum Einsatz. Daher ist es möglich, mit dieser Schweißoptik auch stirnseitig zu schweißen und gleichzeitig die zu verbindenden Flansche der Bauteile zu spannen [62].

Auf weitere Literaturstellen, welche sich mit dem Thema Spalterzeugung beschäftigen, wird verzichtet, da es sich um Wiederholungen der in diesem Abschnitt beschriebenen Methoden handelt. Von Interesse für die vorliegende Arbeit wären hier die Maßnahmen zur Qualitätsverbesserung derart geschweißter Nähte. Zu den Themen, wie die Verbesserung der Spaltüberbrückbarkeit bei guter Nahtqualität oder Nahtbehandlungen zur Qualitätssteigerung, konnte kein entsprechender Literaturhinweis gefunden werden. Es ist lediglich ein Hinweis auf eine abnehmende Leistungsrampe am Nahtende zu finden, welche die Kerbschärfe des Endkraters verringert [63].

2.4.3 Laserschweißbare Beschichtungen

Zinkhaltige Korrosionsschutzschichten sind, wie in Kapitel 2.3 beschrieben, für das Laserstrahlschweißen nur mit Zusatzmaßnahmen, wie beispielsweise die Einhaltung eines Entgasungsspalt, einsetzbar. Sind die Bleche zusätzlich zur Verzinkung noch mit einer organischen Beschichtung versehen, ergibt sich eine weitere Verschlechterung der Laserschweißung. Im Zuge des steigenden Anteils der Lasertechnologie in der industriellen Fertigung sind vor allem Stahlhersteller an einer Weiterentwicklung geeigneter Korrosionsschutzschichten mit verbesserter Laserschweißbarkeit interessiert. In [64] werden die Potenziale einer neuen Schicht auf Basis Zink-Magnesium dargestellt. Grundsätzlich wird unterschieden zwischen zwei verschiedenen Beschichtungsdicken: ZE-Mg 35/35 und ZE-Mg 75/75. Die Werte beziehen sich jeweils auf die Schichtdicke (35 entspricht $3,5\text{ }\mu\text{m}$, 75 entspricht $7,5\text{ }\mu\text{m}$). In Folge der Verringerung der Schichtdicke kann ZE-Mg 35/35 auch mit technischem Nullspalt geschweißt werden, ohne dass die Naht Poren oder Schweißspritzer aufweist. Auch der Magnesiumanteil hat keine nennenswerten negativen Auswirkungen auf das Schweißergebnis. Weitere Vorteile dieser Beschichtung sind niedrigere Herstellungskosten gegenüber den Eigenschaften vergleichbarer Schutzschichten sowie einer vergleichbaren Korrosionsperformance im Vergleich zu herkömmlich verzinktem Feinblech. Die Markteinführung einer derartigen Beschichtung für die Automobilindustrie, nach erfolgreicher Erprobung des Fertigstellungsprozesses wäre möglich.

Auch in [65] werden korrosionsbeständige Schichten auf Basis Zink-Magnesium beschrieben, welche sich spaltfrei bei guter Nahtqualität schweißen lassen. Es werden ebenfalls unterschiedliche Beschichtungsdicken angesprochen, wobei die prozesssichere Nullspaltschweißbarkeit auch hier nur bis zu Schichtdicken von $3\text{--}4\text{ }\mu\text{m}$ gewährleistet ist.

In der Literatur findet man unterschiedliche Artikel, in denen eine Weiter- bzw. Neuentwicklung von Beschichtungen diskutiert wird. Eine vergleichbare Schutzwirkung und eine deutlich bessere Laserschweißbarkeit im Nullspalt kann allerdings nicht erreicht werden. Die einzige Ausnahme stellt eine neue Beschichtung auf Basis Zink-Magnesium, wie im vorher gehenden Abschnitt erörtert, dar.

2.4.4 Einschätzungen von Lösungsansätzen

Schweißen im Nullspalt

Das Abtragen der Zinkbeschichtung in der Fügeebene kann durch exaktes Einstellen des Parameters eines Lasers realisiert werden, dass in einem vorlaufenden Prozess in das Oberblech blind eingeschweißt wird, um mit Hilfe der Wärmeleitung die Zinkschichten in der Fügeebene verdampfen zu können. Dabei ist ein permanenter Nullspalt zwingend notwendig, um konstante Wärmeleitungsbedingungen zum Erreichen der Verdampfungstemperatur des Zinks an der Blechunterseite zu erhalten. Eine zu starke Einschweißung des vorlaufenden Laserstrahls würde unmittelbar zu Auswürfen führen. Eine Serienanwendung ist mit diesem Verfahren daher nicht realisierbar, da eine Verdampfung der Zinkbeschichtung an komplexen Bauteilen nicht prozesssicher darstellbar ist.

Ähnlich empfindlich und als instabile Prozessführung gelten das Schweißen unter hohem Einstrahlwinkel und das gepulste Schweißen. Selbst in den zitierten Literaturstellen werden bereits Anmerkungen zu Prozessschwankungen gemacht.

Das Schweißen mit der Doppelfokustechnik wird in einigen Quellen als potenzielles Verfahren zum Nullspaltschweißen erklärt. Versuche an Blechen mit aktuellen Beschichtungen (z.B. Feuerzink oder Bonazink) haben gezeigt, dass es auch hier deutliche Prozessinstabilitäten gibt. Vergleichbar mit der Doppelfokustechnik in Bezug auf die Nahtqualität ist die Verfahrensvariante mit hybrider Prozessführung. Auch hier lassen sich oben genannte Beschichtungen nicht fehlerfrei schweißen und sind gekennzeichnet von deutlichen Schweißauswürfen.

Das Schweißen unter Verwendung eines Zusatzmaterials, wie beispielsweise in Form von Kupferfolien in der Fügeebene oder durch Zugeben von Zusatzgasen, lässt sehr viele Freiheitsgrade offen. Eine konkrete Aussage und Beurteilung der Nahtqualität ist daher sehr schwierig. Durch einen erheblichen Mehraufwand von Hardware, teuren Zusatzmaterialien und zusätzlichen Bearbeitungsvorgängen sind auch diese Varianten innerhalb einer Serienproduktion untauglich.

Laserschweißbare Beschichtungen

Aus heutiger Sicht können laserschweißbare Beschichtungen nur dann im Nullspalt geschweißt werden, wenn die Zinkschichtdicke und damit das verdampfende Volumen deutlich reduziert wird. Der Korrosionsschutz muss dabei dennoch in gleichem Maße erhalten bleiben. Ein Ansatz hierfür bietet die in Kapitel 2.4.3 beschriebene ZE-Mg Beschichtung mit Schichtdicken um 3 – 4 μm . Das Laserschweißen von I-Nähten am Überlappstoß mit technischem Nullspalt gestaltet sich mit Ausnahme an Blechen mit der dünnen 3,5 μm Zn-Mg Beschichtung auch hier nicht als garantiert fehlerfreier Prozess.

Schweißen mit Spalt

Das Fertigen von Sicken neben der Schweißnaht bzw. das Aufbringen von Rändelungen bereitet bei dreidimensionalen Nahtverläufen unter Umständen Herstellungsprobleme. Der Schweißprozess kann in Bezug auf die zwingend notwendige Genauigkeit der Strahlpositionierung problembehaftet sein. Eine Spaltgenerierung, welche mit Hilfe einer speziellen Spanntechnik erreicht wird, kann nur an Bauteilen mit offenen, nicht zu sehr gekrümmten Flanschen eingesetzt werden.

Prozesstechnisch ist das Laserschweißen beschichteter Karosseriebleche mit Spalt die beste Methode für einen Einsatz in der Serienproduktion, da ohne einen Fügespalt kaum akzeptable und reproduzierbare Schweißnähte mit beschichteten Blechen am Überlappstoß gefügt werden können. Die Herausforderung beim Schweißen mit Spalt ist die Einhaltung der notwendigen Toleranz dieser Spaltmaße, welche sich im Idealfall zwischen 0,1 und 0,2 mm bewegen müssen.

Resümee

In den in diesem Kapitel genannten Literaturstellen zum Schweißen verzinkter Bleche sind eine Reihe verschiedener Ansätze beschrieben. So sind zweifelsohne unter Laborbedingungen bei manchen Verfahrensvarianten fehlerfreie Schweißnähte im Nullspalt zu erzielen. Faktoren wie Leistungsschwankung, Änderung des Einstrahlwinkels, Fokusslageänderung und Schichtdickenschwankung beeinflussen die Prozessstabilität enorm. Daher haben die Studien, welche sich mit dem Schweißen moderner verzinkter Stähle mit der Nullspaltmethode beschäftigen, eher Grundlagencharakter, da oben genannte Schwankungen in einer Serienproduktion nicht auszuschließen sind und damit fehlerfreie Schweißnähte nicht realisiert werden können.

Wie bereits erwähnt, stellt der Schweißprozess mit Entgasungsspalt die beste Möglichkeit zum Schweißen verzinkter Bleche im Überlappstoß dar. Dabei ist das Erreichen eines Idealspalt die größte Herausforderung. Im Sinne einer Vergrößerung des Prozessfensters kann dabei eine laserschweißbare Beschichtung, wie beispielsweise auf ZN-Mg Basis, eingesetzt werden, um den minimalen Fügspalt zu reduzieren. So ist eine Spaltschwankung während des Schweißens auch bis zu einem Minimalspalt von 0,03 mm tolerierbar ohne dass eine Zinkentgasung über die Schmelze stattfindet.

2.5 Remote-Laserstrahlschweißen

Verfahrensbeschreibung

Remote-Laserschweißen ist ein sehr effizientes Strahlschweißverfahren, bei dem der Laserstrahl durch Scanner-Optiken mit hoher Geschwindigkeit positioniert und über dem zu bearbeitenden Bauteil bewegt wird. Der Strahl wird mit möglichst langen Brennweiten fokussiert und dabei mit schnell beweglichen Spiegeln an die zu schweißende Stelle des Werkstücks herangeführt. Bedingung für eine große Brennweite von rund 500 mm und einem typischen Strahldurchmesser zum Schweißen von Stahl oder Aluminium von rund 600 μm ist eine entsprechend gute Strahlqualität der Laserquelle. Der zulässige Arbeitsabstand vom Werkstück sowie die auch davon abhängige Größe des Scanner-Bearbeitungsfeldes stehen in direktem Zusammenhang mit der Strahlqualität. Eine bessere Strahlqualität eröffnet zwei verschiedene Auswahlmöglichkeiten. Entweder sie lässt einen größeren Arbeitsabstand mit derselben Strahlaufweitung und demselben Strahlfokusbereich zu, oder sie erlaubt eine Steigerung der Schweißgeschwindigkeit bei Verkleinerung des Strahlfokusbereichs. Mit letzterem können kleinere Spiegeloptiken und damit kleinere Scanner verwendet werden. Größere Arbeitsabstände sind gegenüber einer Schutzglasverschmutzung und einer möglichen Kollision mit Störkonturen, wie Spannelementen, von Vorteil. Eine Kombination aus Steigerung der Schweißgeschwindigkeit und Vergrößerung des Arbeitsabstandes ist ebenfalls möglich. Abbildung 2.13 verdeutlicht die Zusammenhänge zwischen Arbeitsabstand, verschiedenen Fokusbereichen, Fokusbereichstoleranzbereiche und Schutzglaslebensdauer etc. [66], [67], [68] die bei der Auswahl eines Remote-Laserschweißsystems von hoher Bedeutung sind.

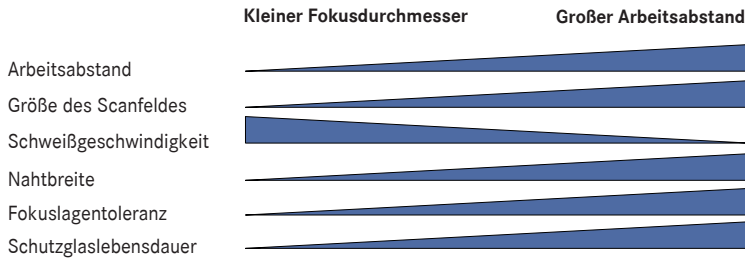


Abbildung 2.13: Zusammenhänge zwischen minimalem Fokusbereich und maximalem Arbeitsabstand bei gegebener Strahlqualität [69].

Potenziale und Vorteile

Die nahezu auf null reduzierten Positionierzeiten zwischen den Schweißpunkten ist eine Verkürzung der Schweißdauer und damit eine Effizienzsteigerung in der Fertigungskette zu erreichen. Die Folge ist eine höhere Auslastung des anschaffungstechnisch kostenintensiven Laseraggregates. Untersuchungen von Marktforschungsinstituten haben ergeben, dass sich mittels des Remote-Schweißens Investitionskosten um bis zu 30% und Taktzeiten um bis zu 60% senken lassen [70].

Jedes Schweißnahtmuster ist an einem zentralen Steuerrechner frei programmierbar, sodass der Laserstrahl für jeden Bereich eines Bauteils die bestmögliche Schweißnaht anbringen kann. Es können je nach Beanspruchung des Bauteils belastungsangepasste Nahtmuster in unterschiedlichen Geometrien realisiert werden. Die Abbildung 2.14 zeigt eine Auswahl dieser Möglichkeiten. Nähte, welche im Sichtbereich liegen, erfordern eine möglichst glatte Nahtoberfläche, was durch örtliche Nachbehandlung durch schnelle Strahlbewegung mit dem Laser zu erreichen ist.

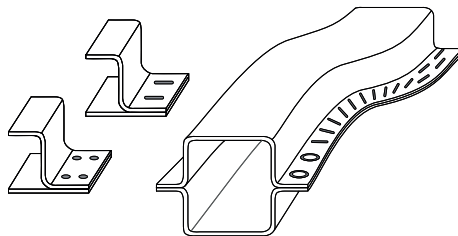


Abbildung 2.14: Mehr Flexibilität bei der Konstruktion mit belastungs- und geometrieangepassten Nahtmustern.

So lassen sich beispielsweise Verbindungsflansche verkleinern und damit auch Karosserien in Richtung Leichtbau weiterentwickeln. Eventuelle Änderungen im Schweißplan lassen sich vergleichsweise einfach über Software umprogrammieren, ohne aufwändige Anpassung der Hardware.

Remote-Schweißen mit CO₂-Laser

Bei CO₂-Laseranlagen handelt es sich meist um so genannte Portalanlagen mit stationärer Bearbeitungsoptik, die den Laserstrahl über Spiegel in einem ca. 1200 x 1200 x 500 mm³ großen Arbeitsraum beliebig positioniert (Abbildung 2.15). Vorteile dieses Systems sind die sehr geringen Positionierzeiten des Strahls innerhalb des gesamten Arbeitsvolumens und der große Arbeitsabstand bis über einem Meter [71]. CO₂-Laser haben bereits seit einigen Jahren eine ausreichend gute Strahlqualität für einen großen Arbeitsabstand. Als Nachteil des Systems zeigt sich der stationäre Bearbeitungskopf, der keine Umorientierung zulässt und Blick auf alle Schweißstellen erfordert. Der Schweißbereich ist auf den vorgegebenen Arbeitsraum beschränkt, weshalb großvolumige Bauteile nicht mit nur einer einzigen Bearbeitungsoptik bzw. Bearbeitungsstation hergestellt werden können.



Abbildung 2.15: Remote-Welding mit CO₂ Laser: Portalanlage (links), Strahlführungsprinzip und Arbeitsvolumen (rechts) [Quelle: Trumpf].

Ein oben beschriebenes Remote System befindet sich bei BMW in der Serienproduktion. Geschweißt wird der Zusammenbau Heckfensterrahmen, der aus zwei Bauteilen aus feuerverzinkten Blechen mit einer Dicke von jeweils 0,75 mm besteht. Die Entgasung erfolgt über Sicken, die schon im Bauteil durch den Tiefziehvorgang im Presswerk integriert sind. Die Abbildung 2.16 zeigt das Bauteil mit Querschnitt eines Flansches. Bei dieser Applikation werden 19 Widerstandspunktschweißungen durch 40 Remote Laserschweißnähte ersetzt [72]. Nachbehandlungen zur Qualitätsverbesserung der Schweißnähte sind darin nicht genannt [73].

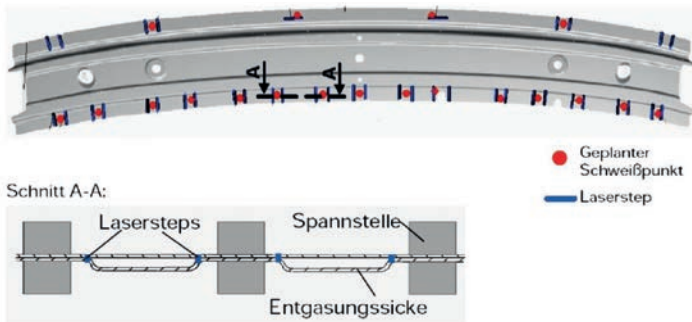


Abbildung 2.16: CO₂ Remote-Schweißen: Heckfensterrahmen mit Schweißstellen (oben), Entgasungsmöglichkeiten durch Einbringen von Entgasungssicken während des Tiefziehprozesses (unten) [Quelle: BMW].

Remote-Schweißen mit Scheibenlaser

Der diodengepumpte Scheibenlaser auf Basis eines Yb:YAG Kristalls stellt eine weitere Entwicklungsstufe innerhalb der Festkörperlaser dar und zeichnet sich durch eine weit bessere Strahlqualität aus, als sie mit einem Nd:YAG Stab laser erzeugt werden kann. Dies ermöglicht einen größeren Arbeitsabstand zwischen Optik und Werkstück bei gleichzeitig geringerem Fokussdurchmesser und größerer Rayleighlänge. Der Scheibenlaser (wie auch der Faserlaser) eignet sich deshalb besonders gut für den Einsatz von Scanneroptiken beim Remote-Laserstrahlschweißen mit Arbeitsabständen um 500 mm zwischen Schweißoptik und Bauteil.

Der Roboter hält dabei einen so genannten optischen Scankopf, der die Feinbewegung des Lichtstrahls übernimmt, in seiner „Hand“. Die Laserstrahlung wird über ein flexibles Glasfaserkabel vom Laser an den Scankopf geführt. Der Scankopf enthält zwei elektronisch gesteuerte, hochdynamische Kippspiegel, die den energiereichen Laserstrahl sehr schnell und präzise von einem Schweißpunkt zum nächsten positionieren lassen. Die Überlagerung der Bewegungen des Roboterarms und der Scannerspiegel erlaubt das so genannte „Welding-on-the-Fly“: Während der Roboter kontinuierlich weiterfährt, springt der Laserstrahl von einer Schweißstelle zur nächsten. Die Positionierzeiten zwischen den Schweißpunkten entfallen daher fast vollständig. Die Abbildung 2.17 veranschaulicht die Funktionsweise des robotergeführten Remote-Schweißens mit Festkörperlaser hoher Strahlqualität [74].

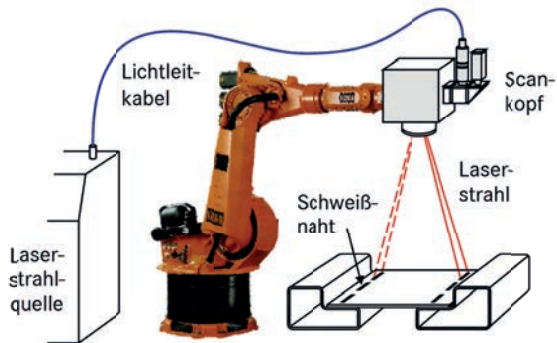


Abbildung 2.17: Robotergeführtes Remote-Schweißen mit modernen Festkörperlaser (Faser- oder Scheibenlaser): Funktionsbeschreibung und Komponenten [Quelle: Daimler].

Ein vergleichbares Verfahren innerhalb der Passat Produktion befindet sich bei VW in einer Serienerprobung. Dabei wird der Zusammenbau Rückwand (Hutablage), bestehend aus verzinkten Blechen, geschweißt. Da die Anwendung nicht im Nassbereich erfolgt und damit die Korrosionsanforderung nicht zu hoch ist, werden hier Nahtunregelmäßigkeiten zugelassen. Es werden 35 Schweißpunkte durch 35 Lasernähte ersetzt. Die Schweißzeit beim herkömmlichen Punktschweißen beträgt 35 Sekunden (bei Einsatz von 4 Robotern), während die Zeit beim Remote-Schweißen unter Verwendung nur eines Roboters lediglich 13 Sekunden beträgt. Eine zusätzliche Behandlung zur Verbesserung der Nahtqualität ist nicht beschrieben [75].

Die industrielle Umsetzung des Remote Laserstrahlschweißens findet auch außerhalb der Automobilindustrie bei der Herstellung von Haushaltsgeräten und im Apparatebau Anwendung. Auch in der Luftfahrtindustrie werden beispielsweise Stringerbauteile aus Aluminium über das Remote Laserstrahlschweißen gefügt [72].

Versuchsreihen innerhalb der hier vorgelegten Arbeit beziehen sich alle auf das robotergeführte Remote-Schweißen mit Festkörperlasern hoher Strahlqualität. Die Beschreibung der eingesetzten Hardware erfolgt in Kapitel 3.1.

3 Systemtechnik und experimentelle Durchführung

Im folgenden Kapitel werden die Komponenten der verwendeten Anlagentechnik und deren Zusammenspiel sowie die Auswerte- und Analysemethodik kurz beschrieben. Weiterhin wird auf die Eigenschaften der in dieser Arbeit vorkommenden Stähle und Beschichtungen eingegangen.

3.1 Systemhardware

Die wesentlichen Komponenten für das Remote-Schweißen mit Festkörperlaser sind die Strahlquelle und die Strahlführungskomponenten sowie eine Handhabungseinheit, in der die Bearbeitungsoptik über das Bauteil bewegt wird. Da die vorliegende Arbeit sich vorwiegend mit Prozessbeobachtungen beschäftigt, wird auf die Handhabungskomponenten selbst nicht tiefer eingegangen, sie werden der Vollständigkeit halber kurz erwähnt.

3.1.1 Diodengepumpte Festkörperlaser

Bei den in dieser Arbeit diskutierten Schweißversuchen kommen ausschließlich Festkörperlaser zum Einsatz, weshalb auf die Eigenschaften und den Aufbau anderer Laserstrahlquellen nicht eingegangen wird.

Festkörperlaser bestehen aus Kristallen oder Gläsern als so genannte Wirtsmaterialien, die mit Ionen als laseraktives Medium dotiert werden. Die beiden heute für die industrielle Materialbearbeitung wichtigsten Vertreter sind der Nd:YAG- und Yb:YAG-Laser. Der Wirtskristall ist ein Yttrium-Aluminium-Granat ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$), bei dem im Kristallgitter Y^{3+} -Ionen durch Neodym- (Nd^{3+}) bzw. Ytterbium-Ionen (Yb^{3+}) ersetzt werden. Typische Dotierungskonzentrationen liegen innerhalb weniger Prozente. Der durch optisches Pumpen ermöglichte Laserübergang erzeugt Strahlung mit einer Wellenlänge von $1,06\text{ }\mu\text{m}$ bei Nd-Dotierung und $1,03\text{ }\mu\text{m}$ bei Yb-Dotierung [76], [77].

Als Strahlquellen dienen zwei Festkörperlaser, ein diodengepumpter Nd:YAG Stab-
laser und ein Yb:YAG Scheibenlaser. Beide Laser arbeiten im Dauerstrichbetrieb und
erreichen maximale Laserleistungen von 3,5 kW (Stablaser) bzw. 4,0 kW (Scheibenla-
ser) am Werkstück. Der Scheibenlaser zeichnet sich vor allem durch seine bessere
Strahlqualität im Vergleich zum Stablaser aus [78], [79]. Das Strahlparameterprodukt
beträgt $8 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ im Gegensatz zu $16 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ beim Stabsystem. Da Strahlqualität
geräteseitig festliegt, ist die Strahlführung an die Strahlquelle anzupassen. In Folge
dessen kann beim Scheibenlaser ein Lichtleitkabel mit $200 \mu\text{m}$ Faserkerndurchmesser
eingesetzt werden, beim Stablaser mit $400 \mu\text{m}$.

Die thermische Linsenbildung kann beim Scheibenlaser im Unterschied zum Stablaser
durch die geringen Temperaturgradienten innerhalb der Scheibe nahezu vernachlässigt
werden [80]. Auch der Wirkungsgrad liegt bei gleicher Anzahl an Dioden, wegen des
effizienteren Pumpmechanismus einer speziellen Pumpenanordnung, beim Scheibenlaser
um 6% höher als beim diodengepumpten Stablaser. Abbildung 3.1 stellt die wesentli-
chen Kenngrößen beider für diese Arbeit verwendeten Laser gegenüber.

Heutige Scheibenlaser (und auch Faserlaser) sind insbesondere bei der Effizienz und
der Strahlqualität noch deutlich besser geworden. Die neueste Generation der dioden-
gepumpten Scheibenlaser mit Laserleistungen bis zu 16 kW und einer Effizienz von
über 30 % zeigt die enorme Weiterentwicklung von Lasersystemen [81].

Laser/Typ (Hersteller)	diodengepumpter Nd:YAG-Stablaser HLD 3504 (Fa. Trumpf)	diodengepumpter Yb:YAG Scheibenlaser Disk Laser 4002 (Fa. Trumpf)
max. Leistung	3,5 kW	4,0 kW
Strahlqualität	$16 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$	$8 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$
minimaler Faserdurchmesser	$400 \mu\text{m}$	$200 \mu\text{m}$
Wellenlänge	1064 nm	1030 nm
Pumpquelle	InGaAs-Dioden mit 808 nm	InGaAs-Dioden mit 940 nm
Pumpstrategie	Konventioneller Reflektor (Vgl. lampengepumpter Stablaser)	Mehrfachabbildung des Pumplichts mit Hilfe Parabolspiegel
Wirkungsgrad (elektrisch-optisch)	12 %	18 %

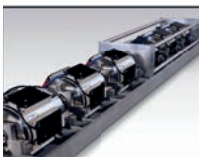


Abbildung 3.1: Technische Daten und Kenngrößen der eingesetzten Laser im Vergleich.

3.1.2 Komponenten zur Strahlführung und Fokussierung

Beim Remote Laserstrahlschweißen kommen Lasersysteme zum Einsatz, bei denen ein großer Arbeitsabstand eine wichtige Größe darstellt. Daher kommen nur brillante Strahlquellen mit hoher Strahlqualität zum Einsatz. Eine damit einhergehende große Rayleighlänge z_{Rf} ermöglicht ein ausreichendes Prozessfenster gegenüber der Fokusslage. So bestimmen die Wahl des Arbeitsabstandes und der durch das Abbildungsverhältnis erzeugte Fokussdurchmesser die Rayleighlänge des Lasersystems. Zur Strahlführung kommen bei Festkörperlasern grundsätzlich Lichtleitkabel und Linsensysteme zum Einsatz. Die für diese Arbeit relevanten Strahlführungskomponenten werden im Folgenden erläutert. Die Funktionsweise eines Lichtleitkabels wird vorausgesetzt und wird daher nicht näher erklärt, siehe z.B. [1].

Programmierbare Fokussieroptik – Scanner

Der verwendete Scanner besteht aus zwei unabhängig voneinander drehbaren Spiegeln, die rechtwinklig zueinander angeordnet sind. Damit kann der Laserstrahl beliebig in x- und y-Richtung abgelenkt werden. Die Bewegung der Spiegel erfolgt über Galva-

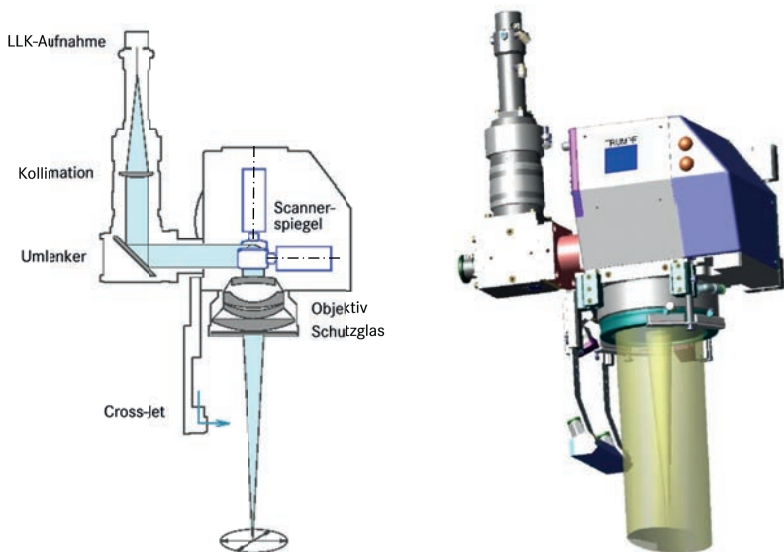


Abbildung 3.2: Die programmierbare Fokussierungs-Optik (PFO33). Links: Funktionsskizze und schematischer Strahlengang, rechts: Darstellung als 3D CAD Abbildung [Quelle: Trumpf Laser GmbH].

nometerantriebe, womit sich sehr hohe Drehfrequenzen erreichen lassen. Der Vorteil des Systems liegt in den geringen Positionierzeiten des Laserstrahls innerhalb des Bearbeitungsfeldes im Bereich weniger Millisekunden. Das Funktionsprinzip der Scanneroptik ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Für die Versuche in Kapitel 6 wurde zum Teil ein 3D-Scanner verwendet. Dieser 3D-Scanner kann durch das Verschieben von Linsen innerhalb der Kollimation die Form der Kaustik so verändern, dass auch die Fokuslage weg bzw. hin zum Werkstück verändert werden kann. Der Fokusbereich ändert sich bei einer derartigen Verschiebung nicht.

Bei der Ablenkung eines Laserstrahls durch die Scannerspiegel liegen die Fokuspunkte auf einer Kugelfläche, was bei einer planen Bildfeldebene zu unterschiedlichen Strahldurchmessern führt. Es ist daher notwendig, ein spezielles Objektiv für den Scanner vorzusehen. Mit Hilfe eines telezentrischen F-Theta-Objektivs (Planfeldlinse) können diese Effekte vermieden werden. Der elliptische Bearbeitungsraum ergibt sich aus der maximalen Auslenkung der beiden Spiegel und dem Fokusabstand des Objektivs und beträgt hier $180 \times 100 \text{ mm}^2$ ¹. Der ebenfalls dargestellte Cross-Jet unterhalb der PFO dient dem Schutz vor Schweißspritzern und wird mit Druckluft betrieben.

Lichtleitkabel und Fokussierbedingungen

Die Ausbreitung von Laserstrahlen wird als Propagation bezeichnet. Dabei ist der als Funktion des Ortes sich einstellende Strahldurchmesser eine Funktion des Strahlparameterprodukts SPP. Dieses ist definiert als das Produkt aus Strahltaillenradius $2w_0 = d_f$ und Divergenzwinkel Θ_0 [1]. Das Strahlparameterprodukt ist bestimmt durch die Laserquelle und bleibt auch bei Durchgängen durch optische Elemente immer erhalten:

$$SPP = \frac{d_f \Theta_0}{4} \quad (3.1)$$

Die Rayleighlänge z_R ist eine weitere wichtige Größe für die Charakterisierung eines Laserstrahls. Die Rayleighlänge

$$z_R = \frac{\pi \cdot w_0^2}{\lambda} \quad (3.2)$$

beschreibt den Abstand von der Strahltaile bei dem sich die Strahlfläche verdoppelt.

¹ Die Fokussierbrennweite beträgt hierbei 255 mm

Je größer die Rayleighlänge eines Lasersystems ist, umso geringer ist die Strahlaufweitung. Insbesondere sind große Rayleighlängen beim Remote Laserstrahlschweißen von hoher Bedeutung, da eine exakte Positionierung in Strahlrichtung – Laserstrahl zu Bauteil – nicht immer gewährleistet werden kann.

Die prozesstechnischen Vorteile eines geringen SPP – also einer hohen Strahlqualität – bei der Fokussierung sind in Abbildung 3.3 nach [1] zusammengefasst: je nach Zielsetzung lassen sich höhere Intensitäten oder größere Arbeitsabstände realisieren.

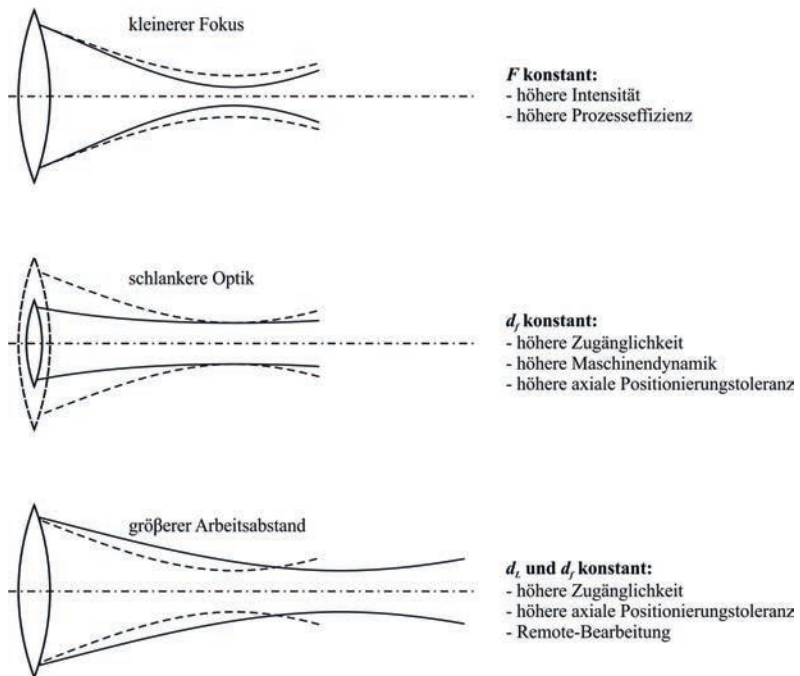


Abbildung 3.3: Prozesstechnische Möglichkeiten und Vorteile bei gegebenem Strahlparameterprodukt.

Die Strahlführung zwischen Laserstrahlquelle und Bearbeitungskopf erfolgt bei der Verwendung von Festkörperlaser über ein Lichtleitkabel (LLK). Die Mehrzahl der nachfolgenden Versuche wurden unter Verwendung eines LLK mit 400 μm Faserkerndurchmesser durchgeführt.

Abbildung 3.4 veranschaulicht die Fokussierbedingungen bei Verwendung verschiedener Lichtleitkabel mit unterschiedlichen Durchmessern und Scanneroptiken mit unterschiedlichen Brennweiten. Die Daten des Diagramms stammen aus Mess- und Rechenwerten, die zu den Versuchsreihen unternommen wurden.

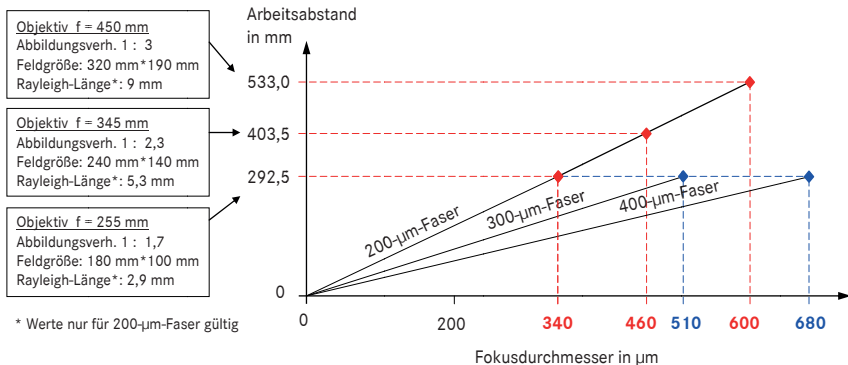


Abbildung 3.4: Grafische Darstellung der Arbeitsabstände und Fokussierdurchmesser bei unterschiedlichen Faserkerndurchmessern und Objektiven.

3.1.3 Bearbeitungsanlagen

Die innerhalb dieser Arbeit durchgeführten Versuchsreihen wurden an zwei verschiedenen Handhabungsstationen, einem Roboter und einer Portalanlage, durchgeführt. Ein Unterschied der Ergebnisse zwischen den beiden Anlagen war nicht zu erkennen, die Portalanlage ist jedoch für Schweißversuche an Flachproben einfacher und präziser zu programmieren.

Roboter

Der eingesetzte seriell arbeitende Roboter der Firma Kuka verfügt über sechs Achsen mit Gelenkkinematik. Jede Achse wird über Servomotoren angetrieben. Schwinde, Arm und Hand sind auf einem feststehenden Grundgerüst montiert. Die maximale Nenntraglast beträgt 210 kg . Je nach Achse werden Winkelgeschwindigkeiten zwischen $84\text{--}184^\circ/\text{s}$ erreicht. Die Wiederholgenauigkeit liegt bei $\pm 0,2 \text{ mm}$. Der Roboter wird über das Kuka Control Panel (KCP) bedient. Das KCP bildet somit die Mensch-Maschine-Schnittstelle.

Portalanlage

Die Schweißportalanlage des Typs LASMA der Firma Trumpf ist ein 3-Achs-Bearbeitungssystem, wobei der Bearbeitungskopf in der x- und z-Achse und der Werkzeutisch in y-Richtung beweglich sind. Bei einer Positioniergenauigkeit von $\pm 0,02$ mm ist diese Anlage besonders gut geeignet für die in Kapitel 4 diskutierten Versuche zum Thema Lasernoppen.

Anlagenvernetzung

Die Vernetzung der Anlagen ist in Abbildung 3.5 schematisch dargestellt. Als zentrale Steuereinheit dient ein so genannter Master-PC, der die Roboterkoordinaten nahezu in Echtzeit erfasst. Mit Hilfe dieser Informationen werden die Scannerspiegel an die zu schweißende Stelle mit entsprechendem Muster und zugehöriger Leistung gelenkt.

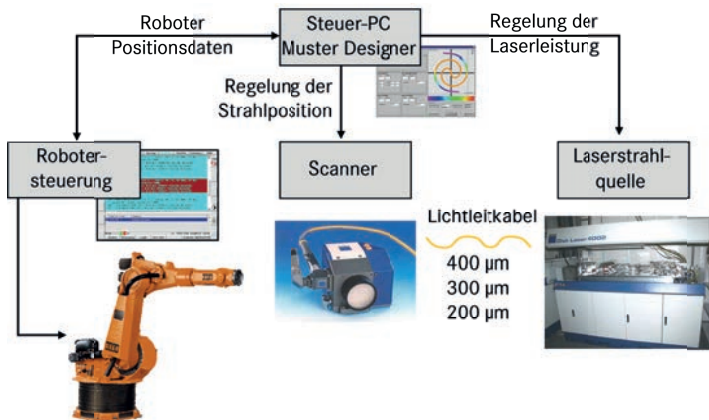


Abbildung 3.5: Robotergeführtes Remote Laserstrahlschweißen: Vernetzung der Hardware.

3.1.4 Spanntechnik

Für die Schweißversuche, welche in Kapitel 5 beschrieben sind, wurde eine pneumatische Spannvorrichtung mit austauschbaren Spannbacken verwendet. Für linienförmige Schweißnähte werden gerade Spannbacken mit einigen Millimeter Abstand zur Schweißnaht eingesetzt. Um ein möglichst exaktes Spaltmaß entlang einer Klammernaht zu bekommen, werden bei dieser Nahtgeometrie speziell geformte Spannelemente mit Form der Nahtgeometrie verwendet. Für eine genaue und reproduzierbare Spalteinstellung werden in die Fügeebene Fühlerblattlehren eingelegt.

3.1.5 Programmierung der Schweißmuster

Für die Scannerprogrammierung wird eine spezielle Software zur Mustererstellung verwendet. Dieser Muster-Designer bietet eine große Auswahl von Schweißmustern von einfachen Strichnähten, Kreisen, Ellipsen bis zu Klammern, Spiralen und anderen Geometrien. Eine Kombination mehrerer Schweißmuster oder eine Geometrie bestehend aus mehreren Einzelmustern ist ebenfalls möglich.

Die Schweißmuster des Designers können so parametrisiert werden, dass sie in ihrer geometrischen Form sowie in Schweißleistung und Schweißgeschwindigkeit frei programmierbar sind. Die Software bietet zusätzliche Funktionen wie das Erstellen von Rampen der Geschwindigkeit und Variieren der Laserleistung.

3.2 Untersuchte Werkstoffe und Beschichtungen

In der Automobilindustrie spielt der Leichtbau eine wichtige Rolle, da das Fahrzeuggewicht einen entscheidenden Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch und die Fahrleistungen hat. Daher kommen immer mehr hochfeste Stähle im Karosserierohbau zum Einsatz, bei welchen die Blechstärke wegen ihrer deutlich höheren Festigkeit reduziert werden kann. Die Festigkeit der Stähle wird deshalb durch verschiedene Mechanismen bei der Stahlherstellung bzw. bei der Verarbeitung gesteigert. Die Stähle sind teilweise mit einer Oberflächenbeschichtung versehen, die hauptsächlich dem Korrosionsschutz dient. Im Folgenden werden die Eigenschaften der verwendeten Stähle und Beschichtungen beschrieben.

3.2.1 Werkstoffe

Bei den folgenden Versuchsreihen werden drei verschiedene Stahlsorten eingesetzt, welche für das Laserstrahlschweißen geeignet sind. Neben dem weichen Tiefziehstahl DC04 gehören dazu der mikrolegierte Stahl H320LA (ZStE340) und der TRIP Stahl HT700T (TRIP700). Es wird generell – wenn nicht anderweitig gekennzeichnet – ohne Zusatzwerkstoff oder Prozessgas gearbeitet.

Weiche Tiefziehstähle

Der verwendete Stahl DC04 ist ein klassischer niedrig legierter kaltgewalzter Tiefziehstahl. Eigenschaften der DC-Stähle werden in der DIN EN 10151 beschrieben. Die Abkürzung DC steht für **d**eep **d**raw **c**old **r**olled. Aufgrund des niedrigen Kohlenstoffgehalts ($< 0,1\%$) gelten DC-Stähle im Allgemeinen als gut schweißgeeignet. Aufgrund der guten Umformbarkeit wird er hauptsächlich für Außenhaut und umformtechnisch schwierige Teile verwendet. Der DC04 hat eine Streckgrenze $R_{p0,2}$ zwischen 140 – 210 MPa und eine Zugfestigkeit R_m zwischen 270 – 350 MPa.

Mikrolegierte Stähle

Aus der Gruppe der mikrolegierten Stähle kommt der H320LA zum Einsatz. Durch Legierungselemente wie Titan oder Niob und feine Korngrößen werden die geforderten Festigkeitseigenschaften erreicht. Dieser Stahl besitzt eine gute Umformbarkeit und wird aufgrund der hohen Dehnungswerte und Beulfestigkeit vor allem bei großflächigen Automobilteilen eingesetzt. Die Streckgrenze $R_{p0,2}$ liegt zwischen 320 – 410 MPa und die Zugfestigkeit R_m bei etwa 400 MPa.

TRIP-Stähle

TRIP ist die Kurzform für „Transformation Induced Plasticity“. TRIP- oder Restaustenit-Stähle bestehen hauptsächlich aus einer ferritischen Matrix, in die Restaustenit eingelagert ist. Der Anteil an Restaustenit beträgt bis zu 20%. Die Besonderheit an den TRIP-Stählen ist, dass sich das metastabile Restaustenit nach einer plastischen Verformung in harten Martensit umwandelt. Somit wird trotz hoher Festigkeitswerte eine gute Verformbarkeit erzielt. Gutes Crashverhalten des Grundwerkstoffs zeichnet den TRIP-Stahl besonders aus. TRIP-Stähle besitzen einen ausgeprägten Bake-Hardening-Effekt² nach ihrer Verformung. Die Streckgrenze $R_{p0,2}$ liegt zwischen 440 und 560 MPa und die Zugfestigkeit R_m bei etwa 780 MPa. Die Abbildung 3.6 veranschaulicht das Bruchdehnungs- und das Festigkeitsverhalten verschiedener Stahlgruppen.

² Bake-Hardening-Stahl ist ein Werkstoff, der eine Festigkeitssteigerung durch Erwärmen auf Temperaturen um 200 °C, z.B. beim Einbrennen des Lackes in der Automobilfertigung, erfährt.

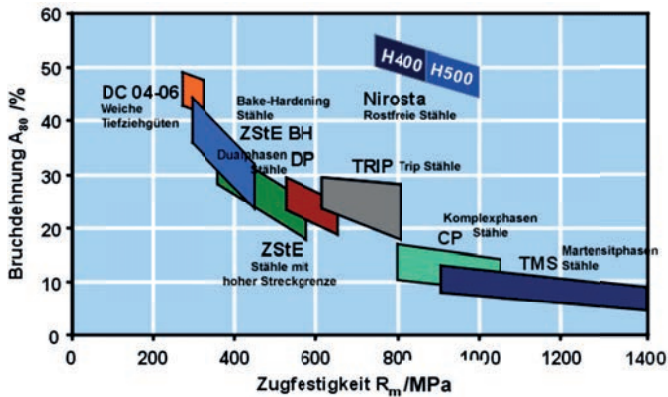


Abbildung 3.6: Übersicht von Stahlwerkstoffgruppen: Diagramm der Zugfestigkeit über der Bruchdehnung [Quelle: DaimlerChrysler].

Eine Übersicht der Legierungsbestandteile sowie die Werte für die Wärmeleitfähigkeit und Temperaturleitfähigkeit sind in Tabelle 3.1 dargestellt. Bei TRIP700 zeigt sich eine deutliche Reduzierung der Wärme- und der Temperaturleitfähigkeit im Vergleich zu den anderen beiden Stählen. Deren Einfluss auf das Schweißergebnis wird in den Versuchskapiteln diskutiert.

Werkstoff	C	Si	Alges	Mn	P	S	Nb	Cr	Ti	Wärmeleitfähigkeit	Temperaturleitfähigkeit
	%max.	%max.	%min.	%max.	%max.	%max.	%max.	%max.	%max.	/W/(m ² K)	/mm ² s
DC04	0,08	-	-	0,4	0,03	0,03	-	-	-	65	18
H320LA	0,1	0,5	0,015	1	0,025	0,025	0,09	-	0,15	50	14
TRIP 700	0,22	2,2	-	2	0,06	0,015	-	0,5	-	26	8

Tabelle 3.1: Chemische und thermische Kennwerte der verwendeten Stähle.

Die Blechdicke beträgt zwischen 0,7 und 1,5 mm, sie ist bei der Diskussion in den jeweiligen Versuchskapiteln dokumentiert.

3.2.2 Beschichtungen

Um die Stähle vor Korrosion zu schützen, werden sie mit einer Beschichtung versehen, die das Material vor dem Einfluss des korrosiven Mediums abschirmt. Diese Schutzschicht wird direkt auf das Metall aufgetragen. Die hier verwendeten Beschich-

tungen lassen sich, wie in Kapitel 2.2 beschrieben, in zwei Gruppen der metallischen und der organischen Beschichtungen unterteilen.

Als Standard wird bei den Schweißversuchen die elektrolytische Zinkbeschichtung (siehe Kapitel 2.2) verwendet. Bei dem Werkstoff TRIP700 wird eine zusätzliche organische Beschichtung verwendet, da es auf diesem Stahl die Variante mit elektrolytischer Verzinkung nicht gibt.

Im Kapitel 4.2.2 wird der Einfluss der Beschichtung auf die Noppenhöhe diskutiert. Hier sind weitere Schichten wie beispielsweise die Feuerverzinkung in Verwendung. Auf Grund der sehr kurzen Prozesszeiten spielt das Absorptionsverhalten der Beschichtung eine große Rolle.

3.3 Untersuchungs- / Analysemethoden

Metallografie / Schliffbilder

Um Aussagen über den Querschnitt der Laserschweißnähte machen zu können, wurde eine Vielzahl an Schliffbildern angefertigt. Diese geben Aufschluss über die wichtigsten Nahteigenschaften wie Nahtunterwölbung, tragender Querschnitt und Nahtbreite. Auch für die Auswertung des in Kapitel 5.3 definierten lokalen Schmelzbaddefizits werden Schliffbilder herangezogen.

Für die Erklärung der Noppenentstehung ist die Erstarrungsform im Querschnitt ein wichtiges Merkmal. Schmelzbadtiefe und -breite sowie eine Kelch- oder Zylinderform lassen Rückschlüsse auf Entstehungsmechanismen und Einfluss der Laserparameter zu.

Die Bearbeitung der Schliffbilder erfolgt nach standardisiertem Vorgehen und wird im Folgenden nicht näher erläutert.

Vermessung der Noppenhöhe

Die Auswertung der Noppenhöhen der geschweißten Lasernoppen erfolgt mit Hilfe eines Mikroskops. Dabei wird zuerst die Blechoberseite möglichst dicht am Noppenrand mit einer 10-fachen Vergrößerung fokussiert. Die Höhenverstellung des Probenstisches erfolgt durch ein mit einer Skala versehenes Handrad. Eine Umdrehung entspricht einem Wert von 100 µm. Die Position des Handrades, an der die Blechoberseite scharf dargestellt ist, wird an der Skala abgelesen und anschließend die Spitze der

Noppe durch die Höhenverstellung des Tisches fokussiert. Die Differenz aus beiden Werten entspricht der Höhe der Noppe in μm .

Strahlvermessung mit Primes Power/Focus Monitor

Bei der Vermessung des Laserstrahls wird dieser durch eine rotierende Messspitze zeilenweise abgetastet. Am oberen Ende dieser Messspitze befindet sich eine kleine Bohrung, durch die ein kleiner Teil des Strahls in das Messsystem eintritt. Durch zwei Spiegel wird der Strahl auf den ruhenden Detektor gelenkt. Das so generierte Detektorsignal wird digitalisiert und an einen Rechner weitergeleitet. Die Lage dieser Abtastspur wird durch Linearbewegungen in y- und z-Richtung verschoben.

Durch eine derartige Messung kann man die genaue Fokusslage, den Fokusedurchmesser und die Rayleighlänge messen und eine eventuelle thermische Shift des Objektivs feststellen. Die Abbildung 3.7 zeigt exemplarisch das Ergebnis einer Strahlvermessung in Fokusslage. Das Intensitätsprofil gleicht einem so genannten Top-Hat und ist dadurch charakterisiert, dass die Flanken sehr steil ansteigen und die Intensität über den gesamten Strahldurchmesser weitgehend konstant ist.

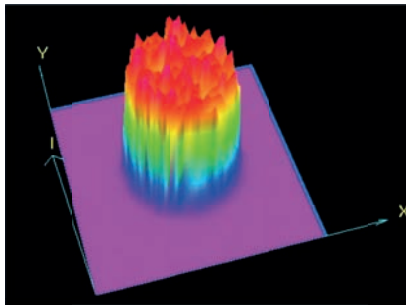


Abbildung 3.7: Strahlvermessung: Top-Hat Intensitätsprofil im Fokus eines Laserstrahls.

Insbesondere für die Versuche zum Thema Lasernoppen mit defokussiertem Strahl ist eine oben beschriebene Messung zur Bestimmung der Intensitätsverteilung und des Strahldurchmessers erforderlich.

Hochgeschwindigkeitskamera

Für die Prozessbeobachtungen und damit für das Verstehen der Vorgänge im Schmelzbad – sowohl beim Lasernoppen als auch beim Schweißen – wurde eine digitale Hochgeschwindigkeitskamera verwendet. Zur Verfügung stand eine Kamera der Firma Red Lake vom Typ Motion Pro 10000.

Die Kamera hat eine maximale Auflösung von 1280 x 512 Pixel. Es erwies sich eine Auflösung von 1280 x 320 Pixel bei einer Bildwiederholrate von 1600 Bildern pro Sekunde bei den Schweißbeobachtungen als beste Einstellung für eine aussagefähige Visualisierung der Schmelzbaddynamik. Beim Lasernoppen sind kleinere Bildausschnitte mit höherer Frequenz notwendig. Um den CCD-Chip der Kamera in Folge des hellen Prozessleuchtens nicht zu übersteuern, bedarf es weiterer Einstellungen an der Kamera und an der Software.

Für ein bildfüllendes Schweißmuster wurde ein Teleobjektiv mit einer Festbrennweite von 180 mm mit Makrofunktion verwendet, welches für eine weitere Erhöhung der Brennweite mit einem Zweifach-Telekonverter ausgestattet werden konnte. Bei schrägem Aufnahmewinkel ist auf Grund der großen Brennweite die geringe Tiefenschärfe zu beachten, was mit einer kleineren Blendenöffnung kompensiert werden kann.

Als Objektivschutz gegen Schmelzspritzen dient ein breitbandiger YAG-Filter, welcher gleichzeitig den Kamerachip vor reflektierter Laserstrahlung schützt. Der Schutzfilter besteht aus zwei wechselbaren Gläsern. Objektivseitig befindet sich der Laserschutzfilter, prozessseitig schützt ein Hitzeschutzglas vor Schweißspritzern. Um Reflexionen zu vermeiden, ist der Filterring im Innenbereich mit einem optischen Lack behandelt.

Als Beleuchtungsquelle wurde ein 1000 W Halogenstrahler verwendet, welcher sehr nah am Prozess positioniert wird, um eine ausreichende Bildhelligkeit zu gewährleisten. Diese Beleuchtungsart ermöglicht eine qualitativ hochwertige Beobachtung des Schmelzbades nahe der Dampfkapillare, da sich die gesamte Bildhelligkeit der Helligkeit des Prozessleuchtens nähert.

4 Sicherstellung des erforderlichen Entgasungsspalts durch Lasernoppen

Dem Stand der Technik ist zu entnehmen, dass die exakte Spaltgestaltung für das Laserstrahlschweißen verzinkter Bleche ein zentrales Thema und Voraussetzung für eine Schweißnaht von hoher Qualität ist. So zeigt sich auch in den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchen durchgängig, dass ein konstantes und bestimmtes Spaltmaß zwischen den Fügepartnern für eine hohe Nahtqualität unabdingbar ist. Hierzu sind Spaltmaße von 100 – 200 µm erforderlich, die beim Laserstrahlschweißen von verzinkten Blechen die Entgasung ermöglichen. Üblicherweise sind Verfahren im Einsatz, welche jedoch für die Anwendung des Remote Schweißens nicht wirtschaftlich sind. Weiter ist die Genauigkeit der erzielten Spaltmaße trotz erheblichen technischen Aufwands nicht zufriedenstellend. Eine Spaltgestaltung in Form einer Blechvorbearbeitung, bei der Topografieänderungen in einen der Fügepartner eingebracht werden, muss sich indes bei hoher Prozesssicherheit als wirtschaftlich erweisen, um Eingang in die Serienfertigung zu finden.

Eine Möglichkeit diesen Spalt zu realisieren, ist das Laserstrahlnoppen. Unter Noppen werden im Folgenden Erhöhungen verstanden, die mittels Laserstrahlung vor dem Schweißprozess auf der Blechoberseite, d.h. auf der laserzugewandten Seite entstehen. Lasernoppen sind im Rahmen dieser Arbeit erstmalig für das Schweißen verzinkter Karosseriebleche detailliert untersucht worden. Die Ergebnisse wurden mehrfach in Patenten veröffentlicht und für die Anwendung bei Daimler geschützt. Die reproduzierbare Herstellung von Lasernoppen und die exakte Positionierung auf dem zu schweißenden Bauteil sind die Inhalte dieses Kapitels.

4.1 Grundsätzliche Möglichkeiten der Herstellung von Lasernoppen

Beim Laserstrahlnoppen wird unter kurzer Einwirkung eines Laserstrahls auf der Werkstückoberfläche ein kleines Schmelzbad erzeugt, welches nach der Erstarrung die Form einer im Folgenden beschriebenen Noppe annimmt. Diese im Wesentlichen

durch Materialumverteilung entstandenen Erhöhungen sind, abhängig von Laserparametern und Materialeigenschaften, im Bereich von 50 – 250 μm Höhe darstellbar.

Noppen werden vor dem Spannen der zu schweißenden Bauteile auf einen der Fügepartner aufgebracht. Nach dem Spannvorgang kann das eigentliche Schweißmuster die Bleche miteinander verbinden. Eine Entgasung des Zinkdampfes innerhalb der Fügeebene ist somit gewährleistet.

Eine Unterscheidung von Lasernoppen erfolgt nach der Herstellungsmethode und dem Ort des Entstehens. Der Ort des Entstehens wird damit zur laserzu- bzw. laserabgewandten Seite definiert. Demnach werden die laserzugewandten Topografieänderungen als Oberflächenrippen, die laserabgewandten Erhebungen als Durchschussschweißungen bezeichnet. Die Abbildung 4.1 und Abbildung 4.2 veranschaulichen den Unterschied von Herstellung und Form der Oberflächen- und Durchschussschweißungen.

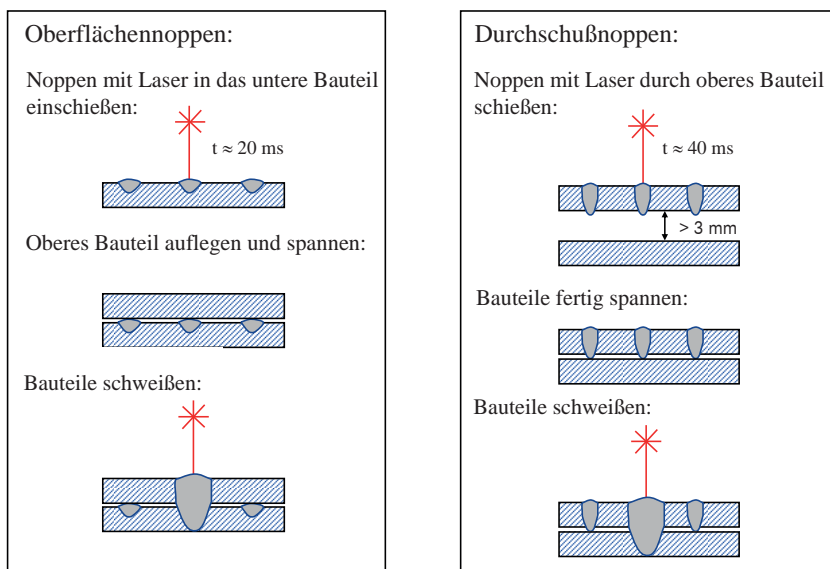


Abbildung 4.1: Noppenunterscheidung nach Entstehungsort und schematischer Ablauf des gesamten Fügevorgangs.

Der sich ergebende wesentliche Vorteil für Oberflächenrippen gegenüber Durchschussschweißungen ist, dass nur die Blechoberfläche und nicht die gesamte Blechstärke aufgeschmolzen werden muss, siehe Abbildung 4.2. Die Prozesszeit wie auch die aufzuwendende Energie wird damit erheblich geringer als bei den Durchschussschweißungen.

Andererseits könnten Bauteile bereits in einem durch geeignete Spanntechnik fixiertem Zustand mit Durchschusssnoppen versehen werden, ohne dabei durch eine weitere Handlingstation geführt werden zu müssen. Sie spielen innerhalb dieser Arbeit keine wesentliche Rolle, da die Prozessführung deutlich schwieriger ist und die dazu erforderliche Sonderspanntechnik zum Vorspannen der Bauteile zusätzlichen Aufwand im Karosserierohbau bedeuten würde.

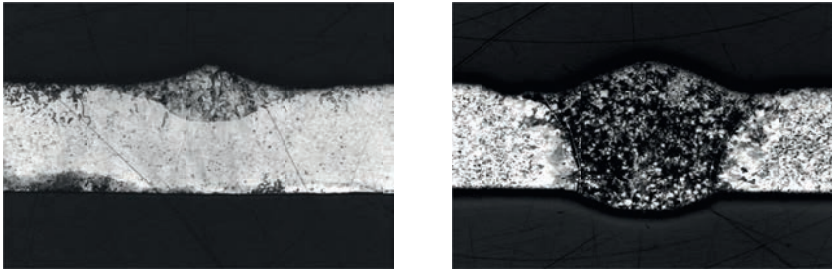


Abbildung 4.2: Typische Noppenform im Querschliff einer Oberflächennoppe (links) und Durchschusssnoppe (rechts).

Die hier untersuchten Oberflächennoppen werden nach zwei unterschiedlichen Methoden erzeugt. Differenziert wird dabei nach der Fokusslage, also ob sich die Strahltaille während des Prozesses entweder auf der Blechoberseite befindet oder der Noppvorgang mit defokussiertem Strahl durchgeführt wird. Die an der Blechoberseite wirkende Laserstrahlintensität bestimmt also die für die Noppenentstehung maßgeblichen physikalischen Mechanismen. Die entsprechenden Methoden werden im Folgenden vereinfachend als „defokussierte“ bei nur zu oberflächennahen Aufschmelzungen führenden oder als „fokussierte“ bei den Tiefschweißeffekt realisierenden Intensitätswerten bezeichnet.

Die geometrische Ausbildung der Noppenform bei defokussiertem Laserstrahl ist nahezu symmetrisch im Querschnitt, und der höchste Punkt der Erhebung liegt in deren Mitte. In Abbildung 4.3 ist diese Noppenform schematisch dargestellt, h_N ist dabei die von der ebenen Oberfläche aus gemessene Höhe, t_N die Einschweißtiefe und b_N der Durchmesser der Noppe.

Bis auf wenige Ausnahmen hat sich in zahlreichen Versuchen erwiesen, dass auf Stählen mit niedriger Streckgrenze (bis etwa 400 MPa) Oberflächennoppen bei defokussierter Prozessführung möglich sind.

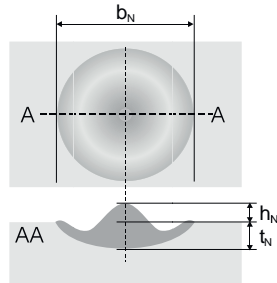


Abbildung 4.3: Symmetrische Geometrie einer Lasernappe bei „defokussierter“ Herstellungsmethode; Prozessführung ähnlich einer punktuellen Schweißung.

Bei Stählen mit höherer Streckgrenze bilden sich mit zuletzt genannter Methode keine Noppen aus, und es entsteht lediglich ein flach erstarrtes Schmelzbad ohne topografische Erhebung. In Folge dessen ist die Noppeneinbringung bei diesen höherlegierten, hochfesten Stählen nur mit der „fokussierten“ Verfahrensvariante möglich.

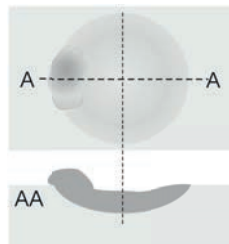


Abbildung 4.4: Asymmetrische Geometrie einer Lasernappe mit „fokussierter“ Herstellungsmethode; Prozessführung ähnlich einer kreisförmigen Bahnschweißung.

Die asymmetrische Erstarrungsform der in „fokussierter“ Methode generierten Noppen ist im Vergleich zu den symmetrischen Lasernoppen mit defokussiertem Laserstrahl völlig verschieden. Die hier zu Grunde liegende Intensität des Laserstrahls verbunden mit einer Bahnbewegung lässt auf eine bedeutend höhere Schmelzbadynamik des Tiefschweißeffektes schließen. Die höchste Erhebung der Nappe liegt hier am Rand der Bearbeitungszone. In Abbildung 4.4 ist die Geometrie dieser Lasernoppen schematisch dargestellt.

Nach dieser einführenden phänomenologischen Unterscheidung werden die beiden Methoden und dabei wirksam werdenden Mechanismen in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

4.2 Noppenerzeugung im Modus des Wärmeleitungsschweißens

Im Rahmen der folgenden Versuchsreihen wurden verschiedene Laserparameter und Materialien auf ihren Einfluss auf die Noppenhöhe und die Reproduzierbarkeit untersucht, um die wichtigsten Abhängigkeiten darstellen zu können.

Alle Ergebnisse dieses Kapitels wurden mit der in Kapitel 3.1 beschriebenen optischen Konfiguration unter Verwendung eines Scheibenlasers ermittelt. Sofern keine gesonderten Angaben zur Laserleistung gemacht werden, beträgt diese beim Noppen immer 4,0 kW. Wenn nicht ausdrücklich anders vermerkt, erfolgen die Schweißungen ohne Schutzgas in normaler atmosphärischer Umgebung.

Als Parameter, von dessen Abhängigkeit die experimentellen Ergebnisse dargestellt werden, wurde die Defokussierung z – der Abstand zwischen der Taille des fokussierten Laserstrahls und der Blechoberfläche – gewählt. Diese Wahl wurde vor dem Hintergrund einer möglichst einfachen Übertragung von Versuchsparametern auf die Realisierung in der industriellen Serienfertigung getroffen.

Die für die physikalischen Effekte maßgebliche Intensität als Funktion des Ortes lässt sich mittels theoretischer Beschreibungen der Laserstrahlpropagation darstellen. Für die Abschätzung typischer Mittelwerte

$$\overline{I(z)} = \frac{P}{d^2(z) \frac{\pi}{4}} \quad (4.1)$$

wird für $d(z)^2$ nach [1] die Beziehung

$$d^2(z) = d_f^2 \left(1 + \frac{z^2}{z_{R_f}^2} \right) \quad (4.2)$$

herangezogen, d_f ist der Taillendurchmesser des fokussierten Stahls, z_{R_f} dessen Rayleighlänge.

Die Tabelle 4.1 stellt die Versuchsmatrix der mit Defokussierung geschweißten Noppen an Blechen mit der Dicke 1,0 mm dar. Diese Matrix wurde mit DC04 und ZStE340 mit je drei verschiedenen Beschichtungszuständen geschweißt. Um Noppenschwankungen statistisch zu erfassen, wurden je Parameter 20 Noppen geschweißt und vermessen.

Für die in Kapitel 3.1 beschriebene Systemtechnik (Strahlparameterprodukt 8 mm*mmrad, Fokussierbrennweite 255 mm, Faserkerndurchmesser 600 µm) ergeben sich Werte für den Fokusedurchmesser d_f von 0,68 mm und z_{Rf} von 6 mm. Die daraus folgenden Intensitätswerte bei $P_L=4,0$ kW sind ebenfalls in Tabelle 4.1 wiedergegeben. Man erkennt, dass diese etwa eine Größenordnung unterhalb von beim Tiefschweißen typischen Werte liegen.

Defokussierung in mm	Intensität in 10^4 W/cm ²	Prozesszeit in ms und Energiedichte in J/cm ²							
		8	10	12	15	20	25	30	35
10	34,78	278	348	417	522				
12	27,94	224	279	335	419				
14	21,75	174	218	261	326				
16	17,01	136	170	204	255	340	425	510	
18	13,25	106	133	159	199	265	331	398	464
20	10,52	84	105	126	158	210	263	316	368
22	8,99	72	90	108	135	180	225	270	315
24	7,59	61	76	91	114	152	190	228	266
26	6,35	51	64	76	95	127	159	191	222
28	5,4					108	135	162	189
30	4,76					95	119	143	167
32	4,18					84	105	125	146
34	3,64							109	127
36	3,24							97	113
38	2,92							88	102
40	2,63							79	92

Tabelle 4.1: Versuchsmatrix Lasernoppen: Prozesszeiten, Defokussierungen und entsprechende Intensität sowie Energiedichte.

Die Defokussierung in Millimeter gibt an, wie weit – ausgehend von der Fokusslage – defokussiert werden muss. Die Prozesszeit wird in Millisekunden angegeben, es erfolgt dabei keine Strahlbewegung. Die eingefärbten Felder kennzeichnen den Versuchsumfang. Die Werte in den Feldern geben die Energiedichte des jeweiligen Pulses an. Außerhalb dieser gekennzeichneten Parameterkombinationen ergeben sich keine sinnvollen Versuche, da bei denen die Noppenentstehung ausbleibt oder innerhalb eines Parameters stark variiert.

4.2.1 Einfluss von Intensität und Pulsdauer auf die Noppenhöhe

Um die grundsätzlichen Zusammenhänge zwischen den zur Verfügung stehenden Prozessparametern Intensität und Pulsdauer und der erzielbaren Noppenhöhe darzustellen, werden als erstes Untersuchungen an unbeschichteten Blechen durchgeführt.

Die bestrahlte Fläche auf dem Werkstück mit der passenden Intensität ist eine der wichtigsten Stellgrößen für die Herstellung von Lasernoppen. Es zeigt sich, dass mit sehr hohen Intensitäten bzw. zu kleiner Bestrahlungsfläche sich keine topografische Erhebungen im Sinne von Noppen ausbilden, ebenso bei zu geringen Intensitäten bzw. zu großer Defokussierung. Damit wird deutlich, dass für die Noppenentstehung die Existenz eines Schmelzbads mit bestimmten Eigenschaften Voraussetzung ist.

Um eine Vorstellung von den erforderlichen Intensitätswerten zu erhalten, die bei Variation von z mindestens einzustellen sind, um Schmelztemperatur des Werkstoffs zu erreichen, seien die folgenden Abschätzungen durchgeführt. Unter der Annahme, dass die Intensitätsverteilung im propagierenden Laserstrahl „gaußähnlich“ ist, lässt sich nach [1] mit

$$T_s \leq T = T_0 + \frac{A \cdot I_0 \cdot d_f}{\lambda_{th} \cdot \sqrt{8} \cdot \pi} \cdot \arctan \frac{l_{th} \cdot \sqrt{8}}{d_f} \quad (4.3)$$

abschätzen, ob bei der vorgegebenen Laserleistung und Defokussierung noch Schmelztemperatur T_s im Zentrum des Brennflecks erreicht wird; T_0 ist die Temperatur des Werkstücks vor der Bestrahlung, A der Absorptionsgrad, I_0 der Intensitätswert auf der Strahlachse und λ_{th} die Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffs, die thermische Eindringtiefe l_{th}

$$l_{th} = 2\sqrt{k \cdot t_p} \quad (4.4)$$

hängt von der Temperaturleitfähigkeit k und der Bestrahlungsdauer t_p ab. Bei der Annahme von einem Absorptionsgrad A bei Schmelztemperatur von 0,3 und $\lambda_{th \text{ DC04}}$ von etwa 60W/mK, einer mittleren Intensität ($I_0/2$) von $9 \cdot 10^4 \text{ W/cm}^2$ bei einem Fokusedurchmesser von 2,4 mm bei 20 mm Defokussierung ergibt sich eine Temperatur von 2100 °C, ein durchaus plausibler Wert, bei dem die Entstehung eines Schmelzbades erfolgen kann.

Es wird daher zunächst in einigen Versuchen die Abhängigkeit der Noppenhöhe bei Variation der Defokussierung aufgezeigt. Wichtig bei den folgenden Versuchen sind einerseits die Reproduzierbarkeit und andererseits die Noppenhöhenvariation aufgrund veränderter Randbedingungen. Solche sind z.B. äußere Einflüsse wie beispielsweise Schwankungen der Defokussierung in Folge abweichender Bauteillage oder Ungenauigkeiten innerhalb der Bearbeitungsbahn. Auch die Schwankung der Zinkschichtdicke ist entscheidend für einen stabilen Noppprozess. In Folge einer genau beschriebenen Liefervorschrift beträgt diese Schwankung nur wenige Prozent und kann daher vernachlässigt werden.

4.2.1.1 Ergebnisse auf DC04, blank

Werden zunächst die Ergebnisse mit der geringeren Prozesszeit dargestellt, so ist zu erkennen, dass bei einer Pulszeit von 10 ms die Noppenhöhe sich sehr unterschiedlich einstellt, siehe Abbildung 4.5. Sowohl die absolute Höhe als auch die Schwankung der Höhe, charakterisiert durch die Höhe des Streubalkens, ist bei der Kombination 10 ms Pulszeit mit blankem DC04 nicht akzeptabel und lässt auf einen stochastisch unterschiedlich ablaufenden Prozess schließen.

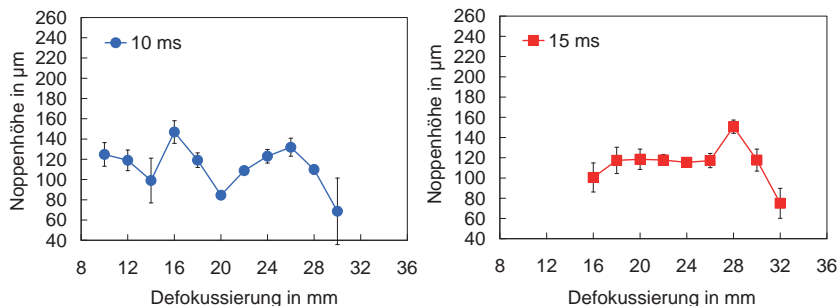


Abbildung 4.5: Noppenhöhen bei DC04, unverzinkt: Einfluss der Defokussierung und der Prozesszeit.

Bei einer Steigerung der Prozesszeit auf 15 ms Pulslänge können im Bereich zwischen $z = 18$ und 26 mm Defokussierung reproduzierbare Noppen hergestellt werden, Abbildung 4.5 rechts. Die durchschnittliche Noppenhöhe beträgt 120 µm. Verwendet man Defokussierungen größer als 28 mm, ist die Energie pro Fläche des kurzen Laserpuls nicht mehr hoch genug, um ein ausreichendes Schmelzbad zu erzeugen. Die Noppenhöhe reduziert sich dann erheblich. Auch bei höheren Prozesszeiten und entsprechend großer Defokussierung ist dieser Effekt zu beobachten (siehe Abbildung 4.6).



Abbildung 4.6: Keine Noppenentstehung bei zu geringer Intensität in Folge zu hoher Defokussierung (6er Noppenmatrix, Pulszeit: 20 ms, Defokussierung 36 mm).

Bei einer weiteren Steigerung der Prozesszeit auf 30 ms (siehe Abbildung 4.7) zeigt sich, dass selbst bei Defokussierungen größer 26 mm im Vergleich zu Pulslängen um 15 ms die Noppenhöhe weiter bis zu 255 μm gesteigert werden kann.

Höhere Noppen lassen sich mit einer Vergrößerung der Defokussierung erreichen, wenn die Energie bei längerer Pulszeit, auch bei geringerer Intensität, zum Aufschmelzen des Materials ausreicht. Die Toleranz der Defokussierung ist dabei gering und eine Veränderung der Defokussierung um ± 2 mm bewirkt bereits eine deutliche Streuung der Noppenhöhe. Der Prozess verläuft stochastisch unterschiedlich und die Reproduzierbarkeit der Noppenhöhe ist nicht mehr gegeben.

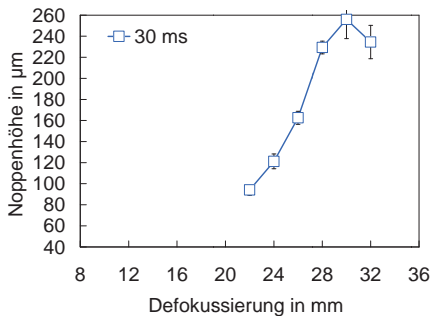


Abbildung 4.7: Noppenhöhe in Abhängigkeit der Defokussierung bei DC04 ohne Beschichtung bei einer Pulszeit von 30 ms.

Abbildung 4.8 fasst die Noppenhöhen bei unterschiedlichen Pulszeiten in Abhängigkeit der Defokussierung am Beispiel des unverzinkten Werkstoffes DC04 zusammen. Es lassen sich, nahezu unabhängig von der Pulszeit, über einen breiten Bereich der Defokussierung von $\Delta z = 16 - 24$ mm Noppen in etwa gleicher Höhe herstellen.

Vergleicht man weiterhin die Streuungen der Noppenhöhen bei den einzelnen Prozesszeiten, so ergibt sich hinsichtlich einer anzustrebenden konstanten Noppenhöhe ein idealer Parameterbereich von 20 ms Pulszeit und einer Defokussierung zwischen 22 und 26 mm.

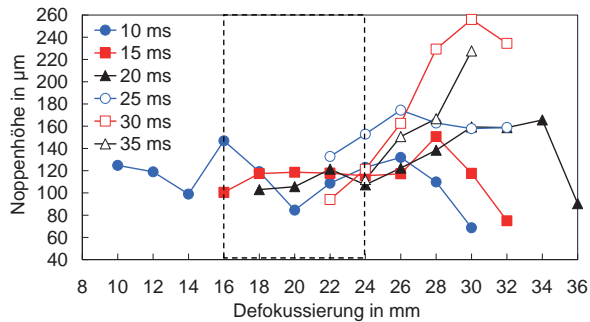


Abbildung 4.8: Noppenhöhe in Abhängigkeit der Defokussierung bei unterschiedlichen Pulszeiten bei DC04 ohne Beschichtung (aus Übersichtsgründen ohne Streuungen dargestellt).

4.2.1.2 Ergebnisse auf ZStE340, blank

Bei der Verwendung des unverzinkten ZStE340 stellen sich dagegen andere Ergebnisse der Noppenhöhe dar, sie sind bei diesem mikrolegierten Stahl geringer. Die Abbildung 4.9 zeigt die Ergebnisse bei gleichen Prozesszeiten wie bei dem DC04.

Bei einer Pulszeit von 10 ms kann nur bei einer Defokussierung von 14 mm eine akzeptable Noppenform und -höhe erreicht werden. Geringere Defokussierungen ergeben in Folge der hohen Intensität Krater mit scharfen Kanten oder Löcher. Dabei kommt es zur Ausbildung einer Dampfkapillare und eine Noppenentstehung wird verhindert. Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zeigen das Entstehen einer Dampfkapillare bei $z < 15$ mm ab ca. 8 ms Pulsdauer, Abbildung 4.10. Größere Defokussierungen als 16 mm ergeben bei einer Pulszeit von 10 ms keine Noppen mehr.

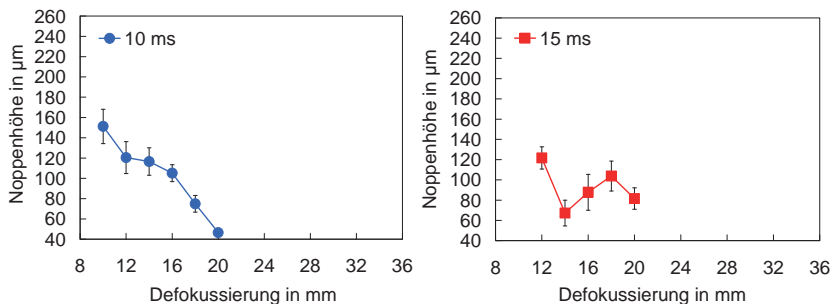


Abbildung 4.9: Noppenhöhen bei ZStE340, unverzinkt: Einfluss der Defokussierung und der Prozesszeit.



Abbildung 4.10: Hochgeschwindigkeits-Aufnahme einer Noppe bei $z=12$ mm, Zeitpunkt $t=8$ ms. Beginn der Entstehung einer Dampfkapillare und Schmelztransport in Richtung Rand.

Bei 15 ms Prozesszeit indessen können zwischen 16 und 20 mm Defokussierung reproduzierbare Noppen hergestellt werden. Die dabei erreichte Noppenhöhe liegt bei etwa $100\text{ }\mu\text{m}$ und stellt somit das Minimum einer möglichen Noppe für einen fehlerfreien Schweißprozess dar. Eine zusätzliche Prozessschwankung, weder beim Noppen, noch beim anschließenden Schweißen, ist daher für diesen Parameter nicht mehr tolerabel und führt zu Unregelmäßigkeiten der Schweißnaht.

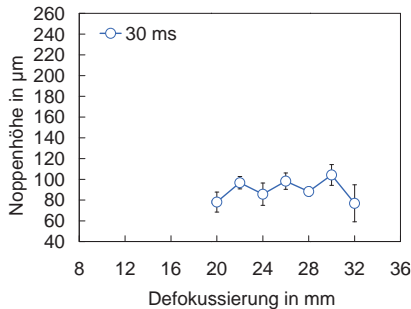


Abbildung 4.11: Noppenhöhe in Abhängigkeit der Defokussierung bei ZStE340 ohne Beschichtung bei einer Pulszeit von 30 ms.

Die Steigerung auf 30 ms Prozesszeit lässt die Noppenhöhe etwas unabhängiger von der Defokussierung erscheinen. Der Bereich zwischen $z = 22$ und 30 mm ergibt eine Noppenhöhe von ca. $100 - 110\text{ }\mu\text{m}$ und stellt somit ein großes und stabiles Prozessfenster dar, siehe Abbildung 4.11. Die Noppen sind trotz des langen Pulses im Vergleich zum DC04 bei vergleichbarer Prozesszeit nicht so hoch wie bei jenem.

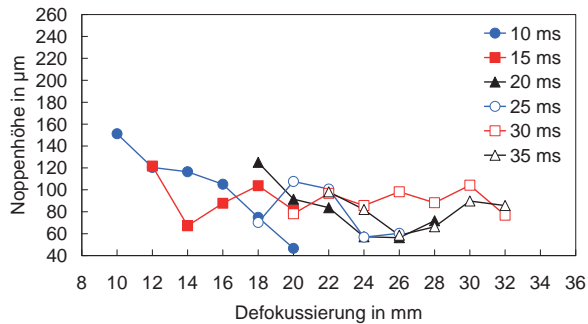


Abbildung 4.12: Noppenhöhe in Abhängigkeit der Defokussierung bei unterschiedlichen Pulszeiten bei ZStE340 ohne Beschichtung (aus Übersichtsgründen ohne Streuungen dargestellt).

Der Überblick für alle Prozesszeiten in Abbildung 4.12 zeigt, dass im Vergleich zum DC04 die Noppen wesentlich niedriger ausfallen. Ihre Höhe kann weder durch eine Erhöhung der Prozesszeit, noch durch eine Vergrößerung der Defokussierung über 140 μm gesteigert werden.

4.2.1.3 Zusammenfassung der Auswirkungen von Intensität und Pulsdauer

Grundsätzlich kann mit der Defokussierung, ohne die Pulszeit des Lasers zu verändern, also bei gleicher Energie, mittels des Prozessparameters Intensität die Noppenhöhe eingestellt werden. Dabei ergibt sich in einem begrenzten Parameterfeld bei einer Vergrößerung der Defokussierung eine Höhensteigerung der Noppe. Bei zu hoher Defokussierung wird kein oder zu wenig Material aufgeschmolzen, wodurch keine Noppenbildung mehr zustande kommen kann. Eine zu geringe Defokussierung, also eine zu hohe Intensität, führt zu einer Beschädigung des Bleches in Form einer tiefen, scharfen Kerbe oder eines Loches (siehe Abbildung 4.13).

Die Erklärung der hohen Werte bei geringer Defokussierung (10 mm bei einer Pulszeit von 10 ms in Abbildung 4.12) ist, dass an den Rändern der Kerbe meist ein Grat von Schmelze mit aufgeworfen wird und dieser die gemessene Erhebung darstellt; diese Art der Topografieänderung entspricht jedoch einer Noppenentstehung nach anderen Phänomenen, siehe Kapitel 4.3. Der dabei entstehende Grat ist beim Spannen der Bauteile nicht druckstabil genug, um den konstanten Entgasungsspalt zwischen den Blechen in erforderlicher Mindestgröße zu gewährleisten.

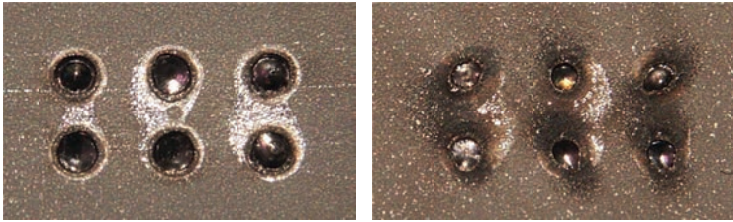


Abbildung 4.13: Keine reproduzierbare Noppenbildung bei zu hohen Intensitäten: 20 ms Pulslänge bei 10 mm Defokussierung, laserzugewandte Seite (links), Blechunterseite (rechts).

Betrachtet man den Durchmesser der Noppe, so nimmt dieser mit größerer Defokussierung zu. Der Brennfleck hat bei einer Defokussierung von 15 mm einen Durchmesser von 1,6 mm und erreicht bei einer Defokussierung von 25 mm einen Durchmesser von 2,6 mm. Die Intensität an seinem Rand bei der großen Defokussierung reicht nicht mehr zum Aufschmelzen des Bleches. Es wird lediglich die Zinkschicht entfernt, sodass der entzinkte Bereich um die Noppe bei großer Defokussierung zunimmt. Die Abbildung 4.14 zeigt diese Größenänderungen bei geometrisch gleicher Noppenmatrix, bestehend aus jeweils sechs Noppen.

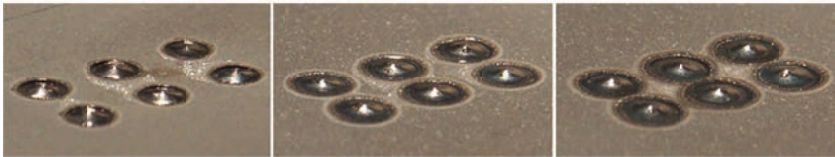


Abbildung 4.14: Änderung des Noppendurchmessers bei unterschiedlicher Defokussierung bei DC04, Pulszeit: 20 ms, Defokussierung 15 mm (links), 20 mm (mitte), 25 mm (rechts).

Ein weiterer, entscheidender Parameter ist die Prozesszeit. Steigt diese an, wird der Energieeintrag in den Schweißprozess erhöht und beeinflusst somit die Entstehung der Noppen maßgeblich.

Generell lassen sich bei längeren Prozesszeiten die Noppenhöhen steigern, eine Anpassung der Defokussierung kann dazu notwendig sein. Die Noppenhöhen bleiben in einem bestimmten Bereich der Pulszeiten weitgehend konstant und fallen bei zu hohen Energieeinträgen wieder ab. Die Schmelze reicht dann bis zur Blechunterseite und es entsteht ein Loch oder eine Blindschweißung.

Bei einer alleinigen Prozesszeitverlängerung sind nicht zwingend höhere Noppen zu erzielen. Es ist die Kombination von Prozesszeit und Defokussierung – also Intensität und Energiedichte – entscheidend für die Noppenentstehung. Ein direkter Vergleich verschiedener Prozesszeiten bei identischer Defokussierung ist daher für die Noppenhöhen nicht ausreichend.

4.2.2 Einfluss von Grundwerkstoff, Blechdicke und Beschichtung auf die Noppenhöhe

4.2.2.1 Einfluss der Stahlsorte

Der unterschiedliche Einfluss auf die Noppenhöhe von weichem DC04 und mikroleigiertem ZStE340 wird vor allem bei blankem – siehe vorigen Abschnitt – und feuerverzinktem Material deutlich. Die Noppenhöhe ist bei weichem Stahl mit gleichen Parametern im Mittel 15 μm höher als bei ZStE340, wie die Abbildung 4.8 und Abbildung 4.12 im Vergleich zeigen.

Auch die maximal erreichbare Noppenhöhe bei langer Prozesszeit und großer Defokussierung ist bei DC04 deutlich höher und liegt bei über 250 μm .

Bei dem Versuch, die Parameter, welche bei einem DC04 Stahl reproduzierbare Noppen ergeben, bei einem TRIP700 anzuwenden, stellt man fest, dass sich hier keinerlei Erhebung in Form einer Noppe ausbildet. Die Abbildung 4.15 zeigt einen Querschliff durch eine Noppenprobe mit Werkstoff TRIP700 mit Prozessparametern der defokussierten Prozessführung.

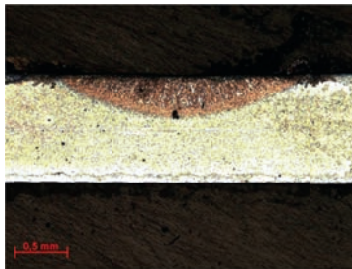


Abbildung 4.15: Keine Noppenbildung auf TRIP700 bei der Verwendung von Parametern für DC04 ($z = 20 \text{ mm}$, $t_p = 20 \text{ ms}$)

Da inzwischen in der Automobilindustrie eine breite Anwendung höchstfester Stähle für eine ausreichende Festigkeit der Fahrzeugstruktur notwendig ist, ist die Herstellung von Noppen auf diesen Stählen ebenfalls von Bedeutung, um Laserapplikationen auch bei diesen Werkstoffen realisieren zu können. Es müssen deshalb andere geeignete Schweißmuster zum Noppen entwickelt werden, um auch bei diesen Materialien einen Entgasungsspalt zu erzeugen. Die Parameterentwicklung für Noppen auf hochfesten Stählen wird in Kapitel 4.3 geschildert. Einzelne kaltgewalzte Stähle mit Streckgrenzen über 500 MPa zeigen indes entgegen der TRIP Stähle eine geringe Noppenbildung bei defokussierter Herstellungsmethode, die für einen anschließenden Schweißprozess zwar nicht ausreichend hoch, jedoch phänomenologisch vorhanden ist. In Kapitel 4.2.6 wird hierzu näher eingegangen.

4.2.2.2 Einfluss der Blechdicke

Die Blechdicke hat nur bei sehr dünnen Blechen (kleiner 0,8 mm) einen Einfluss auf die Noppenhöhe. Bei dünnen Blechen gestalten sich die Noppen etwas höher als bei Blechdicken größer 0,8 mm, dies gilt allerdings nur für geringe Energieeinträge.

Das Verhältnis Noppendurchmesser zu Einschweißtiefe bei Blechdicken um 0,8 mm ist kleiner als bei dickeren Blechen. In den Versuchen zeigt sich, dass ein Wert von kleiner vier zu einem instabilen Noppprozess führt. Daher sind bei dünnen Blechen nur Parameter mit geringem Energieeintrag zielführend. Überhöhte Pulszeiten führen zu Beschädigungen.

4.2.2.3 Einfluss der Beschichtung

Um den Einfluss der Beschichtung auf die Noppenbildung zu erfassen, werden drei Beschichtungszustände auf den beiden Materialien DC04 und ZStE340 untersucht. Die Abbildung 4.16 und Abbildung 4.17 zeigen die Noppenhöhen in Abhängigkeit der Beschichtung und der Pulslänge bei DC04 und ZStE340.

Bei DC04 fällt auf, dass die Noppenhöhe bei steigender Pulszeit auf blankem und auf feuerverzinktem Material bis 25 ms Pulszeit größer wird, bei 30 ms Pulszeit jedoch wieder geringfügig abfällt. Bei elektrolytisch verzinkter Oberfläche ist sie unabhängig von der Pulslänge und Energiedichte weitgehend konstant.

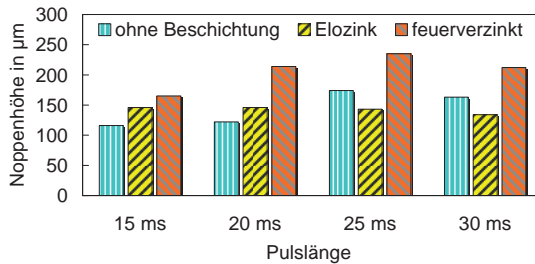


Abbildung 4.16: Noppenhöhe in Abhängigkeit der Beschichtung bei unterschiedlichen Pulszeiten für den Werkstoff DC04 bei einer Defokussierung von 22 mm.

Werden diese Versuche mit beschichtetem ZStE340 durchgeführt, verhalten sich die Noppenhöhen völlig unterschiedlich bei unterschiedlicher Pulszeit. Auf diesem Werkstoff spielt der Oberflächenzustand nur eine geringe Rolle und die Noppenhöhen liegen deutlich unter den Werten des DC04 Stahls.

Es zeigt sich also, dass die Noppenhöhe nicht nur abhängig vom Grundmaterial, sondern auch von der Art der Beschichtung – die unter anderem auch das Absorptionsverhalten beeinflusst – ist und das konkrete Ergebnis von der Materialkombination abhängt. So ist insbesondere die Schwankung der Noppenhöhe bei ZStE340 unabhängig von der Beschichtung bei Pulszeiten von 25 und 30 ms deutlich geringer als bei dem Werkstoff DC04.

Mit elektrolytischen Beschichtungen treten indes nur relativ geringe Unterschiede zwischen beiden Grundwerkstoffen auf, was zur Vermutung führt, dass deren Eigenschaften eine besondere Rolle bei der Energieeinkopplung und –umsetzung spielen.

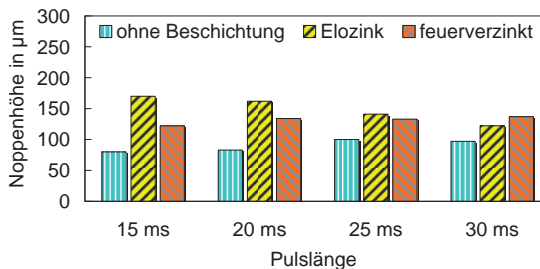


Abbildung 4.17: Noppenhöhe in Abhängigkeit der Beschichtung bei unterschiedlichen Pulszeiten für den Werkstoff ZStE340 bei einer Defokussierung von 22 mm.

Ein Hinweis, dass die Beschichtung innerhalb der ersten Millisekunden diskret abgetragen wird und die restliche Pulszeit für das Aufschmelzen der Stahloberfläche und damit zur Noppenentstehung genutzt werden kann, wird aus den Diagrammen nicht ersichtlich. Diese Thematik wird in Abschnitt 4.2.6 mit Hilfe von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen diskutiert.

4.2.3 Einfluss des Einstrahlwinkels auf die Noppenhöhe

In der Realität einer Serienfertigung lassen sich Bauteile nicht immer mit einem Einstrahlwinkel von 90° gegenüber der Horizontalen schweißen. Zudem können sich in der Produktion bei Schrägeinstrahlung Möglichkeiten zur Taktzeitoptimierung in Folge gleichzeitiger Bearbeitung mehrerer Flansche ergeben. Von besonderer Bedeutung ist daher eine Untersuchung, welchen Einfluss der Einstrahlwinkel auf die Noppenhöhe ausübt.

Bei der Noppenherstellung unter Schrägeinstrahlung ist es wichtig, Richtung und Toleranz der Defokussierung zu definieren. Eine Abstandsänderung zwischen Bauteil und Optik hat auch eine Positionsänderung der Noppe zur Folge und beeinflusst somit möglicherweise den nachfolgenden Schweißprozess.

Die Fokusfläche verändert sich auf Grund geometrischer Gesetzmäßigkeiten von kreisförmig bei senkrechter Einstrahlung in eine elliptische Form bei nicht senkrechter Einstrahlung. Eine geringe Änderung des Einstrahlwinkels hat keine gravierende Abweichung der Noppengeometrie zur Folge, was aus Abbildung 4.18 hervor geht. Das Diagramm veranschaulicht die Noppenhöhenänderung in Abhängigkeit des Einstrahlwinkels am Beispiel DC04 mit einer Blechdicke von 1,0 mm bei unterschiedlichen Beschichtungen. Vermessen wurden jeweils zehn Noppen bei jeder Einstrahlwinkleinstellung, und aus diesen Ergebnissen wurde die Durchschnittshöhe gebildet.

Bei einer Einstrahlwinkeländerung bis zu 35° gegenüber der Vertikalen kann eine hohe Winkeltoleranz für die Positioniergenauigkeit zwischen Werkstück und Bearbeitungsoptik abgeleitet werden. Auffallend ist die geringe Streuung der Noppenhöhe in diesem Bereich, wo die Form des Brennflecks bis zu diesem Winkel keine entscheidende Rolle spielt. Die Noppenhöhen bilden sich nach diesem Versuch in ausreichender Höhe aus.

Mit zunehmendem Winkel verändert sich jedoch die Noppenform: je größer der Winkel, desto ovaler wird die Noppe auf der Blechoberfläche, was ebenfalls keinen Einfluss auf den nachfolgenden Schweißprozess hat. Stichversuche zeigen, dass selbst bei

einem Einstrahlwinkel bis 60° Noppen möglich sind, wobei allerdings eine Parameteranpassung von Pulszeit und Defokussierung notwendig ist. Es ergeben sich dabei geringere Toleranzfelder, insbesondere für die Defokussierung.

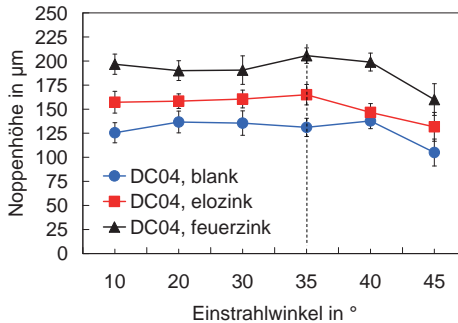


Abbildung 4.18: Noppenhöhe in Abhängigkeit des Einstrahlwinkels gegenüber der Vertikalen, Werkstoff DC04, Pulszeit von 20 ms, Defokussierung von 22 mm.

Unter Berücksichtigung des scannerbedingten Strahlablenkwinkels von etwa 6° gegenüber dem Normal bei maximaler Spiegelauslenkung ist für die Herstellung von Oberflächenrippen in der Fertigung ein Grenzwinkel von 30° Bauteilneigung gegenüber dem Lot von Bearbeitungsoptik und Werkstück festzulegen und zu tolerieren (Abbildung 4.19). Damit liegt man weitgehend in dem nach Abbildung 4.18 tolerierbaren Winkelbereich.

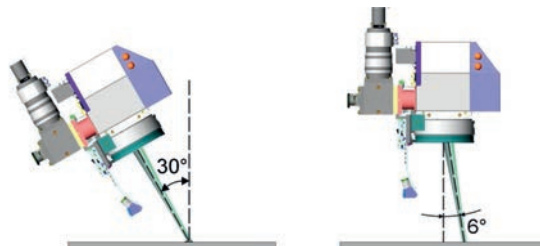


Abbildung 4.19: Geometrische Darstellung des Einstrahl-Grenzwinkel von maximal 30° beim Lasern (links), vom Scanner bedingter Strahlablenkwinkel von 6° bei maximaler Spiegelauslenkung (rechts).

4.2.4 Einfluss verschiedener Umgebungsbedingungen auf die Noppenhöhe

Um die Gesetzmäßigkeiten zur Noppenentstehung und deren Einflussgrößen besser zu verstehen, wurden Umgebungsbedingungen wie Temperatur des Werkstoffes, Gasatmosphäre und Bauteilbewegungen als weitere Einflussfaktoren während des Lasernoppens untersucht.

4.2.4.1 Grundtemperatur des Materials

In einer weiteren Versuchsreihe wurde der Temperatureinfluss auf die Noppenhöhe untersucht. Die Oberflächennoppen wurden auf ein 1,0 mm dickes DC04-Blech ohne Beschichtung zuerst bei Raumtemperatur geschweißt; zunächst je zehn Noppen mit größerem Abstand zueinander, damit die Temperaturerhöhung des Werkstoffes auf Grund der prozessbedingten Wärmeeinbringung keinen Einfluss hat.

Anschließend wurde das Blech gleichmäßig auf 120°C, 190°C und 250°C erwärmt, und es wurden bei diesen Temperaturen die Oberflächennoppen mit unveränderten Parametern geschweißt. Die Temperatur wird unmittelbar vor dem Schweißvorgang mit einem digitalen Handthermometer mit Oberflächenfühler und etwas Wärmeleitpaste gemessen.

Wie Abbildung 4.20 zeigt, verändert sich die Noppenhöhe zwischen Raumtemperatur und 120°C nur unwesentlich, dabei ist die Streuung der Noppenhöhe bei 120°C etwas größer. Bei weiterer Temperatursteigerung nimmt auch die Noppenhöhe weiter zu, und es ergibt sich bei den beiden untersuchten hohen Temperaturen ein Streuungsmaximum von $\pm 15 \mu\text{m}$. Diese Streuung ist damit nicht höher, als beim Noppprozess unter Raumtemperatur.

Dieses Phänomen des Noppenzuwachses bei steigender Temperatur ist dadurch erklärbar, dass die bereits im Werkstück vorhandene Energiemenge sich zur eingestrahlten Energie aufaddiert. In gewisser Weise entspricht eine höhere Grundtemperatur einem zusätzlichen Energieeintrag durch Leistungssteigerung des Lasers oder einer Pulszeitverlängerung.

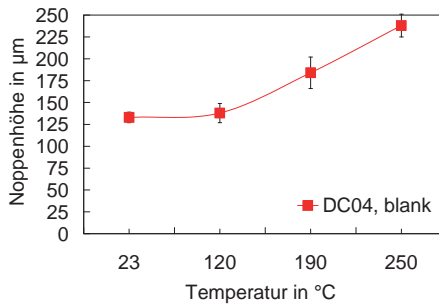


Abbildung 4.20: Noppenhöhe in Abhängigkeit der Werkstofftemperatur für den Werkstoff DC04 (blank) bei einer Pulszeit von 20 ms und einer Defokussierung von 22 mm.

4.2.4.2 Noppenbildung unter Gasatmosphäre

Für den Noppenentstehungsmechanismus sind bisher im Wesentlichen Prozesszeit und Intensität genannt. Vergleicht man die Ergebnisse auf den beiden weicheren Stählen DC04 und ZStE340 mit jenen des TRIP Werkstoffes, so müssen hier weitere Faktoren bzw. Phänomene von Bedeutung sein. Ohne bisher darauf eingegangen zu sein, wird von einem entscheidenden Einfluss der Oberflächenspannung bei der Noppenentstehung ausgegangen, was durch unterschiedliche Umgebungsatmosphären untermauert werden kann.

Auf Grund der Eigenschaften von Zusatzgasen kann ein Effekt der Oberflächenspannung flüssiger Metalle z.B. durch Helium oder Argon erheblich beeinflusst werden [82], indem diese die Wirkung oberflächenaktiver Elemente, wie z.B. Sauerstoff, reduzieren oder unterbinden. In der Literatur sind zum Thema Beeinflussung der Oberflächenspannung entsprechende Artikel zu finden. So wird in [83] beschrieben, dass mit speziellen Prozessgasen die Oberflächenspannung einer Metallschmelze gezielt verändert werden kann.

Die Versuche zum Lasernoppen bei DC04 unter Schutzgasabdeckung zeigen, dass sowohl unter einer Helium-, als auch unter einer Argonabschirmung keine Noppen entstehen. Bei der Zuführung von Helium oder Argon während des Noppvorgangs auf TRIP700 mit gleich bleibender Parametrierung entstehen ebenfalls keine Noppen. In [84] werden ebenfalls metallische Schmelzen bei unterschiedlicher Gaszuführung behandelt.

4.2.4.3 Einfluss von Bahnungenauigkeiten

Selbst bei kleinsten Vibrationsbewegungen von Bauteil oder Roboter während des Lasernoppens überstreicht der Brennfleck des Laserstrahls eine größere Fläche des Bearbeitungsfeldes als mit den vorgegebenen Parametern gewünscht. Die Energieeinbringung des Laserstrahls erfolgt somit auf eine größere Fläche. Auf Grund der sehr kurzen Prozessdauer ist daher ein örtlich veränderlicher Energieeintrag in das Werkstück zu erwarten.

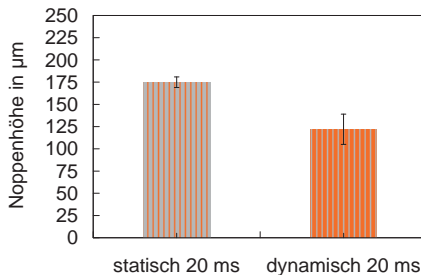


Abbildung 4.21: Vergleich der Noppenhöhe bei statischem und vibrierendem Bearbeitungssystem (dynamisch) auf DC04 blank bei 20 ms Prozesszeit und einer Defokussierung von 22 mm.

Ergebnisse von Stichversuchen, bei denen der Roboterarm während des Noppvorganges in eine leichte Schwingung versetzt wurde, sind in Abbildung 4.21 dargestellt. Amplitude und Frequenz der Schwingung wurden messtechnisch nicht exakt erfasst, die Amplitude beträgt etwa einen Millimeter auf der Werkstückoberfläche. Man erkennt, dass die Noppenhöhe dabei um bis zu 30 % geringer wird und die Streuung der Höhe ebenfalls zunimmt, da es sich um keine reproduzierbaren Umgebungsbedingungen handelt.

In der Praxis sind derartige Schwingungen an den handelsüblichen Serienrobotern bei einer Bauteilüberfahrt allerdings nicht in diesem Maße zu erwarten.

4.2.5 Zusammenfassung der experimentell festgestellten Einflussgrößen auf die Noppenhöhe

Die prozessseitigen Parameter wie Größe der Defokussierung und Pulszeit, welche bei konstanter Leistung die Intensität sowie die Energiedichten ergeben, sind für das Lasernoppen die wichtigsten Stellgrößen. Änderungen der Prozesszeit und der Defokussierung wirken sich in ihren physikalischen Einflüssen unterschiedlich auf die Noppenhöhe aus und haben zu beachtende fertigungstechnische Konsequenzen:

- Zu viel Energie kann zu Durchschüssen oder scharfkantigen Kratern auf der Blechoberfläche führen.
- Die Streuung der Noppenhöhe wird außerhalb des Prozessfensters einer optimalen Kombination von Pulszeit und Defokussierung größer.
- Eine längere Prozesszeit, also höhere Energiedichte, bedeutet nicht zwingend höhere Noppen.
- Mit geringerer Defokussierung muss auch die Prozesszeit und damit die Energiedichte reduziert werden, um einen optimalen Noppenentstehungsprozess zu gewährleisten.

Der Grundwerkstoff selbst wie auch sein Beschichtungszustand sind für die Höhe der Erhebungen entscheidend. Es zeigt sich, dass Noppen auf härtesten Materialien niedriger ausfallen, als auf weichen Stählen wie dem DC04. Bei feuerverzinkten Materialien ergeben sich die höchsten Noppen, unabhängig vom Grundwerkstoff. Sind Lasernoppen auf härtesten Stählen wie beispielsweise auf TRIP700 erforderlich, muss ein anderer Prozess realisiert werden. Dieser wird in Kapitel 4.3 diskutiert.

Der Noppenprozess ist gegenüber einem Einstrahlwinkel bis zu 35° tolerant, ohne dass sowohl die Höhe der Noppen, als auch die Streuung auf ein nicht akzeptables Maß ansteigt.

Bei der Verwendung eines Schutzgases ist darauf zu achten, dass Gase wie Helium und Argon die Noppenbildung negativ beeinflussen oder gar verhindern. Daher ist die Zuführung von Schutzgasen während des Lasernoppens zu vermeiden.

Da Noppen mit einem kurzen Laserpuls zu erzielen sind, ist eine Bauteilbewegung oder eine Vibration der Bearbeitungsanlage während des Noppvorganges ebenfalls zu vermeiden.

Für das physikalische Verständnis ist die Noppenhöhe damit eine Funktion der Laserleistung, des Fokusdurchmessers und der Pulszeit. Ganz offenkundig spielt zudem der werkstoffspezifische Wert der Oberflächenspannung (σ) eine wichtige Rolle. Demgemäß stellt sich die erzielbare Noppenhöhe in Abhängigkeit zu optimierender Prozessparameter und vorgegebener Werkstoffeigenschaft dar:

$$h_N = f(P_L, d_f, t_P, \sigma). \quad (4.5)$$

4.2.6 Noppenentstehung

Diskutiert wird im Folgenden die Entstehung einer Lasernoppe. Zunächst werden die zeitliche Entstehung und die geometrische Form der Noppe beschrieben sowie im Anschluss daran Mechanismen zur Noppenentstehung diskutiert.

4.2.6.1 Zeitliche Entstehung

Um die zeitliche Entstehung einer Noppe zu erfassen, wurden mit einer Hochgeschwindigkeitskamera Aufnahmen bei einer Bildwiederholrate von 5000 Bildern pro Sekunde und einer Videogröße von 512 x 100 Pixel realisiert. Nur aus einer geeigneten flachen Kameraperspektive, wie in Abbildung 4.22 dargestellt, können bei einer Gesamtbrennweite von 360 mm sehr gute Ergebnisse zur Veranschaulichung der Noppenentstehung erzielt werden.

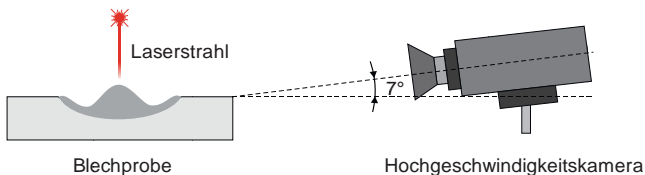


Abbildung 4.22: Aufnahmeposition der Hochgeschwindigkeitskamera unter 7° Neigung zur optimalen Darstellung der zeitlichen und geometrischen Noppenentstehung.

Die Aufnahmen umfassen alle in dieser Arbeit verwendeten Stähle bei Variation der Pulszeit und der Defokussierung. Bei den Stählen DC04 und ZStE340 sind bei der Noppenentstehung, abgesehen von der letztendlichen Noppenhöhe, kaum Unterschiede feststellbar. Es werden daher die Sequenzen mit ZStE340 mit elektrolytischer Verzinkung verwendet.

Die zeitliche Entstehung einer Noppe kann nach Auswertung der Hochgeschwindigkeitsfilme wie folgt in drei Phasen gegliedert werden:

- Einschalten und Auftreffen des Laserstrahls, Verdampfung der Zinkschicht und Einkopplung in das Grundmaterial
- Aufschmelzen des Bleches (Laser eingeschaltet)
- Erstarrungsvorgang (Laser ausgeschaltet)

In der ersten Phase ist zunächst in Bild 1 der Standbilder innerhalb der Videosequenz in Abbildung 4.23 das Auftreffen des Laserstrahls, einhergehend mit einer Verdampfungswolke aus Zink, zu sehen. Die Dauer dieser sichtbaren Verdampfung beträgt 11 Frames, was einer Zeit von 0,0022 s entspricht. In Bild 2 wird an den Randbereichen teilweise noch die Zinkschicht verdampft, während in der Mitte der Bearbeitungszone bereits die Schmelztemperatur des Grundwerkstoffes erreicht wird und ein kleines Schmelzbad zu sehen ist.

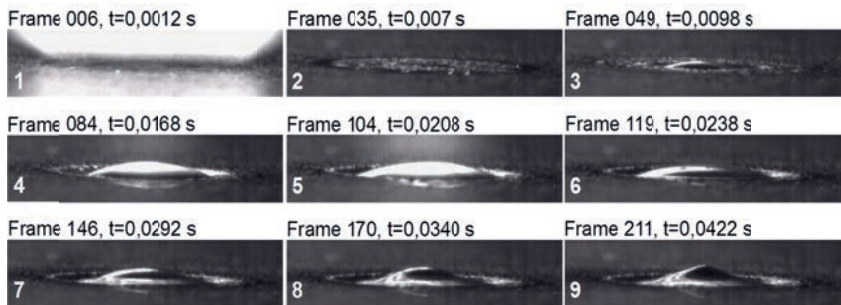


Abbildung 4.23: Sequenz einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme: zeitliche Entstehung einer Noppe auf dem Werkstoff ZStE340. Pulszeit: 20 ms, Defokussierung 20 mm. Bild 1–5: Laserstrahl an, Bild 6–9: Laserstrahl aus.

Die Phase zwei – das „großflächige“ Aufschmelzen von Material – setzt ab dem Frame 36 ein. Zu dessen besserer Erkennung wird Frame 49 – Bild 3 – innerhalb der Sequenz dargestellt. Es bildet sich ein zentriertes Schmelzbad aus, welches mit steigender Zeit sowohl im Durchmesser, als auch in der Aufwölbung größer wird – Bilder 4 und 5. Die Fläche und die Höhe des Schmelzbades erreichen kurz vor Ausschalten des Lasers, nach Bild 5, einen Maximalwert.

Die Erstarrung nach Pulsende, welche in den Bildern 6 bis 9 zu sehen ist, stellt die dritte Phase dar. Direkt nachdem der Laser abgeschaltet wird, ist zunächst eine Reduzierung der Schmelzüberhöhung zu erkennen, während der weiteren Abkühlung die Höhe wieder zunimmt. Dabei wird das Zentrum der Noppe im Verlauf der Erstarrung zunehmend spitzer und erreicht bei vollständiger Erstarrung ihre maximale Höhe.

Die genaue Beobachtung einer Filmsequenz zeigt, dass die Form der noch flüssigen Schmelze immer annäherungsweise einer Kugeloberfläche gleicht. In der Folge wird bei Erstarrung der Restschmelze diese Form zu jedem Zeitpunkt zu einer Kugeloberfläche mit stetig kleiner werdendem Radius $r(t)$, ein untrügliches Indez für das Wirken der Oberflächenspannung. Schließlich verbleibt eine "spitzige" Erstarrungsform, welche die typische Endgeometrie einer Lasernoppe aufweist. Die Abbildung 4.24 zeigt die unterschiedlichen Oberflächenradien der noch schmelzflüssigen Noppe während der Entstehung und das Noppenwachstum. Ebenso ist die bereits vom äußeren Rand her erstarrte ringförmige Schmelze in der Breite dargestellt.

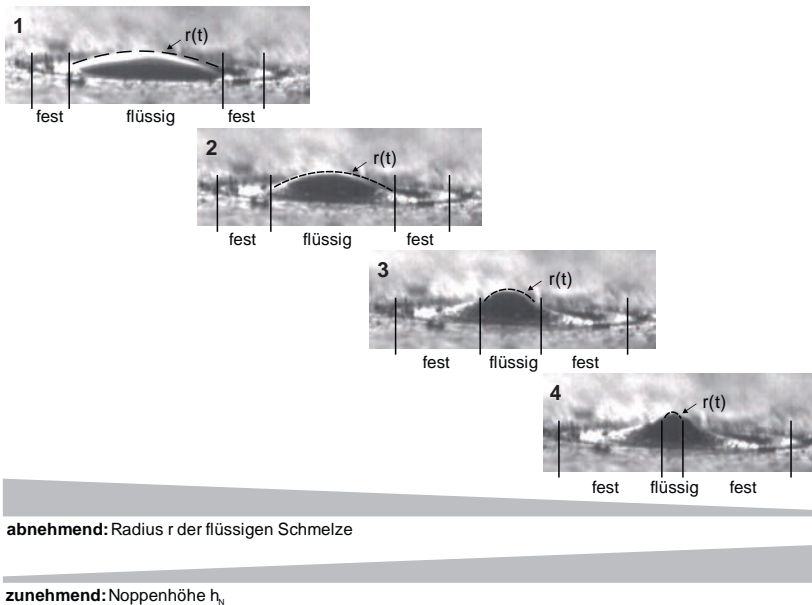


Abbildung 4.24: Noppenentstehung während der Erstarrung der Schmelze; Radienentwicklung $r(t)$ der Restschmelze einer Noppe. Werkstoff ZStE340, Pulszeit: 20 ms, Defokussierung 20 mm.

Die Abbildung 4.25 stellt den qualitativen Verlauf der Noppenhöhe über der Pulszeit und der Abkühlungsphase dar. Die vollständige Erstarrung bei der Pulszeit von 20 ms und Defokussierung von 20 mm (Abbildung 4.24) ist nach einer Zeit von etwa 0,05 s, bezogen auf den Einschaltzeitpunkt des Lasers, erreicht. Bei einer Defokussierung von 10 mm hingegen dauert es 0,03 s, bis die Noppe erstarrt ist. Hingewiesen sei, dass in der Schlussphase der Erstarrung sich die Noppenhöhe nicht mehr ändert.

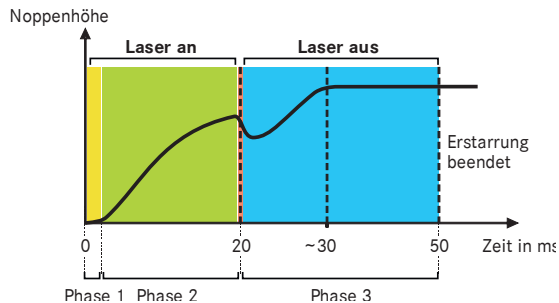


Abbildung 4.25: Qualitative Entwicklung der Noppenhöhe in Abhängigkeit der Zeit

Auffallend ist, dass mit Pulszeiten um 10 ms und bei einer zu geringen Defokussierung, also hoher Intensität, der Schmelztropfen nach dem Abschalten des Lasers stark in seiner Höhe vibriert und es durch die Schmelzbadbewegungen zu einer stärkeren Höhenschwankung der Noppen nach dem Abkühlvorgang kommen kann. Dies zeigt die Noppenentstehung bei einer Defokussierung von nur 10 mm und 15 ms Pulszeit in Abbildung 4.26. Der Kollaps der hier offensichtlich entstandenen Dampfkapillare führt zu Schwingungen im Schmelzbad. Die Erstarrung verläuft damit stochastischer, wenn das Schmelzbad dadurch stark in Eigenbewegung versetzt wird.

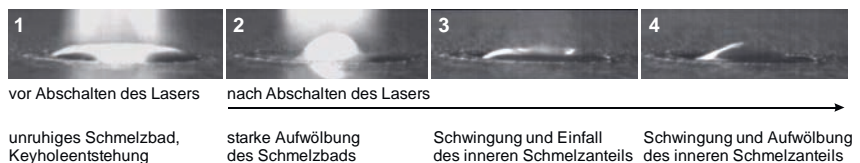


Abbildung 4.26: Instabile Noppenentstehung bei einer Defokussierung von 10 mm und einer Pulszeit von 15 ms.

Bei zu geringer Defokussierung sind zusätzlich Spritzer und eine hohe Schmelzbaddynamik zu erkennen, während der Prozess unter idealen Parametern wie bei der in Abbildung 4.23 beschriebenen Filmsequenz, sehr ruhig verläuft.

4.2.6.2 Noppenform

Die Bestimmung der Noppenform erfolgt mit Hilfe von Querschliffen und mittels dreidimensionalen Oberflächenmessungen. In Abschnitt 4.2.2 stellte sich heraus, dass bei den elektrolytisch verzinkten Materialien DC04 und ZStE340 bei einer Pulslänge von 25 ms und einer Defokussierung von 22 mm ähnliche Noppenhöhen entstehen. Diese Kombinationen aus Material und Laserparametern stellt für den folgenden Vergleich die Referenz dar.

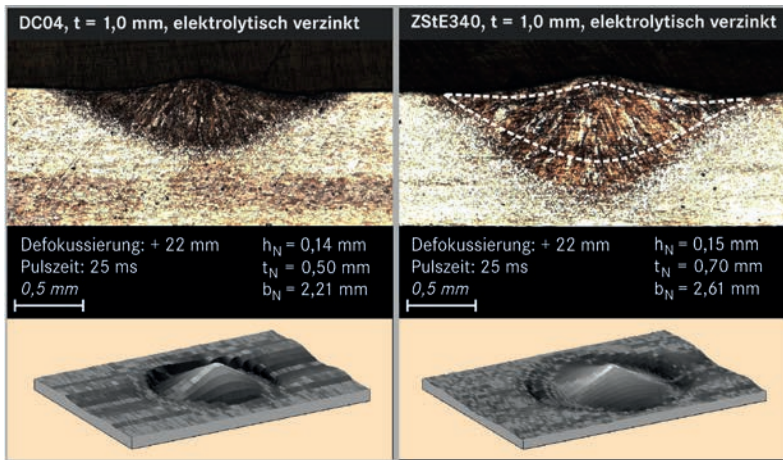


Abbildung 4.27: Vergleich der Noppenformen: Querschliffe und 3D-Vermessungen von Lasernoppen auf DC04 (links) und auf ZStE340 (rechts); h_N beschreibt die Noppenhöhe, t_N die Einschweißtiefe und b_N den Noppendurchmesser. Im oberen rechten Bild ist die Querschnittsfläche der Noppe auf DC04 zum besseren Vergleich gestrichelt eingezeichnet.

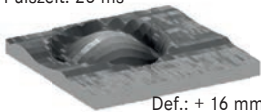
Die Auswertung der Noppenformen in Abbildung 4.27 ergibt eine tiefere Einschweißung und einen größeren Durchmesser der Noppe für den Werkstoff ZStE340. Der Unterschied ist durch eine rund 30% geringere Wärmeleitfähigkeit des mikrolegierten ZStE340 (siehe Kapitel 3.2.1, Tabelle 3.1) zu erklären. Dadurch entsteht eine Art "Wärmestau", was die Vergrößerung des Schmelzbades in ähnlicher Größenordnung bewirkt. Die Vermessung der Noppengeometrie bei kürzeren Pulsen, unabhängig von der Defokussierung, ergibt auf beiden Stählen qualitativ die gleichen Resultate.

Vergleicht man bei Pulszeiten um 25 ms und variierender Defokussierung die Noppenform der beiden Stähle, so werden die Noppen mit größerer Defokussierung auf DC04 höher und spitzer als auf ZStE340.

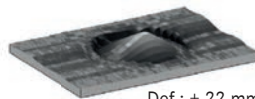
Die geringere Wärmeleitfähigkeit des ZStE340 macht sich auch hier bei geringen Prozesszeiten und geringer Defokussierung bemerkbar. So erhält man bei 25 ms Pulszeit und einer Defokussierung von 16 mm einen tiefen Krater mit vollständiger Durchschweißung, während bei DC04 mit gleichem Parameter eine akzeptable Noppe mit einer Höhe von 100 μm entsteht. Die Abbildung 4.28 zeigt den Einfluss der Defokussierung auf die Noppenform für beide Materialien bei einer Pulszeit von 25 ms. Betrachtet man die Einbrandtiefe, welche kreisförmig um die Noppe verläuft, so ist diese bei DC04 gegenüber ZStE340 mit schärferen Kanten versehen. Die Einbrandtiefe selbst unterscheidet sich jedoch nur unwesentlich.

DC04, $t = 1,0 \text{ mm}$, elektrolytisch verzinkt

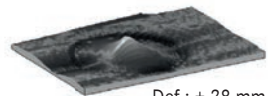
Pulszeit: 25 ms



Def.: + 16 mm



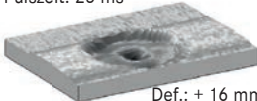
Def.: + 22 mm



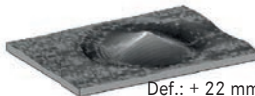
Def.: + 28 mm

ZStE340, $t = 1,0 \text{ mm}$, elektrolytisch verzinkt

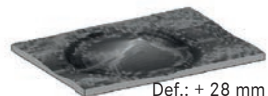
Pulszeit: 25 ms



Def.: + 16 mm



Def.: + 22 mm



Def.: + 28 mm

Abbildung 4.28: Vergleich der Noppengeometrien bei unterschiedlichen Defokussierungen auf DC04 und ZStE340 (jeweils elektrolytisch verzinkt), Pulszeit: 25 ms.

4.2.7 Mechanismus der Noppenentstehung

Für die Noppenentstehung bei defokussierter Prozessführung können nach den oben präsentierten Ergebnissen zunächst folgende Thesen formuliert werden:

- Die Noppenentstehung beruht allein auf der Ausdehnung durch Gefügeumwandlung des Materials und der dadurch verbleibenden Volumenvergrößerung des aufgeschmolzenen Bereiches.
- Die Noppenentstehung erfolgt durch konvektiven Materialtransport als Konsequenz der Temperaturabhängigkeit des Koeffizienten der Oberflächenspannung im Schmelzbad und des in der Schmelzbadoberfläche existierenden Temperaturgradienten, sie ist eine Folge einer geometrischen „Umverteilung“ des Materials.

Nach genauerer Betrachtung einer Noppe kann die erste These ausgeschlossen werden. Die Abbildung 4.29 veranschaulicht die Noppenentstehung zu dieser These: Der charakteristische Formzuwachs ΔV entspricht in keiner Weise der aus Querschliffen folgenden Form, und zudem steht die Flächenaddition der Querschleiffanteile $\Delta V + V_2$ der These entgegen. Denn nachgewiesen werden lediglich eine Gefügeumwandlung und eine Steigerung der Härte im aufgeschmolzenen Bereich. Eine Vergrößerung des Volumens $V_1 + \Delta V$ nach These 1 ist nicht nachweisbar, sie bewegt sich bei den verwendeten Stählen im Bereich kleiner als $\Delta V/V_1 \approx 5\%$. Unter weiterer Berücksichtigung, dass Noppen unter Helium- und Argonabdeckung ausbleiben, ist die Noppenentstehung mit dieser These der Ausdehnung durch Gefügeumwandlung im Widerspruch zu physikalischen Gegebenheiten.

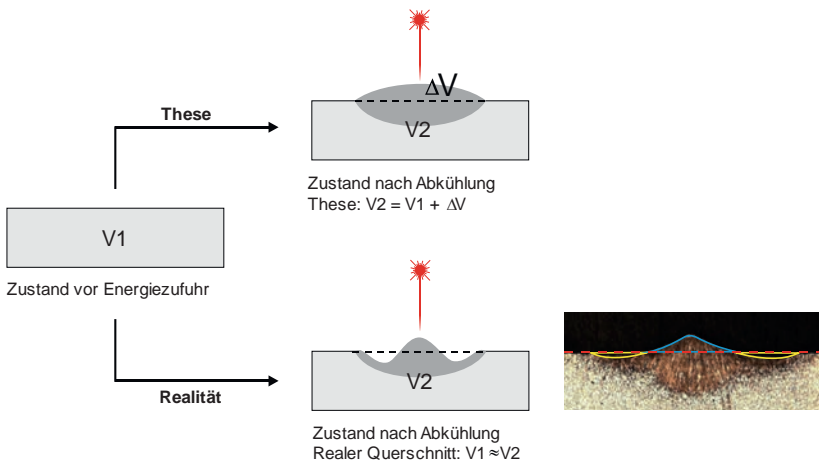


Abbildung 4.29: Qualitative Argumentation gegen eine Noppenentstehung durch Volumenvergrößerung in Folge Gefügeumwandlung während des Erstarrungsvorgangs. V_1 entspricht dem Volumen vor der Energiezufuhr, V_2 dem Volumen nach der Energiezufuhr und ΔV dem Zuwachs des Volumens nach der Energiezufuhr.

Es werden nun im Folgenden einige qualitative Deutungshinweise aufgeführt, ohne auf Details einzugehen bzw. Quantifizierungen zu versuchen. Damit soll gezeigt werden, dass die zweite These zur Noppenentstehung, nämlich die Wirkung der Oberflächenspannung, eine plausible Erklärung darstellt.

Eigenschaften metallischer Schmelzen

Flüssige Stoffe, darunter auch metallische Schmelzen, können keine Zugspannungen übertragen, sie passen sich in ihrer Form der von außen einwirkenden Kräfte an. Dennoch kann in Schmelzen ein konvektiver Massentransport durch oberflächennahe Schubspannungen τ induziert werden, welche ihrerseits eine Konsequenz des temperatur- und materialabhängigen Koeffizienten der Oberflächenspannung ist [85]. Hierdurch entstehen in einem Schmelzbad oberflächennahe Strömungen.

Bei Schmelzschweißverfahren hat der temperaturabhängige Oberflächenspannungskoeffizient der Metallschmelze insbesondere beim Wärmeleitungsschweißen einen wesentlichen Einfluss auf die Ausbildung und Richtung der sogenannten Marangoni-Strömung, theoretische Betrachtungen hierzu sind beispielsweise in [4] diskutiert. So entstehen in Folge lokaler Änderung des Oberflächenspannungskoeffizienten Konvektionsströmungen von innen nach außen oder umgekehrt, die bei hinreichend tiefen Schmelzbädern zur Ausbildung von Wirbeln führen.

Gase in der Atmosphäre des Schweißprozesses und Legierungs- und Begleitelemente der Werkstoffe können den Koeffizienten der Oberflächenspannung von metallischen Schmelzen verändern [86]. Auch der räumliche Verlauf der Schmelzbadtemperatur hat einen Einfluss auf die Oberflächenspannung, weil dieser für den Temperaturgradienten maßgeblich ist. Der Anschaulichkeit halber seien diese Abhängigkeiten der Schubspannung für ein axialsymmetrisches Schmelzbad dargestellt: [1]

$$\tau_r = \frac{\partial \sigma}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial \sigma}{\partial k_e} \cdot \frac{\partial k_e}{\partial r} \quad (4.6)$$

Darin berücksichtigt der erste Term die Temperatur- und der zweite die Konzentrationsabhängigkeit k_e des Elements "e" vom Koeffizient der Oberflächenspannung σ am Ort "r".

Nachstehend seien Beispiele aus der Literatur angeführt, die zeigen sollen, wie sehr der Koeffizient der Oberflächenspannung von der Temperatur und den Legierungselementen abhängt. Es ist deshalb beim Lasernoppen auf die Materialzusammensetzung zu achten. Unterschiedliche Noppenentstehung bei gleichen Prozessparametern kann also auf entsprechende Zusatzstoffe wie unterschiedliche Elemente in der Umgebungsumgebung zurückzuführen sein.

Bei reinen Metallen ist der Oberflächenspannungsgradient negativ, also wird mit steigender Temperatur die Oberflächenspannung geringer, wie Kurve 1 in Abbildung 4.30

zeigt. In [87] wird die Oberflächenspannung einer Eisen-Schwefel Schmelze diskutiert, wobei der Einfluss von Konzentration und Temperatur anschaulich in Erscheinung tritt. Dabei ist $d\sigma/dk_S$ immer negativ, d.h. im gesamten Temperaturbereich nimmt σ mit steigendem k_S ab. Bei Schwefelkonzentrationen $dk_S > 0$ ppm wird $d\sigma/dT$ bei niedrigen Temperaturen positiv und bei hohen Temperaturen negativ. Ein ähnliches Verhalten wird in [88] für Sauerstoff festgestellt. Die gestrichelte Kurve gibt die konzentrationsabhängige Temperatur wieder, wo die Umkehr des Gradienten $d\sigma/dT$ erfolgt. Hieraus wird deutlich, dass bereits geringe Mengen an gelöstem Schwefel in einer Eisenschmelze den temperaturabhängigen Koeffizienten der Oberflächenspannung unterhalb einer bestimmten Temperatur von negativ bei Reineisen nach positiv umdrehen. Die Temperatur, wo dies stattfindet, ist umso niedriger, je geringer die Schwefelkonzentration ist.

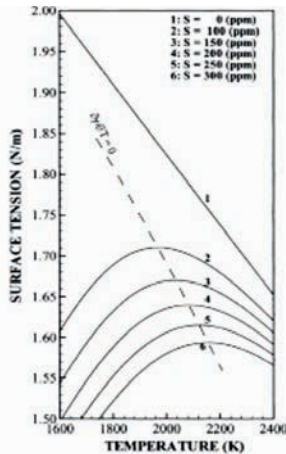


Abbildung 4.30: Theoretisch berechnete Veränderungen des Koeffizienten der Oberflächenspannung durch in Reineisen gelösten Schwefel [87]³

In Abbildung 4.31 [89] und Abbildung 4.32 [90] ist der Einfluss weiterer Stoffe auf die Oberflächenspannung bei Schmelztemperatur von Eisen aufgetragen. Insbesondere aus Abbildung 4.34 geht hervor, welchen Einfluss metallische Legierungselemente wie Molybdän, Vanadium und Mangan haben.

³ In den Abbildung 4.30 bis Abbildung 4.33 sind die Darstellungen aus den zitierten Arbeiten direkt übernommen. Sie stellen exakter Weise nicht die Oberflächenspannung, sondern den *Koeffizienten* der Oberflächenspannung [N/m] dar, während die Oberflächenspannung [N/mm²] selbst sich aus dessen Multiplikation mit dem räumlichen Gradienten [1/m] ergibt, siehe Gl. 4.6.

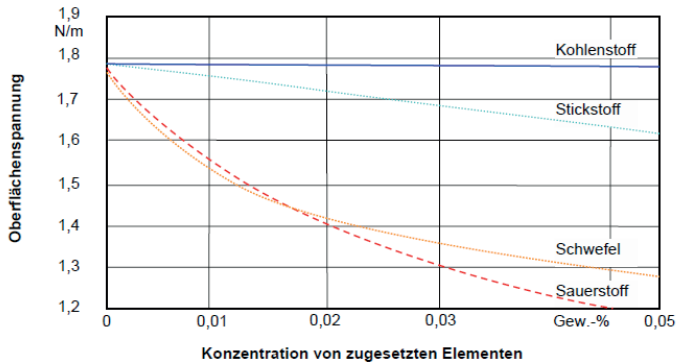


Abbildung 4.31: Einfluss von ausgewählten nichtmetallischen Elementen auf den Koeffizienten der Oberflächenspannung von Eisen [89].

Während die Abbildung 4.31 zeigt, dass die Anwesenheit von Sauerstoff und Schwefel auf Grund ihres großen Änderungseinflusses auf die Oberflächenspannung eine Erklärung für das Ausbleiben von Noppen bei Schmelzen in Edelgasatmosphäre sein kann, zeigt Abbildung 4.33 den Einfluss des Legierungselements Mangan, das in hochfesten Stählen enthalten ist und deshalb von Interesse hinsichtlich der nicht erfolgenden Noppenbildung mit defokussierter Herstellungsmethode bei TRIP 700 sein sollte.

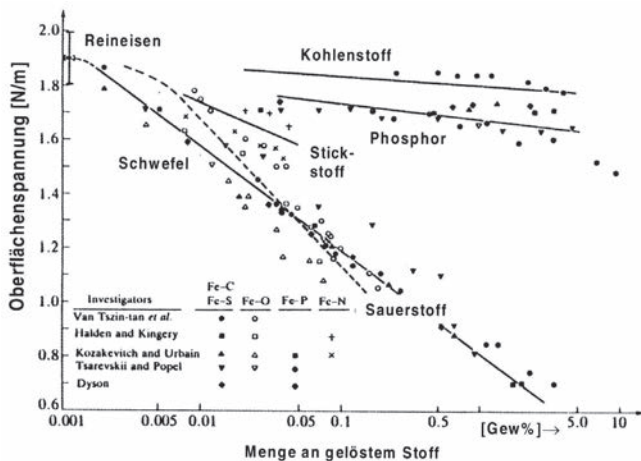


Abbildung 4.32: Veränderung des Koeffizienten der Oberflächenspannung durch in Reineisen gelöste Stoffe [90]; der hier untersuchte Konzentrationsbereich ist zwei Größenordnungen größer als jener in Abbildung 4.31.

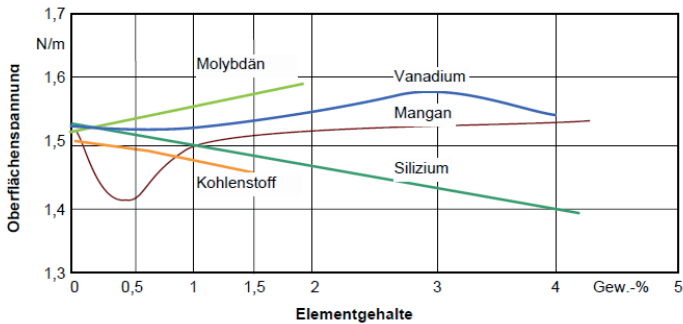


Abbildung 4.33: Einfluss von unterschiedlichen Legierungselementgehalten auf den Koeffizienten der Oberflächenspannung von Reineisen bei 1550°C [89].

Betrachtet man hierzu die chemischen Analysen von Werkstoffen weicher Tiefziehgüten bis hin zu höchstfesten Stählen, so stellt man fest, dass mit einer Steigerung des Mangangehalts die Festigkeit einhergeht. Die Abbildung 4.34 zeigt die chemische Analyse von unterschiedlichen Stahlgüten [91].

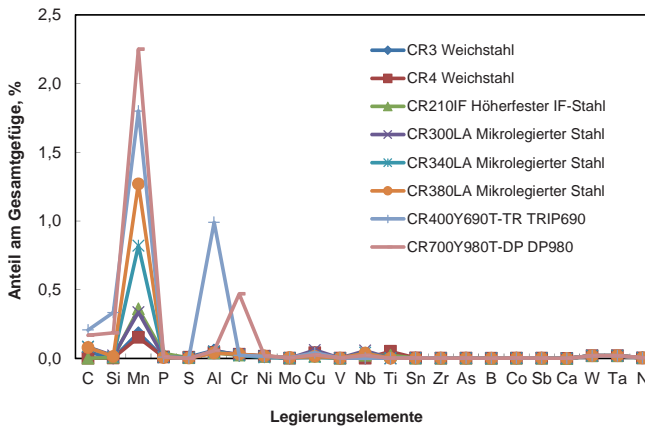


Abbildung 4.34: Chemische Analyse von unterschiedlichen Stahlgüten [91]

Aus Abbildung 4.33 ist zu entnehmen, dass ein Einfluss von Mangan nur in einem Bereich $0 < k_{Mn} \leq 1,5$ % zu erwarten und die Reduzierung der Oberflächenspannung bei rund 0,5 Gewichtsprozent am größten ist. Der untersuchte TRIP Stahl liegt jedoch mit ca. 2 Gewichtsprozenten Mangan und einer oberhalb 1,5 % näherungsweise glei-

chen wie bei Reineisen und konstant verlaufenden Oberflächenspannung weit außerhalb dieses Bereiches. Deshalb kann der Mangengehalt an sich keine wesentliche Änderung des Oberflächenspannungskoeffizienten bewirken. Eine mögliche Erklärung wird weiter unten im Absatz “Ausbleiben von Noppen bei TRIP 700” gegeben.

Noppenentstehung bei DC04 und bei ZStE340 bei defokussierter Herstellung

Alle bisherigen experimentellen Ergebnisse und Überlegungen weisen auf die zweite These zur Noppenentstehung hin. Auch bei diesem Prozess tritt im Schmelzbad eine Änderung des Oberflächenspannungskoeffizienten und damit eine Änderung der Oberflächenspannung mit der Temperatur auf. Eine Materialumverteilung nahe der Schmelzbadoberfläche in Folge einer dadurch induzierten Konvektion erscheint plausibel.

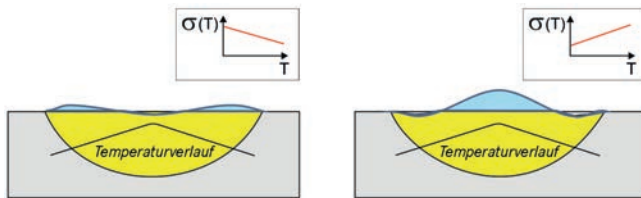


Abbildung 4.35: Ursache der Noppenentstehung: Temperaturabhängigkeit des Oberflächen­spannungskoeffizienten, links: negativer Oberflächen­spannungskoeffizient, rechts: positiver Oberflächen­spannungskoeffizient.

Betrachtet man den Temperaturverlauf entlang des Schmelzbadradius – ausgehend von der Mitte der Bearbeitungszone – so fällt dieser nach außen hin ab. Man erhält deshalb bei positivem Oberflächen­spannungskoeffizient den größten Wert der Oberflächen­spannung in der Mitte und die geringste Oberflächen­spannung am Rand des aufgeschmolzenen Volumens. In Abbildung 4.35 rechts ist diese Situation qualitativ dargestellt. Nach Gl. 4.6 wird also eine Schubspannung τ induziert, die nach innen wirkend eine oberflächennahe Strömung verursacht und zur Materialansammlung in der Mitte führt – die Voraussetzung für die Entstehung einer Noppe.

In der Abbildung 4.35 links wirkt die Oberflächen­spannung in entgegen gesetzter Richtung, Schmelze wird nach außen transportiert, und infolge des Massenerhalts ist dort eine Überhöhung sehr viel geringer.

Eine Erklärung, warum Noppen auf einem DC04 Stahl höher sind im Vergleich zu denen auf einem ZStE340, könnten die Ergänzungen zur Abbildung 4.30 in Abbildung 4.36 liefern. Die beiden Punkte DC04 und ZStE340 sind keine gemessenen

Werte, die dienen nur zur qualitativen Veranschaulichung; die vertikal eingezeichnete gestrichelte Linie kennzeichnet den Bereich der Schmelztemperatur von Eisen. Bei unterschiedlichen Konzentrationen von Legierungselementen zwischen DC04 und ZStE340, wie hier z.B. Schwefel (siehe Tabelle 3.1), ist bei Schmelztemperatur der Koeffizient der Oberflächenspannung für DC04 zwar noch kleiner, doch dessen Gradient deutlich größer. Demzufolge erscheint die Schlussfolgerung plausibel, dass der höhere Schwefelgehalt bei DC04 zu einer stärkeren Konvektionsströmung verbunden mit einer größeren Noppenhöhe führen würde.

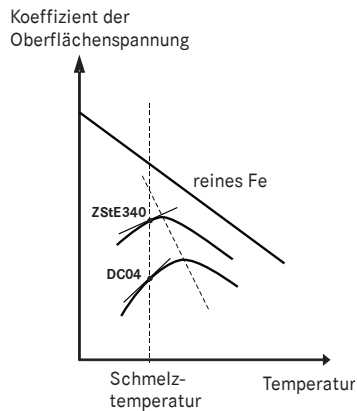


Abbildung 4.36: Qualitative Darstellung der unterschiedlichen Koeffizienten der Oberflächenspannung bei DC04 und ZStE340 und ihrer Temperaturabhängigkeiten.

Ausbleiben von Noppen bei TRIP 700 bei defokussierter Herstellung

Bei der Verwendung des höchstfesten TRIP700 müssen weitere Mechanismen wirksam werden, welche die oben diskutierten Effekte der Oberflächenspannung modifizieren bzw. unterdrücken.

Werden oberflächennahe Untersuchungen zur Bindung von Sauerstoff gemacht, stellt man fest, dass Mangan Oxide im Gefüge bildet. Weiterhin wird beispielsweise beim Schweißen von TRIP-Stählen im Rahmen eigener Untersuchungen eine Art Oxidhaut beobachtet, welche sich direkt hinter der Dampfkapillare – vergleichbar mit einem Aluminiumschweißprozess – bildet. Somit wird Sauerstoff aus der Umgebung an Mangan zu MnO_x gebunden, sodass die Oxidschicht auch die Entstehung einer oberflächennahen Strömung behindert. Ein ähnlicher Effekt wird auch in [1] beim Schweißen von Aluminium beobachtet und so gedeutet.

Des Weiteren hat der TRIP 700 einen Schwefelgehalt, der nur 50 % der Mengen in den beiden Stählen DC04 und ZStE340 beträgt, sodass auch Schwefel als oberflächen-aktives Element deutlich weniger Wirkung haben wird.

4.3 Noppenerzeugung im Modus des Tiefschweißens

Die Beobachtung einer Schweißnaht, welche als Blindschweißung in Fokusslage ausgeführt wird, zeigt nach der Erstarrung eine Überhöhung am Anfang der Naht. Dieses Phänomen wird hier zur Herstellung einer Oberflächennuppe genutzt. Im Folgenden werden Herstellung und Entstehungsmechanismen zum Noppen bei “fokussierter” Herstellungsmethode beschrieben, und es werden geeignete Parameter für eine reproduzierbare Noppenhöhe entwickelt.

4.3.1 Einfluss der Laserparameter auf die Noppenbildung

Bei der “fokussierten” Verfahrensvariante für Stähle mit hoher Streckgrenze benötigt man eine schnelle Strahlbewegung. Es wird hier zunächst ein kreisförmiges Schweißmuster eingesetzt, welches einen Durchmesser von wenigen Millimetern hat. Die Schweißung erfolgt stets in Fokusslage, d.h. der Strahldurchmesser d_f beträgt 680 μm .

Mit einer Abschätzung der erzielbaren Temperatur innerhalb des Brennflecks für einen Laserstrahl mit konstanter Intensitätsverteilung im kreisförmigen Querschnitt

$$T = T_0 + \frac{P}{d_f} \cdot \frac{A}{\lambda_{th} \cdot \pi^{\frac{3}{2}}} \cdot \frac{4}{\sqrt{\frac{Pe}{4} + 1,275}} \quad (4.7)$$

und der Peclet-Zahl

$$Pe = \frac{d_f \cdot v}{k} \quad (4.8)$$

nach [1] zeigt sich, dass für die hier typischen Parameter bei Laserleistungen P_L ab 2 kW eine Temperatur von etwa 3400 °C – also oberhalb der Verdampfungstemperatur – vorliegt, wenn die Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{th \text{ TRIP700}} = 26 \text{ W/mK}$ und die Temperaturleitfähigkeit $k_{\text{TRIP700}} = 8 \text{ mm}^2/\text{s}$ nach Tabelle 3.1 angenommen wird. Mit den in den Experimenten realisierten Intensitätswerten im Bereich von $7 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$ bildet sich damit eine Dampfkapillare aus, was insbesondere am Beginn einer Schweißnaht im Tief-

schweißmodus eine Schmelzdynamik auslöst, bei der sich topografische Erhebungen nach der Abkühlung ergeben können.

Parameterentwicklung

Die Prozesszeit wird bei den in Abbildung 4.37 dargestellten Schweißmustern zwischen 25 und 50 ms variiert und eine Voruntersuchung zeigt eine Noppenentstehung. Ebenso zeigen linienförmige Schweißungen mehr Variation in der Noppenhöhe am Anfang der Naht im Vergleich zu den genannten Schweißmustern. In Hochgeschwindigkeitsaufnahmen ist zu sehen, wie die Erhebung kurz vor Erstarrung teilweise wieder zurück in das Schmelzbad fließt. Durch Anpassung der Geometrie (Dimension) des Schweißmusters und der Variation des zeitlichen Geschwindigkeitsprofils während der Schweißung sowie geeigneter Laserleistung kann die Höhe dieser Noppe variiert werden, welche konstante Werte über 200 μm erreichen kann.

Auf Grund der schnellen Strahlbewegung, insbesondere bei dem Schweißmuster der Schleife (Abbildung 4.37 links) mit bis zu 15 m/min, wird flüssige Schmelze an den äußeren Rand der Bearbeitungszone – zwischen aufgeschmolzenem und nicht aufgeschmolzenem, festem Material – geschoben, welche die Topografieerhöhung darstellt. Die Erklärung zur Noppenentstehung folgt in Abschnitt 4.3.2.

Eine nach ersten Experimenten durchgeführte Parameterentwicklung ergibt zwei verschiedene Noppenschweißmuster für die verwendeten höchstfesten Stähle. Erzeugt wird mit Hilfe einer schnellen Strahlbewegung entweder ein kleiner Kreis oder eine kleine Schleife, die beide zur Noppenentstehung entsprechend oben erwähnten Mechanismen führen. Abbildung 4.37 zeigt die beiden Schweißmuster „Schleife“ und „Kreis“ zum „fokussierten“ Lasernoppen von höchstfesten Stählen. Die Dimensionen bei beiden Schweißmustern liegen im Bereich von rund 2 Millimetern im Durchmesser.

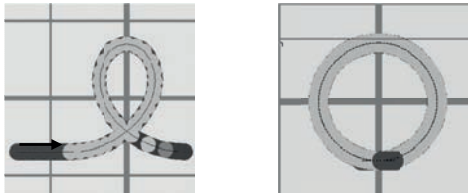


Abbildung 4.37: Schweißmuster „Schleife“ (links) und „Kreis“ (rechts) zum „fokussierten“ Lasernoppen von höchstfesten Stählen. Die dunklen Grautöne der Schweißmuster kennzeichnen Anfang und Ende der Bahn des Laserstrahls, dort ist $P=0$.

Die Prozesszeiten sind für beide Schweißmuster ähnlich und betragen um 30 ms. Eine Geschwindigkeitsrampe, gegen Ende des Musters ansteigend, verstärkt die Noppenentstehung. Die verwendeten Laserleistungen liegen dabei zwischen 2,0 und 2,5 kW. Das Schweißmuster „Schleife“ wird nach Abbildung 4.37 gegen den Uhrzeigersinn abgefahren. Beim kreisförmigen Schweißmuster ist die Geometrie und die Geschwindigkeit symmetrisch, eine Vorgabe der Schweißrichtung im- oder gegen den Uhrzeigersinn ist nicht erforderlich.

Prozessfenster

Abbildung 4.38 veranschaulicht hierzu die Noppenhöhe auf TRIP700 in Abhängigkeit der Defokussierung. Die unterbrochenen Linien im Diagramm markieren die Toleranzgrenzen der Defokussierung für akzeptable Noppenhöhe. Es entstehen, nur geringfügig abhängig vom Schweißmuster, zwischen -2 und $+2$ mm Defokussierung Noppen mit einer Höhe von etwa $120 - 140 \mu\text{m}$.

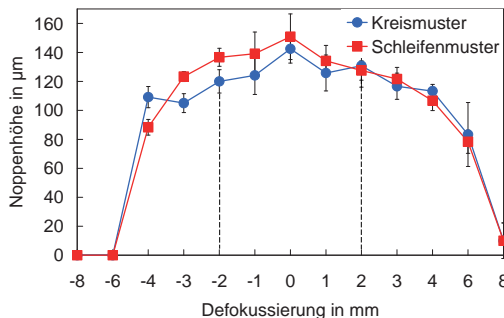


Abbildung 4.38: Noppenhöhe in Abhängigkeit der Defokussierung auf TRIP700 mit Schweißmuster „Schleife“ und Kreis.

Auffallend ist die geringe Variation der Noppenhöhe über einen großen Bereich der Defokussierung. Als Ursache dafür kann auf eine dabei vorhandene hohe Schmelzegegeschwindigkeit geschlossen werden, welche ihrerseits eine Konsequenz der doch recht hohen Schweißgeschwindigkeit und des relativ großen Kapillardurchmessers ist siehe dazu Abbildung 5.11.

Des Weiteren ist bei einer Rayleighlänge von 6 mm bei geringen Werten der Defokussierung auch eine sich kaum ändernde Intensitätsverteilung am und im Werkstück gegeben, was eine weitgehend konstante Kapillargeometrie zur Folge hat.

4.3.2 Noppenentstehung

Noppenform

Der Anschaulichkeit halber seien zunächst nochmals die Unterschiede der Noppenform bei defokussierter und fokussierter Herstellung gezeigt. In Abbildung 4.39 sind Aufnahmen der beiden Varianten der Oberflächennoppen zu sehen (siehe auch Abbildung 4.3 und Abbildung 4.4). Geschweißt wurde ein Standardmuster für eine defokussierte Noppe auf einem elektrolytisch verzinkten DC04 und das schleifenförmige Nahtmuster aus Abschnitt 4.3.1 auf einem TRIP700 mit organischer Beschichtung. Oberflächennoppen auf dem Werkstoff TRIP700 weisen die maximale Erhebung am äußeren Rand des Anfangs der Bearbeitungszone auf. Die Noppenhöhe beträgt – wie in Abbildung 4.38 bereits wiedergegeben – ca. 140 μm .

Es sei nochmals festgehalten, dass hier – mit dem TRIP700 – keine symmetrische bzw. kugelförmige Geometrie, weder im flüssigen Zustand der Schmelze, noch nach der Erstarrung, wie bei verzinktem ZStE340 mit defokussierter Schweißung erkennbar ist.

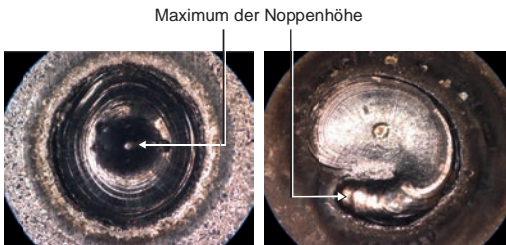


Abbildung 4.39: Fotografischer Vergleich von Lasernoppen: “Defokussierte“ Prozessführung mit statischem Schweißmuster – Maximum der Noppenhöhe im Zentrum der Noppe (links, Werkstoff DC04), Noppe bei “fokussierter“ Prozessführung mit bewegtem Schweißmuster und außermittigem Höhenmaximum (rechts, Werkstoff TRIP700).

Bei der Parameterstudie stellte sich heraus, dass mit der Änderung von Geschwindigkeit und Laserleistung Noppenhöhen von bis zu 240 μm erreichbar sind. Die Verwendung des kreis- oder des schleifenförmigen Nahtmusters wirkt sich wenig auf die Qualität der Noppen aus. Auch andere Schweißmuster, welche eine Bahn mit schneller Umorientierung beschreiben, können für diese Art der Noppenherstellung verwendet werden.

Zeitliche Entstehung

Die Kameraparameter der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen für die höchstfesten Werkstoffe sind mit denen bei defokussierter Prozessführung identisch. Die Aufnahmen sind mit gleichem Aufnahmewinkel analog zur Abbildung 4.22 entstanden. Abbildung 4.40 veranschaulicht die zeitliche Entstehung einer Noppe bei fokussierter Bearbeitung mit dem Schweißmuster der Schleife bei einer Prozesszeit von 31 ms. Die Abbildung 4.41 zeigt die Zuordnung der geometrischen Positionen der Kamerabilder aus Abbildung 4.40.

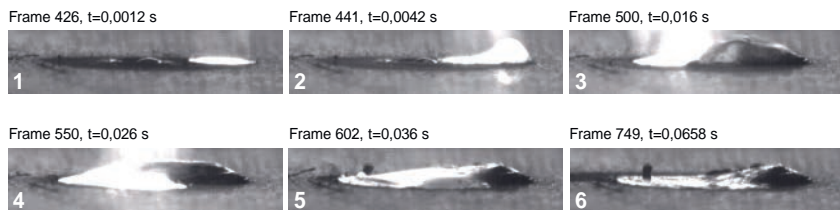


Abbildung 4.40: Sequenz einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme: zeitliche Entstehung einer Noppe auf dem Werkstoff TRIP700 mit Schweißmuster „Schleife“ bei einer Prozesszeit von 31 ms. Bild 1 bis 4: Laserstrahl an, Bild 5, 6: Laserstrahl aus.

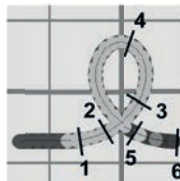


Abbildung 4.41: Geometrische Zuordnung der Kamerabilder 1 bis 6 aus Abbildung 4.40.

Die zeitliche Entstehung der Noppen kann nach den Bildern der Videosequenz in drei Phasen gegliedert werden:

- Auftreffen des Laserstrahls, Verdampfung der Zinkschicht sowie Aufschmelzen und Aufwerfen von Grundmaterial über den Rand der Bearbeitungszone: Entstehung einer Dampfkapillare und eines Schmelzbads.
- Bahnschweißprozess mit beschleunigter Schmelze (Bild 1 bis 4)
- Erstarrungsvorgang (Laser ausgeschaltet, Bild 5 bis 6).

Am Beginn der ersten Phase ist das lokale Verdampfen der Zinkschicht zu sehen. Im direkten Anschluss daran – ab Bild 2, wo sich bereits eine Dampfkapillare ausgebildet hat – ist eine Aufhäufung von flüssiger Schmelze an und zum Teil über den Rand der Bearbeitungszone zu erkennen. Es wird entgegen des Uhrzeigersinns geschweißt, die Schmelze wird daher in Richtung des Uhrzeigersinns beschleunigt.

Während der Laserstrahl eingeschaltet ist – Bilder 1 bis 4 der Videosequenz – vergrößert sich die Aufhäufung der Schmelze stetig, sodass beim Erstarren dort die topografische Erhebung bereits nahezu vollständig vorhanden ist.

Wichtig hierbei ist, dass während der zweiten Phase diese Erhebung nicht zurück in das Schmelzbad fließt. Dieser Rückfluss kann mit einer Reduzierung der Energiedichte (Leistungsreduzierung bei gleichzeitiger Geschwindigkeitserhöhung) nach der Hälfte der Schweißzeit und der schleifenförmigen Strahlbewegung verhindert werden. In Bild 3 ist die Erhebung am Rand der Bearbeitungszone, welche noch vor Prozessende entsteht, deutlich zu erkennen.

Die Erstarrung der restlichen Schmelze ist in den Bildern 5 und 6 zu erkennen. Anders als bei den Noppen auf den weicheeren Stählen wächst hier die Noppe mit zunehmender Erstarrung nicht symmetrisch von außen nach innen. Die Abkühlung der aufgetauchten Schmelze erfolgt sehr schnell vom äußeren Rand der Naht in Folge des kalten Grundwerkstoffes, auf dem sich die Schmelze befindet. Nach Ausschalten des Lasers erfolgt daher nur eine geringe Formänderung der Noppe, die Erstarrung des restlichen Schmelzbads hat auf die Noppenform kaum noch Einfluss.

Vergleichbar ist dieser Prozess mit einer Nahtüberhöhung zu Schweißbeginn (siehe auch Abschnitt 5.1.1).

Zu beachten ist hier, dass beim Kreismuster die bereits entstandene Noppe nicht wieder überschweißt wird. Eine Leistungsrampe zum Ende des Noppvorgangs verhindert das erneute Aufschmelzen der Aufhäufung.

Deutung der Noppenentstehung

Beim Lasernoppen auf TRIP700 mit dem Schweißmuster der Schleife oder des Kreises nutzt man den Effekt der Umströmung der Dampfkapillare. Bei Schweißgeschwindigkeiten von 10 bis 15 m/min und einem Kapillardurchmesser (ungefähr dem Brennfleckdurchmesser gleichgesetzt) von 680 µm beträgt die Schmelzegeschwindigkeit seitlich der Kapillare mehr als 100 m/min, was einem dynamischen Druck von einigen zehntel bar entspricht (siehe hierzu entsprechende Abschätzungen in Abbildung 5.11).

Beim Schweißen mit den verwendeten Muster einer “Schleife” wird die Schmelze infolge seitlich asymmetrischer Kapillarumströmung nach hinten gedrückt und hinterlässt nach dem Erstarren eine über den Rand hinaus gehende Erhöhung auf dem Blech (Abbildung 4.42). Diese, wie in den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen gut zu sehende, Erhebung zeichnet sich bereits nach etwa 5 ms ab.

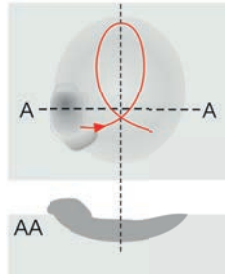


Abbildung 4.42: Strahlbewegung zur Herstellung einer Oberflächenrippe auf TRIP700 und Schmelzeverteilung nach der Erstarrung.

Folgende Aussagen zur Noppenentstehung auf TRIP700 lassen sich zusammenfassen:

- Die Entstehung hier ist kein Effekt der Oberflächenspannung, sondern resultiert aus fluiddynamischen Vorgängen beim Bahnschweißen im Tiefschweißmodus.
- Die Entstehung einer Dampfkapillare auf Grund der notwendigen hohen Intensität ist nur in Fokusslage bzw. in unmittelbarer Nähe möglich.
- Der Materialtransport mit sehr hoher Schmelzegeschwindigkeit entgegen der Strahlbewegung in Folge der Umströmung der Dampfkapillare wird primär als Ursache gedeutet.
- Die Entstehung der Noppe selbst erfolgt aufgrund des Aufstauens der mit hoher Geschwindigkeit gegen den Nahtanfang zu stömenden Schmelze.
- Die Bildung der Noppe erfolgt deshalb in einer Übergangszone zwischen fest und flüssig im Schmelzbad vorwiegend am Anfang der Bearbeitungsbahn.

Bei dem Versuch, Noppen mit Hilfe der fokussierten Bearbeitung auf die Materialien DC04 und ZStE340 zu übertragen, stellt man fest, dass auch auf den weicheren Werkstoffen Noppen entstehen, was zu einer Materialunabhängigkeit dieser Herstellungsmethode führt. Eine Parameteranpassung auf die korrekte Noppenhöhe mit möglichst geringer Streuung ist jedoch erforderlich.

Den hier geschilderten Effekt der Noppenbildung beobachtet man auch häufig am Beginn einer “gewöhnlichen“, linearen Laserschweißnaht, dort schlicht als Nahtüberhöhung bezeichnet.

4.4 Fertigungstechnische Aspekte

Noppen unter realen Spannbedingungen

Kritisch in Bezug auf die Spaltweite kann unter Umständen die Form der Noppe sein. Wenn diese zu spitz zuläuft (was insbesondere bei solchen nach “defokussierter“ Methode vorkommt), besteht die Gefahr, dass sich diese Spitze beim Spannen in die Oberfläche des Fügepartners eindrückt und so der Spalt geringer ausfällt, als entsprechend der Noppenhöhe erwartet. Auch eine zu hohe Spannkraft hinterlässt einen Abdruck der Noppe im Gegenblech, was ebenfalls das verbleibende Spaltmaß reduziert (siehe Abbildung 4.43). Die Tiefe des Noppeneindrucks und die Noppenhöhenreduzierung hängen dabei im Wesentlichen von der Noppenhärte und der Härte des Grundwerkstoffes ab.

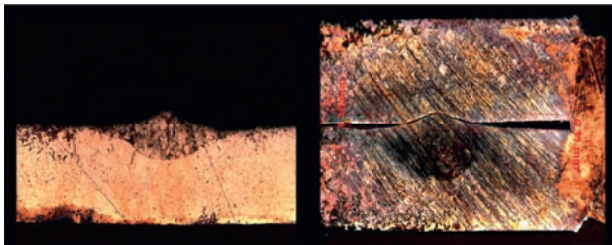


Abbildung 4.43: Querschnitt einer Oberflächennoppe, links freiliegend, rechts mit hoher Kraft gespannt führt zu erheblichem Eindruck in das Gegenblech (Materialpaarung: DC04, $t = 1,0$ mm).

Noppen und Korrosion

Die Bearbeitung von Bauteilen mit Lasernoppen geht einher mit einem lokalen Abtrag der Korrosionsschutzschicht. Auch beim anschließenden Schweißvorgang kommt es an der Schweißstelle zu einem Beschichtungsabtrag. In wie weit die Noppen die Korrosionseigenschaften des Bauteils beeinflussen, ist im Einzelnen in Form eines Korrosionstest zu überprüfen.

Anzahl der Noppen pro Schweißnaht

Die Anzahl der erforderlichen Noppen pro Schweißmuster für eine hohe Nahtqualität hängt von der Größe des Schweißmusters, der Geometrie und der Materialstärke des Bauteils ab.

Bei Liniennähten mit einer Länge von 20 mm können bei ebenem Flanschverlauf bereits zwei Noppen für ein gutes Schweißergebnis ausreichen. Wird mit einem flächigen Schweißmuster gearbeitet, welches auf einem gekrümmten Flansch positioniert werden muss, können bis zu vier und mehr Noppen notwendig werden, um eine fehlerfreie Schweißnaht zu erhalten. Da die Schweißmuster beim Remote-Schweißen über Software frei programmierbar sind, kann zu den verschiedenen Laserschweißnähten eine jeweils passende Noppenmatrix vorgesehen werden.

Taktzeit

Die Prozessdauer von Lasernoppen liegt pro Noppe bei 20 ms. Werden beispielsweise drei Noppen pro Schweißnaht bei einem Abstand der Nähte von 40 – 50 mm berücksichtigt, so ist auf Grund der maximalen Bearbeitungsgeschwindigkeit eines Roboters keine Laserauslastung um 100% zu erreichen.

Der Roboter gibt daher beim Noppen die minimale Bearbeitungszeit vor, weshalb die Anzahl der benötigten Noppen pro Schweißnaht aus Taktzeitgründen nicht relevant ist.

Noppen bei defokussierter und fokussierter Bearbeitung

Die Bearbeitungsbahn des Roboters bei defokussierten Oberflächennoppen unterscheidet sich von der anschließenden Schweißbahn auf Grund der Defokussierung. So ist es (bei der verwendeten Hardware ohne Fokussiermodul in der Laserschweißoptik) ohne eine Umpositionierung des Roboters nicht möglich, in der selben Überfahrtsbewegung zu Noppen und zu Schweißen. Bei Bauteilen, welche gleichzeitig genoppt und geschweißt werden, kann daher – unabhängig vom Werkstoff – die Noppeneinbringung bei fokussiertem Laserstrahl von wirtschaftlichem Vorteil sein.

5 Fluiddynamische Phänomene beim Laserstrahlschweißen mit Spalt

Voraussetzung für eine wirtschaftliche Anwendung des Laserschweißens ist die prozesssichere Darstellung der erforderlichen Nahtqualität, welche zur Zulassung und Freigabe eines geschweißten Bauteils und des Fügeverfahrens führt. Unsachgemäßes Schweißen kann zu verschiedenen Arten von Nahtunregelmäßigkeiten und Schweißfehlern führen.

Aus den Erkenntnissen des Kapitels 4 ist ein für den Schweißprozess notwendiges Spaltmaß durch das Aufbringen von Laserstrahlnoppen gewährleistet. In der Praxis zeigt sich dennoch, dass eine Null-Fehlerquote selbst bei einem durch Noppen definierten Idealspalt nur schwer erreichbar ist. Eine Abweichung des Spaltmaßes außerhalb der zulässigen Toleranz erhöht die Anzahl von Nahtunregelmäßigkeiten.

Experimente im Folgenden zeigen, dass im Wesentlichen drei Phänomene dem Erzielen einer hohen Nahtqualität entgegenstehen:

- Schmelzeverlust in Folge Startspritzer am Beginn einer Schweißnaht
- Nahteinfall und Löcher durch Auffüllen des Spaltes
- Endkraterbildung

Diese drei Fehlerentstehungsmechanismen werden im Folgenden phänomenologisch untersucht und unter fluiddynamischen Aspekten beschrieben. Insbesondere werden Fehlerentstehungen behandelt, welche als Folge ein Loch in der Schweißnaht haben. In Kapitel 6 werden Maßnahmen zur Reduzierung der Fehlerentstehung entwickelt und vorgeschlagen.

5.1 Nahtunregelmäßigkeiten und Schweißfehler

Aufgrund der Vielzahl verschiedener Fehlermöglichkeiten sollen im Folgenden Nahtunregelmäßigkeiten und Schweißfehler definiert und charakterisiert werden. Grundlage für eine Aufteilung von möglichen Nahtunregelmäßigkeiten stellt die EN ISO 13919-1⁴ in Tabelle 5.1. dar.

Nr.	Unregelmäßigkeit Benennung	zeichnerische Darstellung	Grenzwerte für die Unregelmäßigkeiten		
			niedrig D	mittel C	hoch B
1	Nahtüberhöhung Wurzelerhöhung		$h_1 \text{ bzw. } h_2 \leq 0,1 + 0,2t$ max. 5mm	$h_1 \text{ bzw. } h_2 \leq 0,1 + 0,15t$ max. 5mm	$h_1 \text{ bzw. } h_2 \leq 0,1 + 0,1t$ max. 5mm
2	Nahtunterwölbung Wurzelrückfall		$h_1 \text{ bzw. } h_2 \leq 0,3t$ max. 1mm	$h_1 \text{ bzw. } h_2 \leq 0,2t$ max. 0,5mm	$h_1 \text{ bzw. } h_2 \leq 0,1t$ max. 0,3mm
3	Nahtdurchhang (Nahtunterwölbung mit Wurzelerhöhung)		$h_1 \leq 0,3t + h_2$ max. 0,5t	$h_1 \leq 0,2t + h_2$ max. 0,3t	$h_1 \leq 0,1t + h_2$ max. 0,2t
4	Fügespaltweite		zulässig, jedoch sind Grenzwerte aufgrund des blechdickenabhängigen Einflusses auf die Fertigungsqualität gesondert festzulegen		
5	Randkerben		$h \leq 0,15t$ max. 1mm	$h \leq 0,1t$ max. 0,5mm	$h \leq 0,05t$ max. 0,3mm
6	Schweißspritzer angeschmolzen		zulässig, jedoch nur dem Grundwerkstoff artgleiche Spritzer		
7	Minimale Schweißnaht- dicke		$h_{\min} \geq 0,7t$	$h_{\min} \geq 0,8t$	$h_{\min} \geq 0,9t$
8	Riß		nicht zulässig		
9	Endkraterriß		örtlich begrenzt zulässig	nicht zulässig	
10	Bindefehler		örtlich begrenzt zulässig	nicht zulässig	
11	Metalldampf- niederschlag		zulässig, jedoch nur dem Grundwerkstoff artgleicher Metalldampfniederschlag		
12	Poren Porosität Lunker		$h \leq 0,2t$	$h \leq 0,1t$ ^γ	$h \leq 0,1t$ ^γ

Tabelle 5.1: Nahtunregelmäßigkeiten nach EN ISO 13919-1 bei in dieser Arbeit untersuchten Schweißnähten im Überlappstoß

⁴ Diese Norm ist eine Richtlinie zur Bewertung von Unregelmäßigkeiten bei elektronen- und laserstrahlgeschweißten Verbindungen aus Stahl.

Die Norm ist anzuwenden für legierte und unlegierte Stähle, welche ohne Zusatzwerkstoff geschweißt werden. Nahtunregelmäßigkeiten beschreiben Nahtfehler, die nicht zwingend einen Schweißfehler verursachen. Es kommt zu einem Schweißfehler, wenn Nahtunregelmäßigkeiten einen vorgegebenen Grenzwert überschreiten.

In dieser Norm sind nahezu alle Schweißfehler, welche beim Laserstrahlschweißen vorkommen können, enthalten. Die Norm legt dabei drei verschiedene Bewertungsgruppen fest, in denen die Fehlstellengröße unterschiedlich toleriert wird. Die Bewertungsgruppen beziehen sich jedoch nicht auf eine spezifische Anwendung, daher können auch verschiedene Bewertungsgruppen für einzelne Schweißverbindungen eines Bauteils verwendet werden.

Erfahrungen aus dem Umfeld der Automobilhersteller ergeben eine bisher nicht einheitliche Toleranz gegenüber Schweißnahtunregelmäßigkeiten. Bauteilabsicherungsprozesse gestalten sich daher zum Teil als sehr aufwändig.

Bei den in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Schweißversuchen handelt es sich ausschließlich um I-Nähte am Überlappstoß. Andere Nahtformen werden im Folgenden nicht beschrieben oder berücksichtigt.

5.1.1 Definition Nahtunregelmäßigkeiten und Schweißfehler

In Tabelle 5.2 sind Nahtunregelmäßigkeiten aus der angegebenen Norm extrahiert, welche für diese Arbeit relevant sind. Der Fehlertyp Einschusslöcher wird in Tabelle 5.2 ergänzt, da dieser nach ISO 13919-1 nicht aufgeführt ist, Einschusslöcher jedoch einen besonderen Stellenwert für die Zielsetzung dieser Arbeit haben.

Auf die Fehlerarten Endkrater, Ein- und Durchschüsse, welche als Folge des Fügespalts vorkommen können, wird bei der Diskussion zur Fehlerentstehung besonders eingegangen. Des Weiteren werden Schweißfehler und Nahtunregelmäßigkeiten in Tabelle 5.2 definiert, welche einen besonderen Stellenwert innerhalb dieser Arbeit haben und im Anschluss nach Auswirkungsgrad klassifiziert sind.


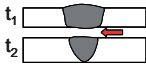
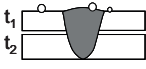
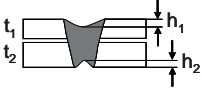
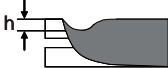
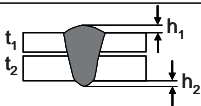
Unregelmäßigkeit, Benennung	Zeichnerische Darstellung	Grenzwerte für Unregelmäßigkeiten Bewertungsgruppe B (hoch)
Einschusslöcher		Kein Normgrenzwert, in der Praxis gilt: Lochdurchmesser < 3 mm
Anbindefehler (False Friend)		Nicht zulässig
Schweißspritzer angeschmolzen		Zulässig, jedoch nur dem Grundwerkstoff artgleiche Spritzer
Nahtunterwölbung Wurzelrückfall		$h_1 \text{ bzw. } h_2 \leq 0,1t_1$ max. 5 mm Fehlerlänge
Naht-Endkrater		$h \leq 0,4t_1$
Naht-, Wurzelüberhöhung		$h_1 \text{ bzw. } h_2 \leq 0,1 + 0,1t_1$ max. 5 mm Fehlerlänge

Tabelle 5.2: Auszug von Bewertungsgruppen für Schweißverbindungen und Grenzwerte für Nahtunregelmäßigkeiten an Stahl: I-Naht am Überlappstoß (Auszug aus [92] und [93]).

Einschussloch

Einschusslöcher gehen nur durch eines der zu schweißenden Bleche hindurch und können somit eine Verbindung zum Fügespalt haben. Ob diese Verbindung zwischen Loch und Spalt besteht, ist meist mit bloßem Auge nicht zu erkennen und kann auch mittels Auflichtmikroskop nur selten identifiziert werden.

Durchschussloch

Durchschusslöcher gehen durch beide zu verschweißenden Bleche hindurch und sind dadurch erkennbar, dass bei der Sichtprüfung das Licht einer Leuchtquelle, die sich hinter der Schweißprobe befindet, an der Stelle des Loches durchscheinen kann (keine weitere Berücksichtigung im Folgenden, da in der Arbeit nicht relevant).

Falscher Freund (False Friend)

Ein „Falscher Freund“ ist eine Schweißnaht, bei der eine deutliche Nahtober- und -unterraupe vorhanden ist, sich jedoch zwischen den Blechen kein Anbindungsquerschnitt ausbildet. Die Schweißnaht hat aufgrund des fehlenden Anbindungsquerschnittes keine verbindende Wirkung zwischen den Blechen und stellt somit ein Festigkeitsrisiko dar. Im Gegensatz zu einem Loch ist ein „Falscher Freund“ äußerlich kaum feststellbar (daher die Bezeichnung), insbesondere dann nicht, wenn benachbarte Schweißnähte vorhanden sind, die die Bleche miteinander fixieren.

Schweißspritzer

Schweißspritzer sind auf eine hohe Schmelzbaddynamik zurückzuführen, wobei nicht zwingend ein weiterer Schweißfehler in Form einer Pore die Folge sein muss. Nachteilig ist das fehlende Schmelzvolumen, welches mit den Spritzern zu Ungunsten der Schweißnaht verloren geht. Kritisch in Bezug auf Korrosion sind Spritzeranhaftungen auf und neben der Schweißnaht.

Nahteinfall

Der Nahteinfall korreliert eng mit dem zu überbrückenden Spalt und stellt keinen unmittelbaren Schweißfehler dar. Ein großer Nahteinfall reduziert den tragenden Querschnitt einer Schweißverbindung und mindert, auf Grund der einhergehenden scharfen Kanten zwischen Naht und Blechoberfläche, die Festigkeit.

Endkrater

Eine typische Erscheinung beim Laserschweißen stellt der Endkrater dar. Dieser entsteht in Folge der Umströmung der Dampfkapillare entgegen der Schweißrichtung. Ein Endkrater kann im günstigen Fall eine Vertiefung innerhalb des laserzugewandten Bleches sein, ein Einschuss ist hier ebenfalls möglich. Auf die genaue Beschreibung des Endkraters wird nachfolgend bei der Fehlerentstehungsdiskussion noch eingegangen.

Nahtüberhöhung zu Nahtbeginn

Auf Grund einer Schmelzansammlung zu Nahtbeginn über das Niveau der Blechoberfläche kommt es – vorwiegend bei kleinen Spaltmaßen – zu einer Nahtüberhöhung. Es handelt sich meist nicht um einen Schweißfehler, dennoch ist die Nahtüberhöhung ein wichtiger Aspekt zur Erklärung der Fehlerentstehung und in Kapitel 4.3 das der Noppenentstehung zu Grunde liegende Phänomen.

5.1.2 Bedeutung und Klassifizierung von Nahtunregelmäßigkeiten

Die oben genannten Nahtunregelmäßigkeiten haben unterschiedliche Bedeutung für die Bauteilqualität. Abhängig von Dichtigkeits-, Crash- und Korrosionsanforderungen der Bauteile werden Nahtunregelmäßigkeiten teilweise toleriert.

Durchschusslöcher stellen ein Dichtigkeitsproblem dar und sind daher an Flanschen mit Dichtigkeitsanforderung ohne Nachbesserung nicht zulässig. Durchschuss- und Einschusslöcher stellen zusätzlich ein Korrosionsrisiko dar. In Folge der meist scharfkantigen Fehlerumgebung und des fehlenden Anbindequerschnitts reduziert sich zudem die Festigkeit dieser Nähte.

Kritisch bezüglich der Festigkeit sind auch die „Falschen Freunde“ einzuordnen. Sie stellen meist kein Dichtigkeitsproblem dar, da die Nahtraupe glatt und porenfrei ist. Eine Erkennung dieses Fehlertyps ist dennoch zwingend notwendig, da sonst eine ausreichende Festigkeit des Bauteils auf Grund des fehlenden Anbindequerschnitts nicht gewährleistet werden kann.

Endkrater und Nahtunterwölbungen können sowohl Kerbwirkung verursachen, als auch durch scharfe Kanten die Korrosionsbeständigkeit nachteilig beeinflussen. Schweißspritzer und Nahtüberhöhungen wirken sich dagegen hauptsächlich auf die Korrosionseigenschaften aus.

Daher sind Nahtunregelmäßigkeiten in verschiedene Gruppen, wie beispielsweise Einfluss auf Festigkeit und/oder Einfluss auf Korrosion, einzuordnen. Eine Aussage, welcher Fehlertyp sich am gravierendsten auf die Bauteilqualität auswirkt, ist daher schwer zu treffen. Entscheidend sind hierbei die Anforderungen, die zu stellen sind.

Bei dichtigkeitsrelevanten Bauteilen müssen nach dem Fügeprozess bei entstandenen Schweißfehlern kostenintensive Nacharbeits- und Abdichtmaßnahmen mit einer Dichtpaste getroffen werden. Die Festigkeit lässt sich durch diese Nacharbeit nicht mehr verbessern.

Vor dem Hintergrund der mit dieser Arbeit zu lösenden Schweißaufgabe wird insbesondere auf zwei Nahtfehler eingegangen, die sehr unterschiedliche Ursachen haben, nämlich zu Beginn des Schweißprozesses auftretende Spritzer und „Schmelzedefizite“ während und vor allem gegen Ende der Bahnschweißung. Experimentelle Beobachtungen und qualitative physikalische Deutungen beider Phänomene werden in den folgenden Abschnitten 5.2 und 5.3 dargestellt.

5.2 Spritzerbildung

Beim Laserstrahlschweißen von verzinkten Blechen ist selbst bei idealem Prozessverlauf eine geringfügige Spritzerbildung zu beobachten. Man kann dabei verschiedene Spritzertypen nach dem Ort der Entstehung klassifizieren:

- Typ 1: Spritzer beim Einstechen am Nahtanfang
- Typ 2: Spritzer kurz nach Nahtbeginn
- Typ 3: Spritzer durch ungleichmäßige Verdampfung von Legierungs- oder Beschichtungsbestandteilen aus dem Schmelzbad
- Typ 4: Spritzer durch Einschweißen in bereits geschweißte Nahtbereiche

Alle Spritzer haben aus Prozesskenntnis – unabhängig ihrer Entstehung – eine Gemeinsamkeit: die Reduzierung des Schmelzvolumens im Fügebereich. Bei den Untersuchungen zur Spaltgröße in Abschnitt 5.3.1.2 wird der Begriff Schmelzbadöffnung eingeführt. Die Größe der Schmelzbadöffnung ist abhängig von der lokal vorhandenen Schmelze, welche auch durch Spritzerbildung beeinflusst werden kann. Ein Verlust von Schmelze in Folge der Spritzer innerhalb einer Schweißnaht kann sich daher auch auf die Größe eines Nahtfehlers oder die Größe des Endkraters auswirken.

5.2.1 Experimentelle Beobachtungen von Spritzerentstehung

Im Folgenden werden die Spritzertypen 1 und 2 dargestellt. Auf die Typen 3 und 4 wird nicht näher eingegangen, da ihre Wirkung – die Reduzierung des Schmelzbadvolumens – dieselbe ist, ihr Beitrag und ihre Bedeutung im Hinblick auf das hier interessierenden Schweißergebnis jedoch geringer ist.

Die Schweißrichtung ist in den Abbildungen zur Spritzerbildung von rechts hinten nach links vorne. Die Versuchsanordnung ist in Abbildung 5.1 dargestellt.

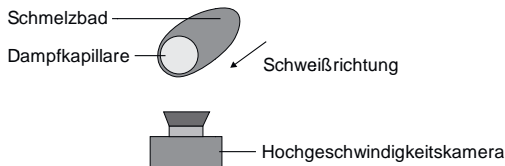


Abbildung 5.1: Perspektive der Schweißrichtung und Kameraposition zur Beobachtung der Spritzerbildung, Kamera etwa 40° gegen die Oberflächenebene geneigt.

In Kapitel 6.1 werden Gegenmaßnahmen entwickelt, die insbesondere zur Spritzervermeidung von Typ 1 und 2 beitragen.

Typ 1: Spritzer beim Einstechen am Nahtanfang

In den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen ist zu beobachten, dass es während oder unmittelbar nach Einstechen des Laserstrahls in das Material in den meisten Fällen zu einer Spritzerbildung kommt. Die dabei auftretenden Phänomene sind jenen beim Laserbohren sehr ähnlich.

Die Ausbildung der Dampfkapillare beim Einstechvorgang kann verglichen werden mit der Eindringung eines “Dampfkolbens” in das Material, wobei die seitlich und insbesondere am Kapillargrund entstehende Schmelze durch den Reaktionsdruck des abdampfenden Werkstoffs verdrängt wird. Wie beim Bohren von Sacklöchern wird auch beim Einstechen, wo sich erst ein relativ kleines und weitgehend zylindrisches Schmelzbad gebildet hat, die Schmelze entgegen der Laserstrahlrichtung in Form von Tröpfchen oder auch eines Film angetrieben. Simulationsrechnungen in [94] zeigen anschaulich, dass dieser “Verdrängungseffekt” umso stärker ausgeprägt ist, je dünner der die Kapillare umschließende Schmelzfilm ist.

Die Sequenz einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme zeigt diese Art der Spritzerbildung. Aus der Bildnummerierung der Einzelaufnahmen in Abbildung 5.2 wird deutlich, dass die Spritzerentstehung zwischen Auftreffen des Laserstrahls auf das Material und Ablösung des ersten Spritzers hier in Form einer Flüssigkeitssäule etwa 2 bis 3 Millisekunden Zeit benötigt (3 bis 5 Einzelbilder), was in guter Näherung mit den Simulationsrechnungen in [94] übereinstimmt. Die sich ausbildende Dampfkapillare in Bild 2 der Abbildung 5.2 verdrängt dabei die Schmelze mit hoher Geschwindigkeit, sodass diese im Schmelzefilm der Dampfkapillare, zusätzlich beschleunigt durch die Dampfreibung an der Kapillarwand [1], nach oben getrieben und ausgeworfen wird.

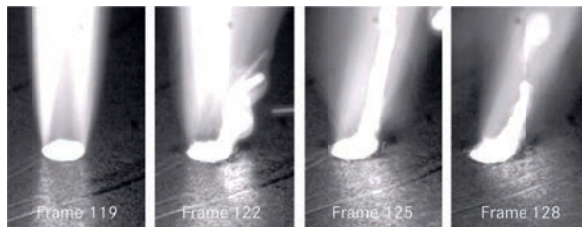


Abbildung 5.2: Sequenz einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme zur Spritzerbildung vom Typ 1 beim Einstechen des Lasers am Nahtanfang bei einer Laserleistung $P_L = 4 \text{ kW}$ (Bildwiederholrate 1600/s).

Da auch beim Einstechvorgang bereits die volle Schweißgeschwindigkeit und somit kein axialsymmetrisches Schmelzbad vorliegt, ist die Spritzerentstehung vorzugsweise an der Kapillarrückwand zu beobachten. Ein direkter Schweißnahtfehler in Form einer offenen Pore oder eines Loches entsteht bei diesem Spritzertyp meist nicht.

Typ 2: Spritzer kurz nach Nahtbeginn bei der Ausbildung eines Schmelzbades

Diese Art von Spritzern entstehen zeitlich betrachtet einige Millisekunden nach den Spritzern vom Typ 1. Anders als beim Spritzertyp 1 hat sich bei der Entstehung von Spritzern des Typs 2 bereits ein längeres Schmelzbad hinter der Dampfkapillare ausgebildet. Auch hier ist der zeitliche Verlauf in einer Hochgeschwindigkeitssequenz dargestellt, siehe Abbildung 5.3.

Die durch Bewegung der Dampfkapillare entgegen der Schweißrichtung beschleunigte Schmelze staut sich gegen das feste hintere Ende des aufgeschmolzenen Bereichs auf. Dadurch wird die flüssige Schmelze teilweise über den Nahrand nach hinten herausgedrückt.

Auch der Spritzer vom Typ 2 löst sich nach Beginn der Schweißnaht sehr schnell ab. Ob allerdings ein Schmelztropfen entsteht, hängt im Wesentlichen von der Laserleistung bzw. der Intensität und der Schweißgeschwindigkeit ab. Diese Parameter bestimmen die Dynamik des Schmelzbades beim Laserstrahlschweißen. Eine qualitative Deutung der Spritzer, insbesondere bei welchen Bedingungen eine Ablösung eines Spritzers erfolgt, wird im Abschnitt 5.2.2 versucht.

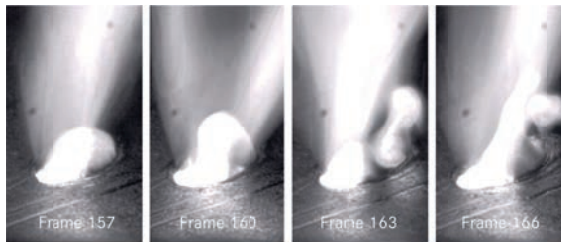


Abbildung 5.3: Sequenz einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme: Spritzerbildung vom Typ 2 kurz nach Nahtbeginn bei einer Laserleistung $P_L = 4 \text{ kW}$ (Bildwiederholrate 1600/s).

Nach vorangegangener Nahtüberhöhung von flüssiger Schmelze kommt es nach etwa 5 Millisekunden zum Austreten einer "Schmelzesäule" (5 bis 8 Einzelbilder), induziert durch beschleunigte Schmelze aus der Kapillare heraus. Beobachtet man den Schmelzefluss in den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen, so stellt man fest, dass sich hinter der

Kapillare nach der Bildung der Schmelzüberhöhung eine anschließende Abwärtsbewegung der Schmelze bildet. Abhängig davon, wie viel kinetische Energie dieser Schmelzeffluss besitzt und einen entsprechenden Impuls gegen den Rand der aufgeschmolzenen Zone – also dem Nahtbeginn – ausübt, kommt es dort zur Ablösung eines Spritzers (unterbrochene Linie markiert den Spritzer in Abbildung 5.4).

Generell wird beobachtet, dass sich Spritzer zunächst in Form einer “Schmelzesäule” ablösen und sich dann erst daraus zu einzelnen Tropfen abschnüren. Die Abbildung 5.4 veranschaulicht die Entstehung von Spritzertyp 2 in zeitlicher Abhängigkeit. Typische Schweißblängen, bei denen sich ein Schmelztropfen in Folge dieses Mechanismus ablöst, betragen 2 bis 3 Millimeter bezogen auf den Nahtbeginn.

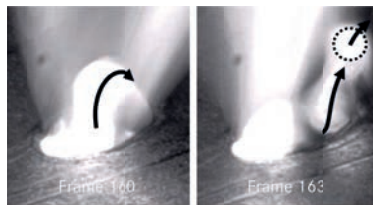


Abbildung 5.4: Schematische Darstellung der Schmelzefflussrichtungen hinter der Dampfkapillare und der Spritzerentstehung nach Typ 2. Die Pfeile stellen jeweils die Flussrichtung eines Schmelzelements dar. Im Bild rechts ist die Spritzerablösung gekennzeichnet.

Wie bei Spritzern vom Typ 1 kommt es auch hier meist nicht zur direkten Fehlerentstehung in der Schweißnaht in Form einer offenen Pore. Maßnahmen zur Vermeidung von Spritzern werden im Kapitel 6.1 beschrieben.

Vermehrt entstehen diese Spritzer vor allem beim Schweißen mit sehr kleinen Entgasungsspalten, da die Schmelze nicht in den Spalt entweichen kann und damit eine Nahtüberhöhung flüssiger Schmelze kleiner ausfällt. Diese Art der Spritzerentstehung kann daher mit einem größeren Spalt vermieden werden, welcher jedoch beim weiteren Verlauf der Bahnschweißung Nachteile mit sich bringt.

5.2.2 Qualitative Deutung der Spritzerentstehung

Um ein qualitatives Bild der Spritzerentstehung zu erhalten, werden nun die antreibenden Kräfte auf die Schmelze aufgezeigt. In der Abbildung 5.5 ist die Schmelzbadform und die Schmelzdyamik am Nahtanfang für die Spritzertypen 1 und 2 sowie für einen danach stationär verlaufenden Schweißvorgang dargestellt.

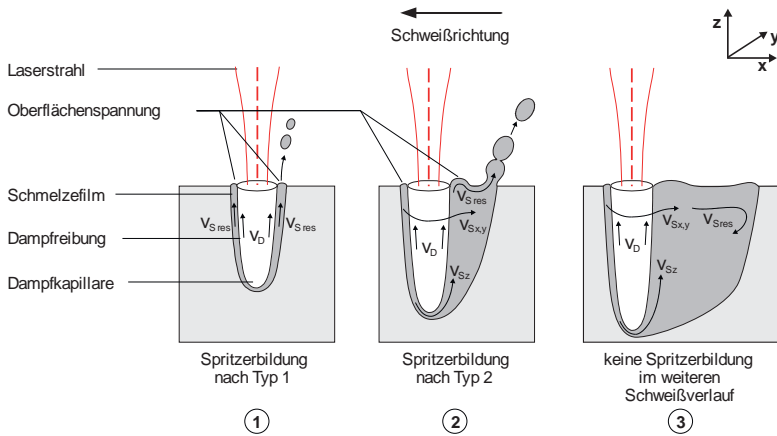


Abbildung 5.5: Schmelzbadform am Nahtanfang mit Dampf-, v_D , und Schmelzgeschwindigkeiten v_S ; Spritzerbildung direkt nach dem Einstechen (1), Spritzerbildung kurz nach Schweißbeginn (2), keine Spritzerbildung bei cw-Schweißung nach einigen Millimetern Nahtlänge (3).

Die Abbildung zeigt die unterschiedlichen Schmelzbadformen als Funktion der Zeit, die zu unterschiedlichem dynamischen Verhalten der Schmelze führen. Die Richtungsvektoren und damit die Krafteinwirkung auf ein Fluidelement im Schmelzbad setzt sich aus den Komponenten v_{Sx} , v_{Sy} und v_{Sz} ($=v_{Sres}$) zusammen.

Beim Ausbilden der Dampfkapillare, in Bild 1, wird in Folge des Innendruckes Schmelze vorwiegend entgegen der Laserstrahlrichtung verdrängt (siehe dazu auch die Untersuchungen in [94], in denen die Ausbildung der Kapillare einem Bohrprozess vergleichbar ist) und erfährt durch Dampfreibung an der Kapillarwand zusätzlich eine Kraft nach oben; die resultierende Schmelzgeschwindigkeit v_{Sres} hat weitgehend nur eine z-Komponente, v_{Sz} . Ein Spritzer entsteht, wenn die Oberflächenspannungsenergie des Schmelzefilms um die Kapillare an der Blechoberfläche kleiner ist, als die kinetische Energie der Schmelze. Da die Schmelzefilmdicke δ an der Rückseite der Kapillare bereits etwas größer als an der Front ist, erfolgt hier, wo die Oberflächenspannung σ/δ kleiner ist, bevorzugt die Spritzerablösung.

Nach dem Einstechen, in Bild 2, stellt die Schmelzgeschwindigkeit um die Dampfkapillare entgegen der Schweißrichtung und parallel zur Blechebene eine weitere wesentliche Komponente dar ($v_{Sx,y}$). Sie ist primär bestimmt durch die Schweißgeschwindigkeit und den Fokusbereich, siehe Abschnitt 5.3.1.2. Als weitere treibende Kraft auf die Schmelze wirkt der Verdampfungsdruck an gleitenden Stufen an der Kapillar-

front [95], [96]. Sie führt zu einer überwiegend nach unten gerichteten Strömungskomponente, die sich jedoch – insbesondere bei Einschweißungen – am Kapillargrund umkehren kann. Kombiniert mit der Dampfreibung in z-Richtung entsteht die resultierende Komponente v_{Sres} der Schmelzebewegung. Das Schmelzbad ist zu diesem Zeitpunkt 2 noch zu kurz, als dass sich ein dreidimensionales Strömungsfeld, z.B. mit einem Wirbel, ausbilden kann. An der Abrisskante am Ende des Schmelzbades weist deshalb die resultierende Schmelzegeschwindigkeit noch eine beträchtliche z-Komponente auf.

Damit sich ein Spritzer mit der Geschwindigkeit v_{Tr} ablöst, muss die Bedingung

$$\frac{M_S \cdot v_{\text{Sres}}^2}{2} \geq \frac{\sigma}{\delta} + \frac{M_{\text{Tr}} \cdot v_{\text{Tr}}^2}{2} \quad (5.1)$$

erfüllt sein. Darin sind M_S und v_{Sres} die Masse und die Geschwindigkeit des sich ablösenden Schmelzeelements mit typischer Größe δ , M_{Tr} und v_{Tr} die Masse und Geschwindigkeit des abgelösten Tröpfchens mit Radius δ , σ ist die Oberflächenspannung.

Im weiteren Schweißverlauf, in Bild 3, wenn sich ein stationärer (cw-) Schweißvorgang eingestellt hat, ist keine nennenswerte Spritzerbildung dieser Art zu beobachten, da das Schmelzbad hinter der Kapillare deutlich größer geworden ist. Hier hat sich ein komplexes, z.T. wirbelbehaftetes räumliches Schmelzbad ausgebildet. Die Schmelzegeschwindigkeit am Ende des großen Schmelzbads wird dadurch geringer und das Ende des Schmelzbades wirkt nicht mehr so stark als “Abrisskante”.

Mit den in diesem Abschnitt dargestellten Schmelzbadformen am Schweißnahtbeginn ergeben sich im Wesentlichen zwei Grundvoraussetzungen für die Ablösung eines Spritzers:

- Damit sich ein Schmelzetropfen der Masse M_{Tr} bildet und sich mit der Geschwindigkeit v_{Tr} entfernt, muss die kinetische Energie des Massenelements der Schmelze $M_S = M_{\text{Tr}}$ größer als die Oberflächenspannungsenergie und die kinetische Energie des Tropfens sein.
- Eine “Abrisskante” begünstigt die Spritzerentstehung. Diese stellt beim Spritzertyp 1 die Kapillarrückwand, für die Spritzerentstehung nach Typ 2 das Schmelzbadende, dar.

5.3 Fehlerentstehung beim Schweißen mit Spalt

Im folgenden Abschnitt sollen zunächst die Einflussgrößen, welche eine bedeutende Wirkung auf die Fehlerentstehung haben, erläutert werden. Weiterführend werden in Abschnitt 5.3.2 Fehlerentstehungsmechanismen abgeleitet, welche in Folge der genannten Einflussgrößen in Erscheinung treten sowie ein qualitativer Deutungsansatz vorgestellt.

5.3.1 Experimentelle Untersuchung der Einflussgrößen auf die Fehlerentstehung

Um das Spaltmaß möglichst genau zu definieren, wurde bei allen Testblechen der Spalt mittels dünnen Abstandsfolienblechen eingestellt. Dieses Verfahren ist für Grundlagenuntersuchungen geeigneter als die Spaltherstellung über Noppen, weil auf diese Weise ein exakter Spalt eingestellt werden kann und somit Prozessschwankungen bei der Noppenherstellung, z.B. Höhenvarianz der Lasernoppen, keinen Einfluss haben können.

5.3.1.1 Material- und anwendungsbedingte Einflussgrößen

Als erstes seien die Auswirkungen unterschiedlicher Spalthöhen beschrieben. Abbildung 5.6 zeigt für typische Spaltmaße jeweils charakteristische Erscheinungsformen der Nahtberraupe. Beim Schweißen der Naht wurden keine Leistungs- oder Geschwindigkeitsrampen zur Verbesserung der Nahtqualität eingesetzt, die Schweißversuche wurden mit einer Laserleistung von 4,0 kW durchgeführt.



Abbildung 5.6: Spaltabhängige Topografie der Nahtberraupe bei Überlappschweißnähten auf verzinkten Blechen (links: Nullspalt, Mitte: 0,05 mm Spalt, rechts: 0,25 mm Spalt). $P_L=4,0$ kW, $v=5$ m/min.

Am Nahtanfang ist oft die Entstehung einer Nahtüberhöhung oder ein verstärkter Schmelzbadauswurf, der im Allgemeinen kein Loch hinterlässt, zu beobachten. Die Topografie der erstarrten Schweißnaht bei geringen Spaltmaßen ist gekennzeichnet durch kräftige V-förmige Erstarrungslinien (Fischgrätenmuster) und zeigt oft eine unsymmetrische Schuppung. Kann beim Schweißen von verzinkten Blechen kein Fügespalt eingehalten werden oder ist ein zu kleiner vorhanden, so weist die Schweißnaht viele Auswürfe, Poren und Spritzer auf. Bei hinreichend großen Spaltmaßen ist die Topographie der Nahtoberraupe hingegen annähernd frei von oben genannten Erstarrungslinien.

„Falsche Freunde“ zeigen ebenfalls keine Erstarrungslinien auf der Nahtoberraupe. Insofern zeigen sie ein ähnliches Erscheinungsbild wie Proben mit zu großem Spaltmaß. Im Unterschied zu diesen Proben weisen „Falsche Freunde“ aber keinerlei Nahtunterwölbungen auf und können hierdurch von Proben mit zu großem Spaltmaß unterschieden werden. Mit diesen Informationen ist es möglich, auf den etwaigen Spalt einer Schweißnaht zu schließen, ohne einen Querschliiff der Schweißprobe anzufertigen.

Der Nahtenfall ist bei kleinen Spaltmaßen gering. Dies gilt jedoch nicht, wenn der Spalt gegen Null geht und auf Grund einer Vielzahl von Auswürfen sehr viel Schmelze verloren geht.

Abbildung 5.7 zeigt das Verhalten der Lochhäufigkeit, dabei bedeutet der Wert 1 mindestens ein Loch pro Schweißnaht (Fehlerquote von 100 %: alle Schweißnähte sind fehlerhaft, Fehlerquote von 50%: die Hälfte der geschweißten Proben enthalten Fehler), bezogen auf eine 20 mm lange Steppnaht, in Abhängigkeit des Spaltmaßes bei Materialstärken von je 0,7 mm und 1,5 mm bei verschiedenen Fokussdurchmessern von 510 μm und 680 μm . Die Häufigkeit von Löchern erreicht bei der Kombination der dünnen Bleche bereits mit einem Spaltmaß von 0,25 mm, unabhängig vom Fokussdurchmesser, nahezu 100 % Fehlerwahrscheinlichkeit, während mit der Blechkombination von 2x 1,5 mm bei diesem Spaltmaß 25 – 35 % Fehlerwahrscheinlichkeit erreicht wird. Die optische Auswertung der Fehler ergab, dass es sich ausschließlich um Einschlüsse im Endkraterbereich handelt.

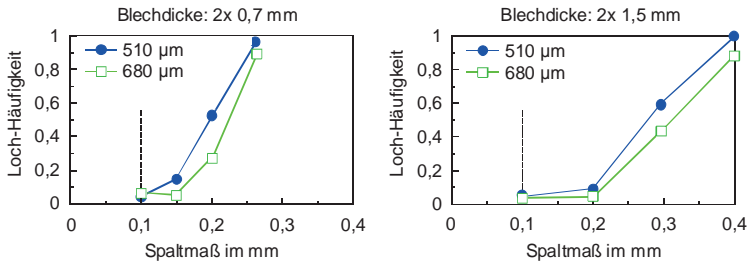


Abbildung 5.7: Fehlerhäufigkeit (Löcher in der Schweißnaht), bezogen auf eine 20 mm lange Steppnaht, in Abhängigkeit des Spaltmaßes bei unterschiedlichen Materialstärken bei Fokussdurchmessern von 510 µm und 680 µm.

Qualitativ kann die Fehlerhäufigkeit in Abhängigkeit des Spaltmaßes unabhängig vom Fokussdurchmesser d_f in folgender Abbildung 5.8 zusammengefasst werden. Die Bereiche A (Spritzer) und B (Löcher) markieren die Bereiche, in denen es zu Schweißnahtfehlern kommt. In Abschnitt 5.3.1.2 werden die dabei eine Rolle spielenden Einflussgrößen näher beschrieben.

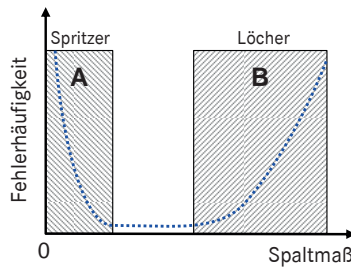


Abbildung 5.8: Qualitative Fehlerhäufigkeit in Abhängigkeit des Spaltmaßes unabhängig vom Fokussdurchmesser.

Bei einem Idealspalt von 0,1 bis 0,2 mm können speziell bei dünnen Blechen Endkrater und auch Einschüsse im Bereich des Endkraters auftreten. Die Entstehung des Endkraters ist verfahrensbedingt; er entsteht beim Laserstrahlschweißen durch die Schmelzeumströmung der Dampfkapillare entgegen der Schweißrichtung: aufgrund von Erstarrungsvorgängen kann nach Abschalten des Lasers die am Schmelzbadende "aufgetürmte" Schmelze das zuvor von der Dampfkapillare eingenommene Volumen nicht vollständig auffüllen.

Bei sehr kleinen Spaltmaßen um 0,05 mm entwickelt sich eine hohe Schmelzbad-dynamik. Teilweise entstehen dadurch Auswürfe, die aber nicht zwingend auch zur Lochentstehung führen müssen, weil dies durch die noch flüssige Schmelze in der Umgebung verhindert und ausgeglichen werden kann.

Blechedicke

Die Spaltüberbrückbarkeit beim Laserstrahlschweißen hängt stark von den Blechdicken der Schweißaufgabe ab. Die Toleranzen gegenüber dem Fügespalt sind bei dünnen Blechen mit $t = 0,6 - 0,8$ mm geringer als bei dickeren Materialien. Es entstehen daher bei dünnen Blechen in verstärktem Maße Endkrater oder auch Einschlüsse, sofern der Idealspalt nicht eingehalten werden kann.

Ohne prozesstechnische Zusatzmaßnahmen gestaltet sich die Einhaltung der Spalttoleranz, insbesondere bei der dünnen Blechkombination, als sehr schwierig. Prozesstechnische Potenziale und Maßnahmen zur Verbesserung der Nahtqualität sind anhand dieser Ergebnisse zwingend erforderlich. Die Verbesserung der Nahtqualität und die Entwicklung zusätzlicher Prozessparameter wird in Kapitel 6 diskutiert.

Material

Bei den für diese Arbeit verwendeten Materialien wurde der Schwerpunkt in Bezug auf die Fehlerentstehung auf den Stahl ZStE340 mit elektrolytischer Verzinkung gelegt. Daher sind Aussagen zur Fehlerentstehung – speziell für den TRIP700 – nur schwer möglich. Schweißergebnisse deuten allerdings auf ähnliche Resultate bei vergleichbaren Schweißparametern hin.

Die Nahtoberraupe erscheint auf dem TRIP700 sehr viel glatter als bei den anderen Werkstoffen (siehe Abbildung 5.9). Speziell bei kleinen Spaltmaßen kann bei DC04 eine deutliche Schuppung festgestellt werden, welche auf dem höchstfesten Stahl weniger ausgeprägt ist.

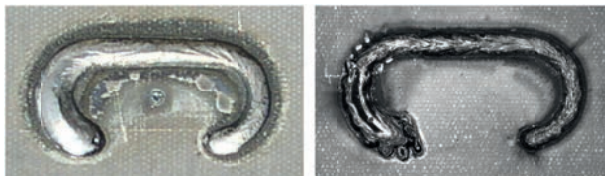


Abbildung 5.9: Vergleich der Nahttopografie und Nahtbreite bei TRIP700 (links) und ZStE340 (rechts) bei kleinem Spaltmaß. Die Schweißrichtung verläuft gegen den Uhrzeigersinn.

Die Betrachtung der Schliffbilder zeigt für den TRIP700 größere Nahtbreiten, verglichen mit beiden anderen Werkstoffen DC04 und ZStE340. Dies ist auf die geringere Wärmeleitfähigkeit des höchstfesten TRIP-Stahl, wie in Tabelle 3.1 dargestellt, zurückzuführen. Weiter wird die Bildung einer Oxidhaut direkt hinter der Dampfkapillare beim Schweißen beobachtet, welche dem Effekt der Oberflächenspannung entgegen wirken kann und eine Schuppung daher ausbleibt.

Beschichtung

Bei den verwendeten Beschichtungen unterscheidet sich die Nahtqualität bei vergleichbaren Prozessparametern praktisch nicht. Bei der Einhaltung von 0,1 mm Mindestspaltmaß sind alle Korrosionsschutzschichten fehlerfrei – also ohne Zinkentgasung über die Schmelze – und die Bleche folglich ohne Porenbildung schweißbar.

5.3.1.2 Laser- und prozessbedingte Einflussgrößen

Die konkrete Auswahl der Schweißparameter orientiert sich im Wesentlichen an der gewünschten Nahtgeometrie, wobei die notwendige Einschweißtiefe bzw. Durchschweißung von großer Bedeutung ist. Die verfügbare Laserleistung bestimmt mit den Einflussgrößen Fokusbereich und Materialstärke die Schweißgeschwindigkeit für die jeweils geforderte Einschweißtiefe.

Einfluss der Schweißgeschwindigkeit und des Fokusbereichs auf das minimal einzuhaltende Spaltmaß

In [1] wird für schlanke, weitgehend zweidimensionale Nahtgeometrien der Zusammenhang zwischen den Schweißparametern Leistung P_L , Schweißgeschwindigkeit v_s und Fokusbereich d_f zur Einschweißtiefe hergeleitet:

$$\frac{P_L}{d_f} \sim t_{ges} \cdot v_s \quad (5.2)$$

Dieser, aus einer einfachen Energiebilanz folgenden Beziehung liegt die Annahme einer zu d_f proportionalen Nahtbreite zu Grunde. Aus Gl. 5.2 wird ersichtlich, dass die Durchschweißung einer Blechverbindung (mit t_{ges} = Gesamtblechdicke) für eine vorgegebene Geschwindigkeit von der spezifischen Leistung P_L/d_f abhängig ist. Eine Steigerung der Laserleistung bei unveränderten Fokussierbedingungen kann somit direkt in eine höhere Schweißgeschwindigkeit umgesetzt werden. Bei ansonsten fest gehaltenen Größen P und t_{ges} ergibt sich bei höheren Schweißgeschwindigkeiten eine reduzierte Schweißnahtbreite sowohl auf der Blechoberseite, als auch in der Fügebe-

ne, die Nahtbreite nähert sich stärker d_f an. Unter der Annahme, dass der Durchmesser der Dampfkapillare bei gleichem Fokussdurchmesser nahezu konstant bleibt, erhält man durch Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit dünnere Schmelzfilme um die Dampfkapillare. Da mit Steigerung der Schweißgeschwindigkeit auch das pro Zeiteinheit aufgeschmolzene Volumen zunimmt, folgen daraus bei einer Schweißgeschwindigkeits- und gleichzeitiger Laserleistungssteigerung deutlich höhere Strömungsgeschwindigkeiten um die Dampfkapillare.

Nach analytischen Berechnungen in [97] wird die Schmelzfilmbreite b_s mit steigender Schweißgeschwindigkeit kleiner. Bei einer Vergrößerung des Fokussdurchmessers steigt die Schmelzgeschwindigkeit an der Stelle b_s bei gleicher Schweißgeschwindigkeit ebenfalls an. Eine Darstellung der maximalen Schmelzgeschwindigkeit an der Stelle b_s seitlich an der Dampfkapillare als Funktion von v und d_f kann nach [98], die auf den geometrischen Betrachtungen in [97] beruht, ist in Abbildung 5.11, nach [1] wiedergegeben. Die maximale Schmelzgeschwindigkeit u_{max} um die Kapillare für die hierin typischen Werte von d_f beträgt bei Schweißgeschwindigkeiten von 3 m/min daraus folgend etwa 10 m/min. Bei einer Steigerung der Schweißgeschwindigkeit auf 5 m/min erhöht sich u_{max} auf über 20 m/min.

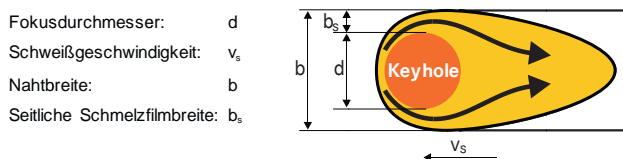


Abbildung 5.10: Qualitative Darstellung der Schmelzströmung um eine Dampfkapillare.

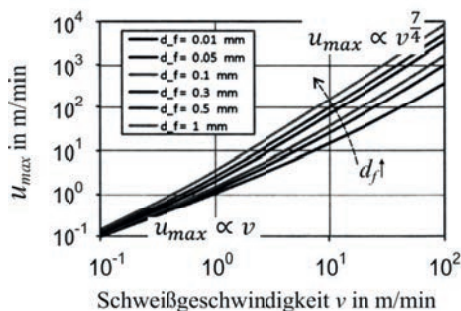


Abbildung 5.11: Analytisch berechnete maximale Schmelzgeschwindigkeit u_{max} an der Seite einer zylindrischen Kapillare in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit v_s und des Kapillardurchmessers d_f [1], [98].

Bei der Vermessung von Querschliffen ergibt sich bei einer Steigerung der Schweißgeschwindigkeit bei gleichem Fokussierdiameter auch eine Reduzierung der Entzinkungsbreite (siehe Abbildung 5.12). Laserleistung und Schweißgeschwindigkeit sind hierbei so aufeinander abgestimmt, dass eine saubere Durchschweißung gewährleistet ist. Ein Vergleich mit einer Schweißsimulation mit “DC-Lasim”⁵ zeigt qualitativ dasselbe Ergebnis.

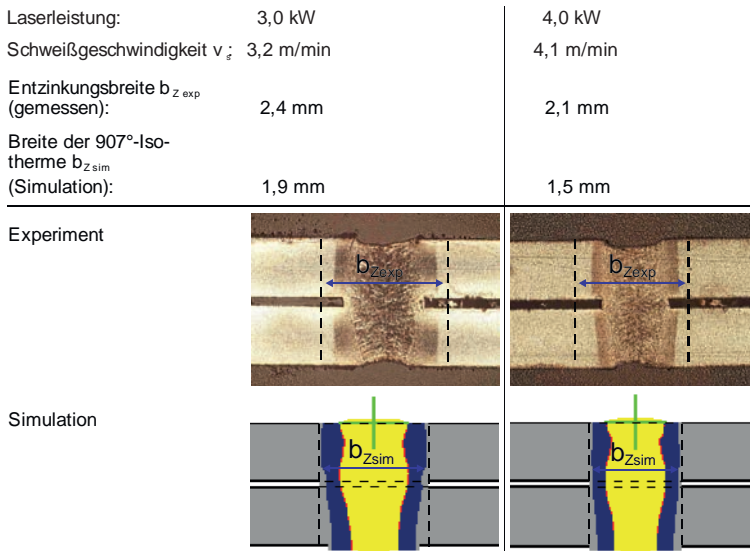


Abbildung 5.12: Vergleich zweier Schweißnähte bei gleichen Fokussierbedingungen mit 3 kW (links) und 4 kW (rechts). Es ergeben sich unterschiedliche Nahtbreiten und Entzinkungsbreiten (gestrichelt gekennzeichnet).

Die Entzinkungsbreite $b_{z\text{ sim}}$ wird bei der Simulation, die für blanken Stahl erfolgte, mit Hilfe der 907 °C-Isotherme angenommen, was der Verdampfungstemperatur von Zink entspricht, die experimentell ermittelten Entzinkungsbreiten sind etwas größer. Aus den gemessenen Werten folgt eine Abhängigkeit der Entzinkungsbreite b_z zur Schweißgeschwindigkeit v_s nach einer näherungsweisen Funktion

⁵ DC-Lasim ist ein anwendungsorientiertes Simulationsprogramm für das Laserstrahlschweißen. Es berücksichtigt relevante Mechanismen der Energieeinkopplung wie Strahlpropagation, und -absorption, Mehrfachreflexion, Wärmeleitung und Plasmabildung. Auch ein vereinfachter Ansatz zum Einfluss der Konvektion auf die Schmelzbadausbildung ist darin berücksichtigt.

$$b_Z \propto \frac{1}{v_s^{\frac{1}{2}}} \quad (5.3)$$

Unter der Annahme, dass die für den Prozess kritische Zinkdampfmenge in der Fügeebene nach Abbildung 5.13 entsteht und die Zinkschichtdicke $d_Z=10\text{ }\mu\text{m}$ bei den verwendeten Stählen beträgt, werden nach Gl. 5.4

$$\dot{V}_{Zfest} = 2 \cdot d_Z \cdot b_{Zexp} \cdot v_s \quad (5.4)$$

$2,5\text{ mm}^3$ Zink je Sekunde bei einer Schweißgeschwindigkeit von $3,2\text{ m/min}$ des festen Zustands verdampft. Bei Steigerung der Schweißgeschwindigkeit auf $4,1\text{ m/min}$ beträgt der Zinkvolumenstrom ($b_{Zexp} = 2,1\text{ mm}$) im festen Zustand $2,9\text{ mm}^3$ pro Sekunde.

Trotz einer reduzierten Entzinkungsbreite in Folge höherer Schweißgeschwindigkeit steigt die Menge an verdampftem Zink je Zeiteinheit bei höherer Schweißgeschwindigkeit. Aus der Proportionalität in Gl. 5.3 und aus Gl. 5.4 ergibt sich eine Abhängigkeit:

$$\dot{V}_{Zfest} \propto v_s^{\frac{1}{2}} \quad (5.5)$$

Die Vermutung, dass sich der erforderliche Minimalspalt auf Grund einer geringeren Zinkdampfmenge bei hohen Schweißgeschwindigkeiten reduzieren lässt, die mancherorts kolportiert wurde, ist also falsch, da mit steigender Schweißgeschwindigkeit der Massenstrom des festen wie auch dampfförmigen Zinks zunimmt.

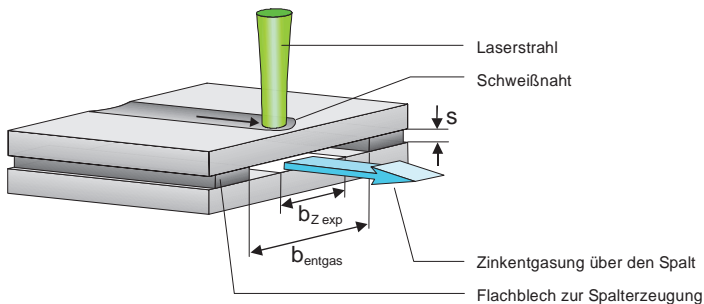


Abbildung 5.13: Geometrische Darstellung der angenommenen Zinkentgasung über den Fügespalt und der Entgasungsbreite b_{entgas} .

Experimentell wurde nachgewiesen, dass bei Schweißgeschwindigkeiten im Bereich von 3-8 m/min und bei Blechdicken bis 1,5 mm ein Spaltmaß von 0,1 mm gerade noch für eine porenfreie Schweißnaht ausreicht. Bei einer Unterschreitung entweicht ein Teil des Zinkdampfes über den Schmelzfilm und über die Dampfkapillare auf Grund des zu hohen Druckaufbaus im Spalt. Letztendlich ist der Druck des Zinkdampfes auf die Dampfkapillare und auf den sie umgebenden Schmelzefilm die entscheidende Größe, welche auf die Prozessstabilität Einfluss nimmt.

Die experimentellen Untersuchungen konnten weiter zeigen, dass nicht nur das Spaltmaß für die Zinkentgasung entscheidend ist, sondern die gesamte Entgasungsfläche ($b_{\text{entgas}} \times s$). So kann bei Bauteilen mit geringer Entgasungsbreite ein größeres Spaltmaß erforderlich sein.

Einfluss des Fokusedurchmessers, der Schweißgeschwindigkeit und des Spaltmaßes auf den Nahtquerschnitt

Die maximal erreichbare Schweißgeschwindigkeit für eine volle Durchschweißung bei Überlappnähten bei vorgegebener Blechdicke und Laserleistung wird maßgeblich durch die Wahl des Fokusedurchmessers beeinflusst. Entsprechend Gleichung 5.2 kann die Schweißgeschwindigkeit mit kleinerem Fokusedurchmesser erheblich gesteigert werden. Einhergehend mit einer Reduzierung des Fokusedurchmessers entstehen dabei in Folge der hohen Schweißgeschwindigkeit sehr schlanke Schweißnähte.

Die Anbindebreite in der Fügeebene ist bei Überlappverbindungen eine für die Nahtfestigkeit relevante Größe. Sie ist sehr wichtig, um Aussagen über die Festigkeitseigenschaften einer Naht zu machen. In erster Näherung soll die Anbindebreite dabei mindestens die Größe des dünneren Fügepartners haben. Die Abbildung 5.14 zeigt dieses Verhalten bei zwei unterschiedlichen Fokusedurchmessern.

Diese so erzielten, schlanken Nähte weisen deshalb eine Reduzierung des Anbindequerschnitts in der Fügeebene auf. Da eine nach Norm bzw. bauteilspezifisch geforderte Anbindebreite von etwa der Blechstärke erforderlich ist, kann das Potenzial der hohen Schweißgeschwindigkeit bei kleinerem Fokusedurchmesser, insbesondere bei dicken Blechen, nicht genutzt werden.

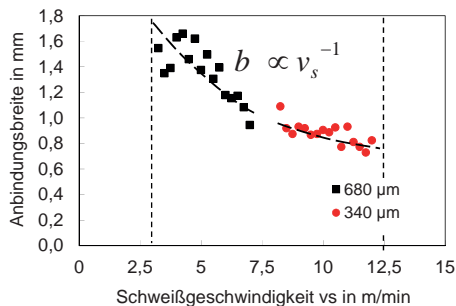


Abbildung 5.14: Verhältnis zwischen Anbindungsbreite in der Fügeebene und Schweißgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Fokusbereichen (Blechdicke $t = 2 \times 1,0$ mm); bei $v_s \geq 7,5$ m/min ist keine zufriedenstellende Anbindungsbreite möglich.

Aus der experimentell gefundenen $b(v_s)$ -Abhängigkeit (siehe Abbildung 5.14) folgt in erster Näherung eine umgekehrte Proportionalität des Anbindequerschnitts b von der Schweißgeschwindigkeit v_s , woraus man entsprechend Gleichung 5.2 schließen kann, dass weitgehend zweidimensionale Umströmung der Kapillare vorliegt und mehr oder minder ein rechteckiger Querschnitt zu Stande kommt (siehe auch Abbildung 5.12).

Die Kombination von Fokusbereich und Schweißgeschwindigkeit bei konstanter Laserleistung hat nicht nur Einfluss auf die Nahtgeometrie und deren Festigkeit, sondern auch auf die Qualität der Nähte. Die folgende Versuchsreihe mit den Parametern

- Nahtlänge: $l = 20$ mm
- Material: ZStE340, elektrolytisch verzinkt, $t = 2 \times 1,0$ mm
- Laserleistung: $P_L = 4,0$ kW
- Fokusbereich: $d_{f1} = 340$ µm, $d_{f2} = 680$ µm
- Schweißgeschwindigkeit: $v_1 = 8,0$ m/min, $v_2 = 4,0$ m/min
- Spaltvariation: $s = 0,1 \dots 0,4$ mm

soll den Einfluss des Fokusbereichs auf die Schweißnahtqualität vor allem im Bereich des Nahtendes verdeutlichen.

Bei genauerer Beobachtung des Prozesses und Betrachtung der Schweißergebnisse stellt man fest, dass bei einem Spaltmaß ab $0,2$ mm die schlankeren Schweißnähte, im Vergleich zu den mit größerem Fokus geschweißten Nähten, einen scharfkantigeren Einbrand aufweisen. Die Größe des Nahteinfalls kann in erster Näherung bei beiden

Schweißnähten, sowohl mit $d_{f1} = 340 \mu\text{m}$ als auch mit $d_{f2} = 680 \mu\text{m}$, als gleich betrachtet werden.

Das kritische Spaltmaß, ab welchem Endkraterlöcher und Anbindungsfehler in nicht zu tolerierender Häufigkeit entstehen, liegt nach den Schweißversuchen mit kleinerem Fokusbereich bei kleineren Werten. Die Abbildung 5.15 zeigt die in qualitativer Weise erfasste Fehlerverteilung bei unterschiedlichen Fokusbereichen.

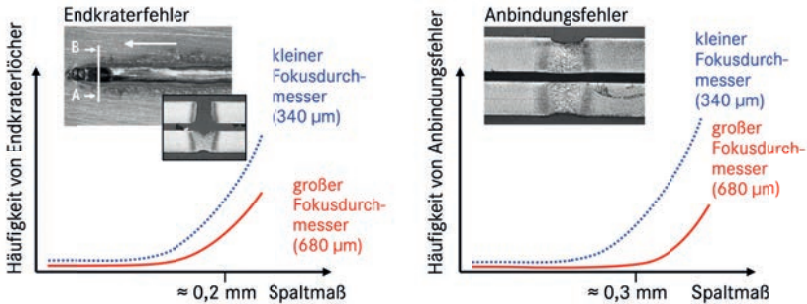


Abbildung 5.15: Qualitativer Vergleich der Fehlerverteilung beim Schweißen von Überlappnähten mit unterschiedlichen Fokusbereichen. Rechts: Häufigkeit von Anbindungsfehlern (Falsche Freunde), links: Häufigkeit von Endkraterlöchern, aufgetragen über das Spaltmaß.

Die Abbildung 5.16 zeigt Standbilder aus einer Hochgeschwindigkeits-Videosequenz für einen Schweißstepp kurz vor Erreichen des Nahtendes bei gleichen Spaltmaßen, welche $0,25 \text{ mm}$ betragen. Insbesondere gegen Nahtende bildet sich bei diesen Versuchen keine typische Kapillare am Oberblech mehr, da sich die seitlich strömende Schmelze erst deutlich weiter hinten im Abstand a vereint. Auf den Bildern kann man gut erkennen, wo sich die Schmelzbäder bezüglich der Dampfkapillare befinden (Schmelzbaderabstand a) und welche Dimensionen das geöffnete Schmelzbad dabei annimmt. In Abbildung 5.17 wird das Nahtende nach Abbildung 5.16 in Form einer Skizze dargestellt. Zumindest im Oberblech kann von einer Dampfkapillare im eigentlichen Sinn keine Rede mehr sein, da die Phasengrenze dampfförmig/flüssig viel zu weit hinten liegt, als dass noch eine direkte Wechselwirkung mit dem Laserstrahl stattfinden könnte.

Die unterbrochenen Linien in den jeweiligen Abbildungen (linker oberer Bildrand) stellen die Form der verbleibenden Endkrater dar. Bei der Vermessung der Endkraterlöcher zeigt sich, dass diese auf den Blechen, welche mit kleinerem Fokusbereich geschweißt sind, auf Grund der schlankeren Schweißnaht, eine schmale, lange Form

aufweisen. Die Endkraterlöcher der mit einem größeren Fokusdurchmesser geschweißten Nähte sind breiter und etwas kürzer. In beiden Fällen gehen die Endkraterlöcher nahezu über die gesamte Schweißnahtbreite.

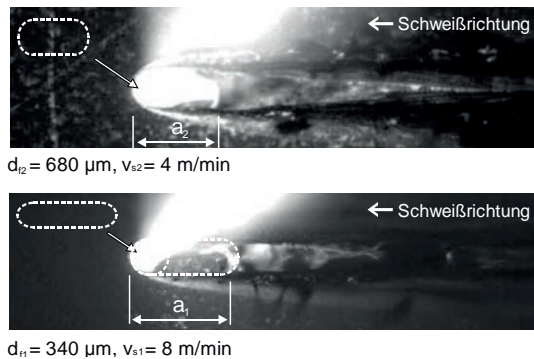


Abbildung 5.16: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zweier Schweißsteps: bei gleichen Spaltbedingungen kurz vor Erreichen des Nahtendes ergeben sich jeweils verschiedene Endkratergeometrien als Folge unterschiedlicher Schmelzbadabstände a zur Front der Dampfkapillare. Die Laserleistung beträgt 4,0 kW.

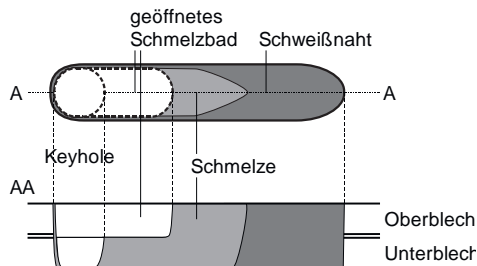


Abbildung 5.17: Vereinfachte grafische Darstellung des Schweißnahtendes mit geöffnetem Schmelzbad in der Draufsicht und im Längsschnitt.

Insgesamt ist die Fehlerhäufigkeit bei kleinem Fokusdurchmesser höher als bei einem großen Fokusdurchmesser, siehe Abbildung 5.15. Die Verschiebung der Kurve „kleiner Fokusdurchmesser“ zu größeren Fehlerraten ist bereits in Abbildung 5.7 erkennbar. Die Reduzierung auf noch kleinere Fokusdurchmesser als $340 \mu\text{m}$, wie hier diskutiert, bestätigt diesen Einfluss auf die Fehlerhäufigkeit deutlich.

In den Aufnahmen mit der Hochgeschwindigkeitskamera ist bei einer Schweißgeschwindigkeit von mehr als 8 m/min bzw. beim Schweißen mit kleinem Fokusedurchmesser eine erhöhte Spritzerbildung zu beobachten. Dabei handelt es sich um kleinste Spritzer, welche die Nahtqualität nur sehr wenig beeinflussen. Allerdings ist die Schutzglasverschmutzung durch den schnellen Partikelflug kritischer.

Bei praktischen Anwendungen zum Schweißen von Karosseriewerkstoffen mit Festkörperlasern werden auf Grund mangelnder Spaltüberbrückbarkeit und reduziertem Anbindequerschnitt keine Fokusedurchmesser kleiner als 500 μm eingesetzt. Kleinere Fokusedurchmesser sind darüber hinaus auf Grund eines zu geringen Arbeitsabstandes oder zu geringer Rayleighlänge bei gegebener Strahlqualität ebenfalls beim Einsatz des Scannerschweißens nicht produktionstauglich.

Einfluss der Schweißnahtlänge und des Spaltmaßes auf den Nahtquerschnitt

Bei der Auswertung diverser Schliffbilder und Schweißnahttopografien ist zu beobachten, dass sowohl die Spaltentwicklung, also die Änderung des Spaltmaßes innerhalb einer Schweißnaht, als auch das mittlere Spaltmaß entlang einer Schweißnaht eine entscheidende Rolle spielt. Dabei ist vor allem der Spaltverlauf gegen Ende der Schweißnaht von Bedeutung. So entstehen deutlich mehr Fehler, wenn das Spaltmaß gegen Nahtende zunimmt.

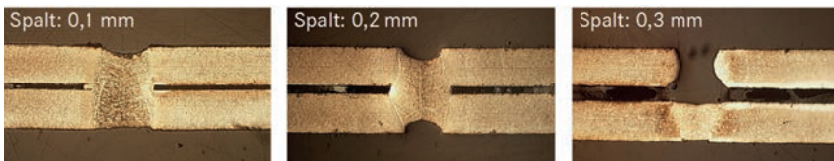


Abbildung 5.18: Verteilung der Schmelze am Nahtende einer 20 mm langen Steppnaht bei unterschiedlichen Spaltmaßen bei einer Blechdicke von $t = 2 \times 0,7 \text{ mm}$, geschweißt mit 5,0 m/min und einem Fokusedurchmesser von 680 μm .

In Abbildung 5.18 ist die Verteilung der erstarrten Schmelze im Bereich des Nahtendes bei unterschiedlichen Entgasungsspalten dargestellt. Während mit einem Entgasungsspalt von 0,1 mm ein optisch akzeptabler Endkrater entsteht, ist mit 0,3 mm Spalt ein großer Einschuss im Oberblech zu erkennen. Fertigt man am Ende der in Abbildung 5.16 oben gezeigten Schweißnaht einen Querschliff an, so entspricht dieser der Abbildung 5.18 rechts: Ein großes Endkraterloch verbleibt nach einer vorangegangenen Schmelzbadöffnung.

Die Untersuchungen mit der Hochgeschwindigkeitskamera zeigen deutlich, dass bei steigendem Spaltmaß eine Schmelzbadöffnung hinter der Dampfkapillare (Einkoppelgebiet) entsteht, deren Länge weit größer als der Laserstrahl- bzw. der Kapillardurchmesser zu Beginn der Schweißnaht ist, was weiter oben bereits im Zusammenhang mit der Erörterung von Endkratern beschrieben wurde. Diese Öffnung vergrößert sich jedoch auch noch mit zurückgelegter Schweißstrecke, was in Abbildung 5.19 veranschaulicht wird. Die Position der so entstandenen Schweißnahtunregelmäßigkeit ist bei großem Spaltmaß nicht nur auf das Nahtende begrenzt. Das „Abreißen“ der Schmelze, d.h. die Aufteilung in zwei seitliche Strömungsfilme entlang der Außenseite der Schweißnaht, kann bereits kurz nach Schweißbeginn auftreten. Nach Vereinigung der beiden Schmelzflüsse zu einem gemeinsamen, „geschlossenen“ Schmelzbad erfolgt dann erneut die Bildung einer Kapillare bzw. einer Schmelzbadöffnung, als wäre es ein nächster Schweißbeginn. Ist beispielsweise bei den Abbildung 5.19 zugrunde liegenden Parametern eine längere durchgängige Strichnaht, z.B. über mehrere hundert Millimeter vorgesehen, so wird diese Schweißnaht in regelmäßigen Abständen von Löchern durchbrochen sein. Im Folgenden wird diese Art des Nahtfehlers als Schmelzbadabrissloch (siehe auch Abschnitt 5.3.2) bezeichnet, welche sich als längliche Fehlstelle im Oberblech darstellt.

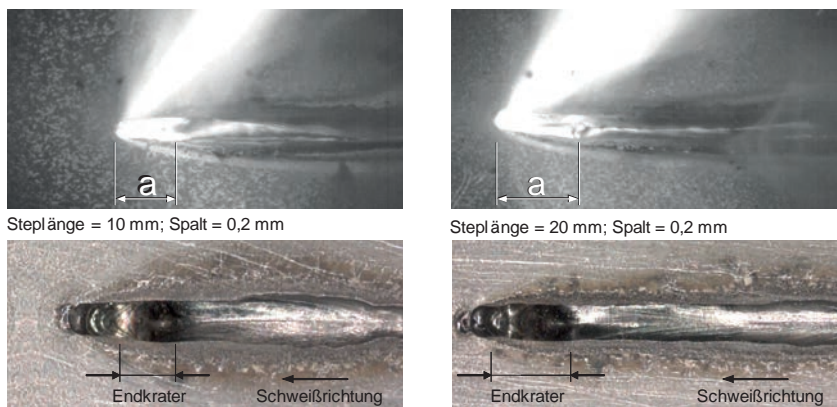


Abbildung 5.19: Schmelzbadöffnung a hinter der Dampfkapillare (obere Bildreihe) und Vergrößerung der Endkraterlänge mit zunehmender Schweißlänge (untere Bildreihe) insbesondere bei Spaltmaßen größer 0,2 mm (Blechdicke $t = 2 \times 0,7$ mm, Spaltmaß: 0,2 mm, links: 10 mm Steppnaht, rechts: 20 mm Steppnaht, Schweißgeschwindigkeit 5,0 m/min).

Einfluss des Durchschweißgrades auf den Nahtquerschnitt

Der Durchschweißgrad hat nennenswerten Einfluss auf die entstehende Nahtgeometrie, insbesondere auf den Nahteneinfall. So sind die gemessenen Nahteneinfälle für Spaltmaße von 0,15 und 0,25 mm bei Einschweißung immer größer als bei voller Durchschweißung, siehe Abbildung 5.20.

Bei Einschweißung ist eine Spaltfüllung nur durch die Schmelze möglich, welche vom Oberblech zur Verfügung steht, so dass der Nahteneinfall entsprechend groß ausfällt. Nachteilig kommt hinzu, dass beim Einschweißen vermehrt Auswürfe, insbesondere bei kleinen Spaltmaßen, entstehen. Abbildung 5.20 zeigt eine starke Nahtunterwölbung, wenn nur Einschweißen stattfindet. Beim Durchschweißen entsteht eine geringere Nahtunterwölbung, es ist eine Spaltfüllung sowohl durch die Schmelze des Ober- als auch über die des Unterblechs möglich.

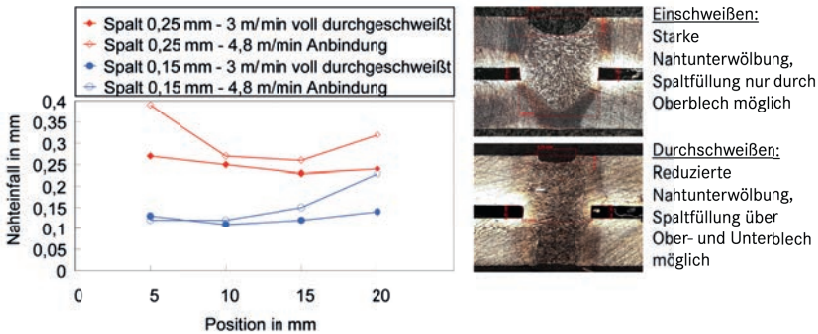


Abbildung 5.20: Nahteneinfall gemessen an der Nahtoberraupe in Abhängigkeit von Spaltmaß und Einschweißtiefe entlang einer 20 mm langen Steppnaht.

Im Schmelzbad entstehen in Folge der Oberflächenspannung auf der Blechober- und -unterseite schon während des Schweißprozesses Nahtunterwölbungen. Diese haben auf beiden Seiten ähnliche Dimensionen der Krümmungsradien, was bedeutet, dass die Oberflächenspannungskräfte den Gewichtskräften der Schmelze weitgehend symmetrisch entgegen wirken. Dadurch ist beim Durchschweißen auch eine größere Spaltüberbrückbarkeit zu erzielen. Weiterhin bildet sich beim Durchschweißen eine durch beide Bleche durchgehende Dampfkapillare, was eine deutlich bessere Entgasung zur Folge hat. Während beim Einschweißen die Zinkdämpfe ausschließlich über den Spalt bzw. durch die Kapillare entgegen der Strahlrichtung entweichen müssen, kann beim Durchschweißen eine zusätzliche Entgasung über die zweite Öffnung der Dampfkapillare erreicht werden.

Eine vollständige Durchschweißung im Vergleich zum Einschweißen ist mit einer Reduzierung der Schweißgeschwindigkeit verbunden. Insbesondere beim Schweißen von dünnen Blechen ist eine Durchschweißung auf Grund besserer Spaltüberbrückbarkeit von Vorteil. Dadurch nimmt die Spaltmaßtoleranz zu und das Prozessfenster wird größer. Bei dicken Blechen muss eine Abschätzung erfolgen, ob eine stärkere Spritzerbildung akzeptiert werden kann oder ein Geschwindigkeitsvorteil mehr von Bedeutung ist.

In der industriellen Fertigung wird – unabhängig der Blechdicke – in den meisten Fällen eine volle Durchschweißung bevorzugt, damit bei einer Sichtprüfung die Anbinde der Schweißnähte gewährleistet werden kann.

Einfluss der Nahtmuster auf die Schweißnahtqualität

Die Zinkentgasung hat, wie in einigen Abschnitten erwähnt, großen Einfluss auf die Schweißnahtqualität – eine verzögerte bzw. verhinderte Entgasung ist nachteilig. Eingeschlossenes Zinkdampfvolumen mit erhöhtem Druck muss über die Schmelze entweichen und vermindert dadurch die Schweißnahtqualität.

Versuche ergaben, dass gegen Ende des Schweißvorgangs bei einer kreisförmigen Naht oder anderen geometrisch geschlossene Formen verstärkt Zinkdampf über die Schmelze entweicht und dadurch Spritzerbildung verursacht wird, was zu einer signifikanten Qualitätsverschlechterung führt. Der in das Kreissinnere entweichende und dort eingeschlossene Zinkdampf gegen Nahtende entweicht trotz Spaltmaß zwischen den Blechen von 0,1 mm über die Schmelze, siehe Abbildung 5.21 rechts. Es sind daher beim Laserschweißen verzinkter Bleche geometrisch offene Schweißmuster zu bevorzugen, siehe Abbildung 5.21 links. Ein kreisförmiges Schweißmuster mit 330° Umfang bietet bereits genügend verbleibenden Entgasungsquerschnitt am Nahtende und führt nicht mehr zu der beschriebenen Problematik. Eine linear geführte Steppnaht stellt diesbezüglich die prozesssicherste Schweißgeometrie dar.



Abbildung 5.21: Links: Offenes Nahtmuster ermöglicht Zinkentgasung über den verbleibenden Spalt, Rechts: geschlossenes Nahtmuster behindert Zinkentgasung am Nahtende, Spritzer und Materialauswürfe trotz Spaltmaß von 0,1 mm sind die Folgen des durch das Schmelzbad entweichenden Dampfes.

5.3.1.3 Zusammenfassung der Einflussgrößen auf die Fehlerentstehung

Für die hier interessierenden Werkstoffe und bei für die industrielle Umsetzung relevanter Prozessparameter ergeben die Untersuchungen folgendes Bild:

- Der minimale Spalt für eine fehlerfreie Schweißnaht bei elektrolytisch verzinktem Material beträgt 0,1 mm für die Blechdicken 2x 0,7 mm bzw. 2x 1,0 mm.
- Mit zunehmendem Spaltmaß vergrößert sich der Endkrater und wird schließlich zum Endkraterloch.
- Bei kleinerem Fokusdurchmesser werden vermehrt Endkrater und Anbindefehler beobachtet.
- Je länger ein Nahtmuster bei großen Spaltmaßen ist, umso wahrscheinlicher sind Schmelzbadabrissfehler in der Schweißnaht oder im Endkrater.
- Bei einer vollständigen Durchschweißung können größere Spaltmaße als bei einer Einschweißung überbrückt werden.
- Bei geschlossenen Schweißmustern kann es im Bereich des Nahtendes zu Auswürfen durch unkontrollierte Zinkentgasung kommen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass insbesondere die Größen Spaltmaß und Fokusdurchmesser die Prozessstabilität beim Laserschweißen verzinkter Bleche vorgegebener Dicke bestimmen.

Die Beurteilung der Topografie einer Nahtraupe, wie beispielsweise den Ausprägungsgrad der Erstarrungslinien in Abbildung 5.6, hat den entscheidenden Vorteil, dass eine Aussage über den vorherrschenden Spalt ohne Zerstörung des Bauteils gemacht werden kann. Somit kann diese Analysemethode auch für Bauteile angewandt werden, die qualitativ noch in Ordnung sind, sich aber bereits im kritischen Bereich zur Fehlerentstehung befinden. Insbesondere für solche Bauteile ist es wichtig, zielführend den Prozess zu optimieren. Ein weiterer Vorteil dieser Analyse ist, dass kein aufwändiges Equipment wie beispielsweise ein Stereoauflichtmikroskop benötigt wird.

5.3.2 Fehlerentstehung

Das Laserstrahlschweißen ist ein „offenes“ Schweißverfahren. Während des Schweißprozesses bildet sich im Werkstück in Folge der Energieeinkopplung durch den dabei entstehenden Metaldampfdruck die Dampfkapillare aus. Die sie im Wesentlichen

seitlich umströmende Schmelze fließt während des Schweißvorgangs hinter der Dampfkapillare wieder zusammen und schließt die "Öffnung" in aller Regel; d.h., sie füllt den aufgeschmolzenen Querschnitt wieder auf. Defizite im Schmelzbad durch Spritzer und große Spalte können jedoch dazu führen, dass die Dampfkapillare bzw. ein hinter ihr noch geöffnetes Schmelzbad beim Erreichen des Nahtendes nicht vollständig geschlossen wird und damit ein Nahtfehler verbleibt.

Üblicherweise wird eine Schweißung anhand des zu sehenden Resultats, also nach dem Prozess, bewertet. Das bedeutet, es werden Bauteile mit den erzeugten Schweißnähten betrachtet und analysiert. Dies ist eine sehr praktische und nahe liegende Vorgehensweise, welche auch hier verwendet wurde. Aus wissenschaftlicher Sicht hat die alleinige visuelle Prüfung eine entscheidende Schwäche: sie kann der Möglichkeit, dass verschiedene Ursachen zu gleichem Nahtaussehen führen, nicht gerecht werden. Genau diese Aufteilung in verschiedene einzelne mögliche Ursachen ist jedoch für ein besseres Prozessverständnis zwingend notwendig.

5.3.2.1 Beobachtungen zur Lochentstehung

Die wichtigsten Unregelmäßigkeiten im Zusammenhang mit der Zielsetzung dieser Arbeit sind Nahteneinfall, Löcher und Endkrater. Diese Erscheinungen sollen sowohl in ihrem Aussehen als auch ihrer Entstehungsursache klar getrennt werden. Daher sind für die Erklärung der Fehlerentstehung die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen von zentraler Bedeutung, weil sie deren Evolution zu verfolgen gestatten. Ergänzend dazu sind aus der Auswertung von Schliffbildern wichtige Erkenntnisse zu fluiddynamischen Vorgängen im Schmelzbad zu gewinnen, die zur letztendlich sich einstellenden Nahtform führen.

Der folgende Abschnitt beschreibt Nahtunregelmäßigkeiten bzw. Nahtfehler, die im Wesentlichen auf Grund eines großen Spaltmaßes entstehen. Der Endkrater beim Schmelzschweißen ist bereits vom MIG- oder MAG-Schweißen ein bekanntes Problem, er ist also verfahrensbedingt. Beim Laserstrahlschweißen von Überlappverbindungen dünner Bleche ist ein Endkrater oftmals mit einem Einschuss in das Oberblech verbunden.

Bei einer Nullspaltverbindung an unverzinkten Blechen entsteht ebenfalls ein Endkrater, welcher sich mit steigendem Spaltmaß zum Endkraterloch entwickelt (siehe Abschnitt 5.3.1.2). Bei weiterer Spaltvergrößerung kann bereits während des Schweißvorganges durch einen Schmelzbadabriss ein Loch im Schmelzbad und in der später erstarrten Naht entstehen. Unter Schmelzbadabriss wird im Folgenden also ein

Ereignis verstanden, bei dem die hinter der Kapillare fließende Schmelze den aufgeschmolzenen Querschnitt im Oberblech nicht ausfüllen kann, weil sie in den Spalt “abgeflossen” ist. Dabei vergrößert sich stetig der Abstand a zwischen der Dampfkapillare und dem Ende des Lochs in der nachlaufenden Schmelze.

Endkraterentstehung

Wie im vorigen Abschnitt bereits angesprochen ist die Entstehung von Endkratern verfahrensbedingt und tritt generell beim Schmelzschweißen auf. Nachfolgend wird zwischen reinen Endkratern (Kratertiefe kleiner der Dicke des Oberblechs), Endkraterlöchern (Kratertiefe größer oder gleich der Dicke des Oberblechs) und jenen mit zusätzlichem Schmelzbadabriss differenziert. Der Schmelzbadabriss stellt einen Mechanismus dar, der zu einer Verstärkung der Lochbildung beim Schweißen mit Spalt führt.

Der Endkrater selbst hat im Wesentlichen zwei Entstehungsursachen. So füllt sich die beim Abschalten des Lasers zusammenbrechende Dampfkapillare mit Schmelze, was direkt eine Absenkung des Schmelzspiegels zur Folge hat. Zusätzlich wird durch den kapillar-umströmenden Schmelzanteil entgegen der Schweißrichtung die Schmelze aus dem Bereich der kollabierenden Kapillare transportiert. Diese beiden Vorgänge ergeben die typische Endkraterform, welche auch bei einer Nullspaltschweißung – jedoch in geringerer Ausprägung – entsteht.

Schmelzbadabriss und daraus resultierende Löcher

Die Abbildung 5.22 zeigt Sequenzen von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zweier “Schweißklammern” mit unterschiedlichen Spaltmaßen, in denen jeweils ein Schmelzbadabrissloch entsteht. In der linken Bildreihe, bei einem Spaltmaß von $s = 0,4$ mm, entsteht bereits kurz nach Nahtbeginn zum Zeitpunkt t_1 eine deutliche Schmelzbadöffnung im Oberblech hinter der Dampfkapillare (mit Abstand a_1 zur Dampfkapillare). Dabei verringert sich die Geschwindigkeit der hinter der Kapillare im Abstand a her fließenden Schmelzbadbegrenzung (v_{SB}) im Vergleich zu der konstanten Schweißgeschwindigkeit (v_s), sodass sich das Schmelzbadabrissloch stetig vergrößert. Es fließt ein so großer Anteil Schmelze in den Spalt, dass ein Schmelzbadabrissloch hinter der Dampfkapillare entsteht. Hier fließt die Schmelze bereits zwischen Ober- und Unterblech getrennt an den benetzten Flanken entgegen der Schweißrichtung in den Spalt. Die beiden Schmelzströme vereinigen sich danach bei großem Spaltmaß erst an der Schmelzbadrückwand.

Der Abstand a_2 zwischen Dampfkapillare und geschlossenem Schmelzbad nimmt mit Erreichen des Zeitpunktes t_2 einen "kritischen" Wert an, da die Viskosität der Schmelze auf Grund der Abkühlung zunimmt und hier die Schmelzeströmung zum Erliegen kommt. Es entsteht ein langes Loch über die gesamte Schweißnahtbreite. Mit weiterem Schweißverlauf füllt sich zunächst der aufgeschmolzene Querschnitt und der Spalt wieder auf, bis sich dann erneut ein Schmelzeabriss mit Abstand a_3 zur Kapillare zum Zeitpunkt t_3 ausbildet (Abbildung 5.22, unten links). Schweißt man mit dieser Spaltgröße von 0,4 mm eine Naht mit beliebiger Länge, so kann man in regelmäßigen Abständen die Entstehung von Löchern feststellen. Die Vergrößerung des Abstandes zwischen Dampfkapillare und Schmelze sowie der daran anschließende Erstarrungsprozess der Schmelze und das Entstehen des Loches verlaufen somit zyklisch. Diese Fehlstellenwiederholungen können in Abständen zwischen 10 und 20 Millimetern auftreten.

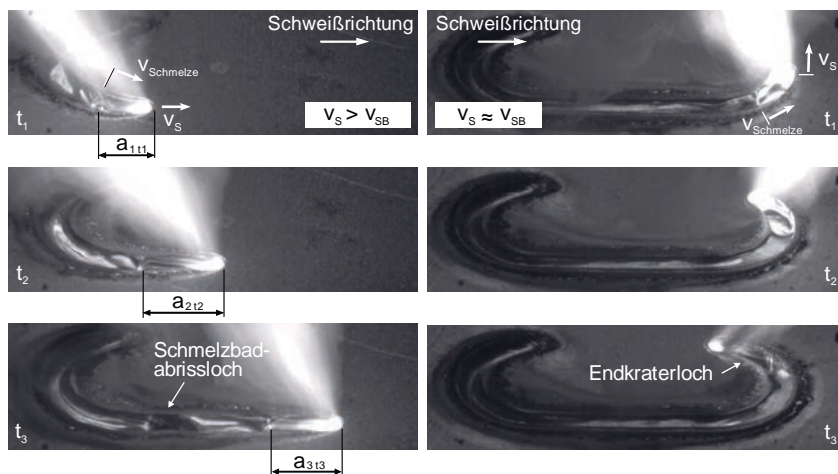


Abbildung 5.22: Sequenz einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme: Entstehung von Schmelzbadabrisslöchern bei einem Spaltmaß von 0,4 mm (links), Entstehung eines Endkraterloches bei einem Spaltmaß von 0,25 mm (rechts).

Verringert man das Spaltmaß auf $s = 0,25$ mm, wie in der rechten Bildreihe in Abbildung 5.22 veranschaulicht, so beobachtet man während der ersten zehn Millimeter Schweißnahtlänge die Entwicklung einer Schmelzbadöffnung. Diese verändert sich jedoch im weiteren Schweißverlauf kaum und nimmt eine weitgehend konstante Größe an. Die Geschwindigkeit, mit der das geschlossene Schmelzbad der Kapillare folgt (v_{SB}), entspricht damit näherungsweise der konstanten Schweißgeschwindigkeit (v_s).

Ähnliche Phänomene treten in [99] auf, allerdings aufgrund völlig anderer physikalischen Ursachen.

Nach Abschalten des Lasers verbleibt am Nahtende ein Endkraterloch. Die Lochlänge ist gleich dem Abstand a , welcher sich bis zum Zeitpunkt des Nahtendes gebildet hat (siehe auch Kapitel 5.3.1.2). Die Größe des verbleibenden Endkraters/-loches ist daher spaltabhängig.

Ergebnisse der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen

Die optischen Merkmale von Nahtfehlern auf Grund eines Schmelzbadabrisses, die sich, wie in Abbildung 5.23 dargestellt, vorwiegend auf das Oberblech beschränken, können wie folgt charakterisiert und zusammengefasst werden:

- Schweißnähte mit Schmelzbadabrisslöchern zeigen eine verstärkte Nahtunterwölbung.
- Das Loch ist meist gleich breit wie die Schweißnaht.
- Schmelzbadabrisslöcher können deutlich länger als breit sein.
- Die Tiefe dieser Löcher entspricht meist der Dicke des Oberbleches zuzüglich des an dieser Stelle vorliegenden Spalts.
- Die Lochbegrenzung am Schweißnahttrand ist scharfkantig.
- Die Nahtraupe ist glänzend und nicht schuppig (Erstarrungslinien fehlen).
- Schmelzbadabrisslöcher in der Naht können einzeln, in periodischer Wiederkehr wie auch als Endkraterlöcher auftreten.
- Das Spaltmaß ist entscheidend, von welcher Art die sich ausbildenden Abrisslöcher sind, nämlich einzeln bzw. periodisch auftretende Löcher in der Naht oder verstärkter Endkrater.



Abbildung 5.23: Fotografische Aufnahme eines Schmelzbadabrissloches im Bereich der Schweißnahtmitte mit glänzender, glatter Obertraupe und scharfkantigen Rändern (Spaltmaß: $s = 0,3 \text{ mm}$).

Nahtefälle und Ausfüllen des Spalts

Um die Vorgänge der Bildung des geöffneten Schmelzbades und der Entstehung von Endkratern sowie Schmelzbadaabrisslöchern zu verstehen, wurden 70 mm lange Strichnähte entlang der Naht mehrfach quer geschliffen. Die Schweißproben wurden an folgenden Positionen x , jeweils vom Nahtanfang aus gemessen, geschliffen: $x = 1 \text{ mm}, 4 \text{ mm}, 7 \text{ mm}, 10 \text{ mm}, 13 \text{ mm}, 16 \text{ mm}, 19 \text{ mm}, 30 \text{ mm}, 40 \text{ mm}, 50 \text{ mm}, 60 \text{ mm}$ und 69 mm . Als Material wurde ZStE340 mit $t = 0,8 \text{ mm}$ mit elektrolytischer Verzinkung verwendet.

Alle Versuchsreihen wurden durchgängig mit 4 kW Laserleistung und den Fokusdurchmessern $0,51 \text{ mm}, 0,6 \text{ mm}$ und $0,68 \text{ mm}$ geschweißt. Die erforderliche Anpassung der Streckenenergie zur Erzielung einer Durchschweißung bei den unterschiedlichen Fokusdurchmessern wurde durch Variation der Schweißgeschwindigkeit erreicht. Für den kleinen Fokusdurchmesser von $0,51 \text{ mm}$ betrug die Schweißgeschwindigkeit 8 m/min . Die beiden größeren Fokusdurchmesser ($0,6 \text{ mm}$ und $0,68 \text{ mm}$) erforderten eine Reduzierung der Schweißgeschwindigkeit auf $6,1$ bzw. $5,8 \text{ m/min}$. Nachfolgende Diagramme zeigen die Ergebnisse mit $d_f = 0,68 \text{ mm}$.

An allen Querschliffen wurden folgende Messungen durchgeführt (Abbildung 5.24):

- Nahtunterwölbung am Oberblech (Fläche A1)
- Anbindequerschnitt im Spalt (Fläche A2)
- Nahtunterwölbung am Unterblech (Fläche A3)
- Nahtefall der Nahtober- und -unterraupe
- Spaltmaß im Abstand von einem Millimeter rechts/links von der Schweißnaht

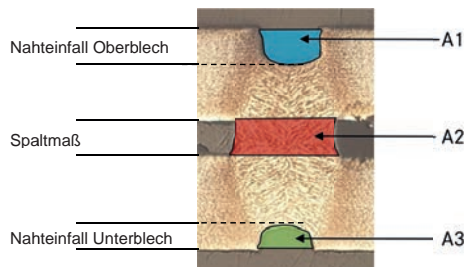


Abbildung 5.24: Nahtquerschnitt und Definition der vermessenen Flächenanteile im Querschliff: A1 (Fläche der Nahtunterwölbung), A2 (Fläche des Anbindequerschnitts), A3 (Fläche der Nahtunterwölbung).

Aus den jeweiligen Querschliffen wurde nun die Summe aus den Nahtunterwölbungen A1 und A3 gebildet und mit der Fläche A2 des Anbindequerschnitts verglichen. Ein typischer Verlauf dieser wichtigen Größen A1, A2 und A3 ist in Abbildung 5.25 wiedergegeben. Bei steigendem Spaltmaß werden beide Nahtunterwölbungen A1 und A3 größer und der Anstieg des Anbindequerschnitts A2 noch ausgeprägter. Es sei darauf hingewiesen, dass die Summe von A1 und A3 in allen Schliffpositionen kleiner ist als der Anbindequerschnitt A2. Dies ist insbesondere bei Spaltmaßen $\geq 0,2$ mm der Fall, nicht jedoch bei Vorliegen von Löchern.

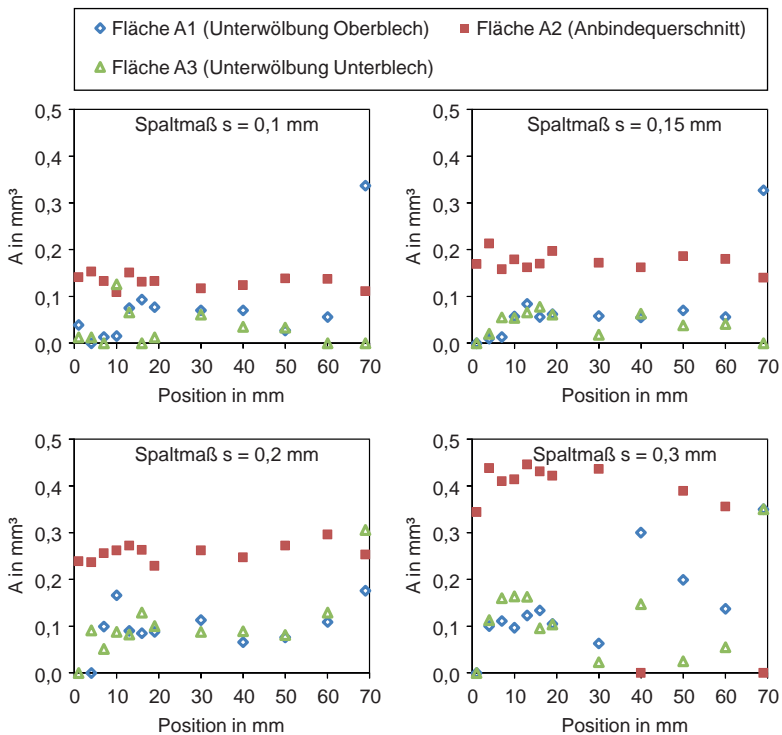


Abbildung 5.25: Größe der Flächen A1 und A3 sowie des Anbindequerschnitts A2 in mm^2 in Abhängigkeit des Spaltmaßes (Steppnähte mit einer Länge von 70 mm, ZStE340, $t = 0,8$ mm, elektrolytisch verzinkt, Fokusbereich: $d_f = 680 \mu\text{m}$).

Bei der Vermessung der Querschliffe ergibt sich, einhergehend mit einer deutlichen Zunahme des Anbindequerschnitts, eine Abnahme der Breite von Nahtober- und Nahtunterraupe. Die Schweißnahtform entwickelt sich von nahezu rechteckig bei kleinem Spaltmaß hin zu einem tonnenförmigen Nahtquerschnitt mit zunehmender Spaltbreite (siehe Abbildung 5.26).

Die Ursache für die Verkleinerung der Schweißnahtbreite wird in den unterschiedlichen geometrischen Randbedingungen für die Energiebilanz gesehen: Bei kleinen Spaltmaßen ist die Nahtunterwölbung sehr klein, es verschwindet nur ein geringer Teil des Schmelzeflusses im Fügespalt. Es kommt zu einer mehr oder weniger 2-dimensionalen (x, y) Wärmeableitung in das Blech, da der Schmelzefilm um die Dampfkapillare und die Gesamtblechdicke etwa die gleichen Abmessungen aufweisen. Bei großen Spaltmaßen kommt es insbesondere am Oberblech direkt nach Schweißbeginn bereits im Bereich der Kapillare in Folge der Spaltfüllung zu einer Absenkung der Schmelze. Damit ändert sich die Geometrie der Kapillare und die Einkoppelbedingung für den Laserstrahl. Des Weiteren fließt der Schmelzfilm nach der Umströmung der Dampfkapillare unterhalb der Blechoberkante, und es kommt zu einer Änderung der geometrischen Randbedingung auch für die Wärmeableitung. Die Nahtbreite an der Blechober- und Unterseite nähert sich der Breite des Fokusedurchmessers an.

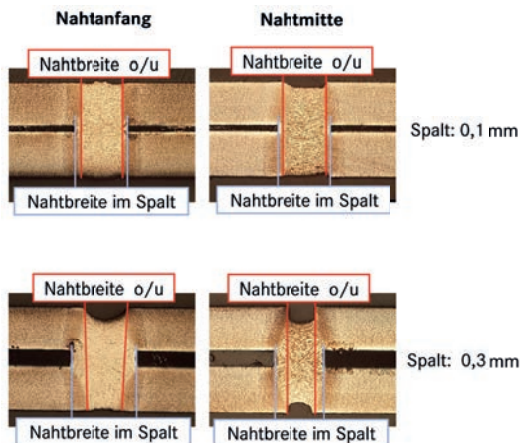


Abbildung 5.26: Änderung des Nahtquerschnitts bei Variation des Spaltmaßes am Nahtanfang und Nahtmitte auf Grund unterschiedlicher geometrischer Randbedingungen zur Wärmeleitung (obere Reihe: kleiner Spalt, untere Reihe: großer Spalt).

Da mit wachsender Schweißstrecke innerhalb der zu schweißenden Naht die Schmelzbadöffnung größer wird, kann man entlang der Schweißnaht auch einen Anstieg der Nahtunterwölbung beobachten. Die Anbindebreite in der Fügeebene nimmt jedoch bei großem Spaltmaß mit steigender Nahtlänge ab (Abbildung 5.27).

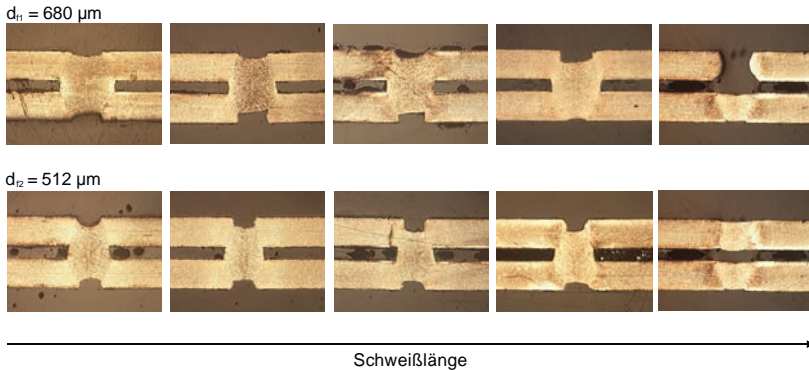


Abbildung 5.27: Verlauf der Nahtquerschnitte bei unterschiedlichen Fokusburchmessern entlang einer 70 mm langen Steppnaht bei einem Spaltmaß von 0,3 mm und einer Blechdicke von 0,8 mm.

Im Abschnitt 5.3.1.2 wurde bereits auf die Fehlerverteilung in Abhängigkeit von Fokusburchmesser und Spaltmaß eingegangen. Die Abbildung 5.27 belegt diese Erkenntnisse erneut, dass beim Schweißen mit kleinerem Fokusburchmesser Anbindefehler in Form falscher Freunde früher entstehen. Bei größeren Fokusburchmessern entsteht mit wachsender Schweißstrecke eher Lochbildung, dabei geht in aller Regel eine Schmelzbadabrisspore voraus.

5.3.2.2 Deutungsansätze zur Lochentstehung

Exemplarisch werden hier die Diagramme und einige Querschliffe einer Messreihe gezeigt, die mit einem Fokusburchmesser von 0,68 mm geschweißt wurden. Die Graphen anderer Versuche mit kleinerem Fokusburchmesser verlaufen qualitativ gleichwertig; es ergeben sich nur geringfügige Unterschiede.

Lokales Schmelzbaddefizit und Volumendefizit

Alle Abbildungen 5.25 bis 5.27 zeigen, dass die Nahteinfälle und die Spaltfüllung in ihrer Größe Funktionen des Ortes sind, d.h. einer Funktion $f(x)$ folgen. Daraus ergibt sich also eine Umverteilung der Schmelze – exakt formuliert: des aufgeschmolzenen Materials – entlang der Naht, was in Abbildung 5.28 dargestellt ist.

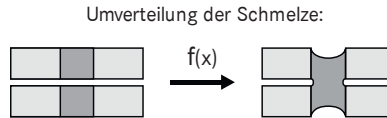


Abbildung 5.28: Ortsabhängige Umverteilung von Material während des Schweißens mit Spalt. Links vor, rechts nach der Schweißung.

An dieser Stelle wird der Begriff “lokales Schmelzbaddefizit” eingeführt. Seine quantitative Beschreibung erfolgt anhand der Bilder in Abbildung 5.24 und Abbildung 5.29. Von einem Schmelzbaddefizit wird immer dann gesprochen, wenn lokal in einem während des Schweißprozesses aufgeschmolzenem Querschnitt zu wenig Schmelzvolumen für eine qualitativ und optisch hochwertige Schweißnaht vorhanden ist, bei der die aufgeschmolzene Fuge weitgehend wieder “aufgefüllt” ist (z.B. bei einer bleibenden Schmelzbadöffnung hinter der Dampfkapillare ist dies nicht der Fall). Die Abbildung 5.25 zeigt, dass die Summe A_1 und A_3 meist kleiner ist als der Anbindequerschnitt A_2 . Diese Differenz wird als *lokales Schmelzbaddefizit* $A_{\text{lok}, x} = A_2 - (A_1 + A_3)$ in Quadratmillimeter an der jeweiligen Nahtposition definiert.

Da aus den Beobachtungen mit Hilfe der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen die Entstehung größerer Spritzer ausgeschlossen werden kann und die Verdampfungsrates des Stahls beim Schweißen ebenfalls im Vergleich zur Gesamtschmelze vernachlässigbar ist, können diese Mechanismen nicht als Ursache für eine unvollständige “Auffüllung” infrage kommen. Es muss also eine Umverteilung der Schmelze entlang der Schweißnaht stattfinden, die als einzige Ursache für die Entstehung der Löcher verantwortlich ist.

Durch die kinetische Energie, welche die flüssige Metallschmelze beim Umströmen der Dampfkapillare erfährt, wird die Schmelze zwischen Dampfkapillare und festem Material entgegen der Schweißrichtung beschleunigt. Es kommt dadurch zu einem Materialtransport vom Bereich der Dampfkapillare in Richtung der Schmelzbadrückwand und in den Fügspalt. Je größer der Spalt wird, umso stärker kommt letzterer Effekt zur Geltung. Der Spalt wirkt gewissermaßen als “Senke” für die Schmelze.

Bei der Beobachtung der Schmelzbadöffnung hinter der Dampfkapillare kann man in den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen aus Abschnitt 5.3.2.1 erkennen, dass die Schmelze nach der Keyholeumströmung an den benetzten äußeren Blechflanken entgegen der Schweißrichtung fließt. Der Materialfluss der Schmelze in den Entgasungsspalt hinein ist damit, insbesondere bei Spaltmaßen ab 0,2 mm, größer als der Materialfluss, welcher von der Energie des Laserstrahls vor der Kapillare aufgeschmolzen wird.

Fasst man nun die Summe der Nahtenfälle des Oberbleches A1 und des Unterbleches A3 abzüglich der Fläche des Anbindequerschnitts A2 in einem Diagramm zusammen, kann das lokale Schmelzbaddefizit in Abhängigkeit des Spaltes in Abbildung 5.29 anschaulich dargestellt werden.

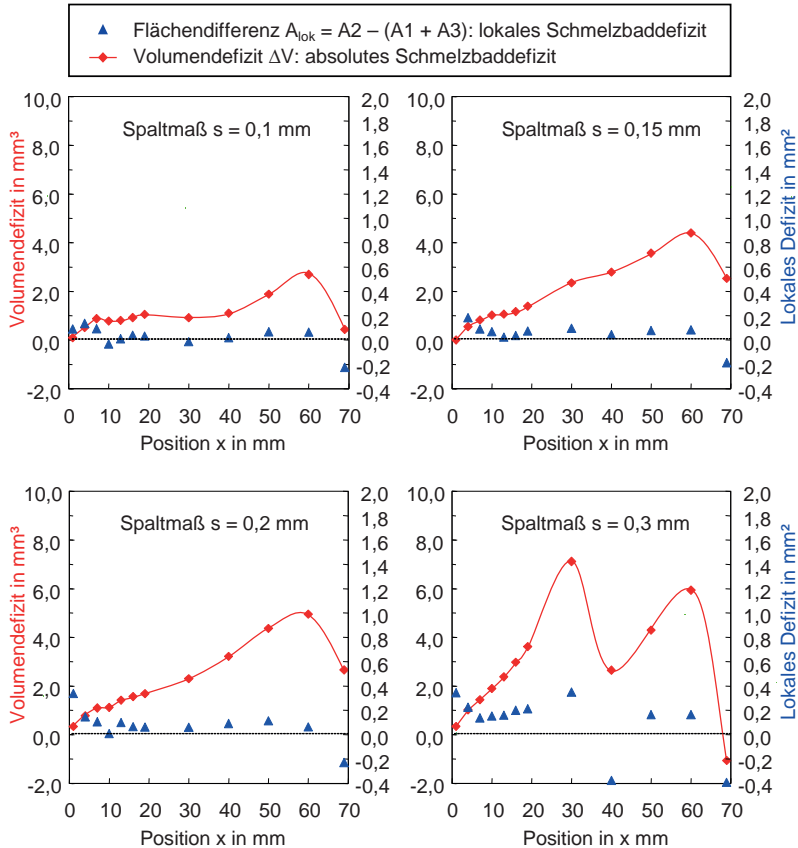


Abbildung 5.29: Darstellung des lokalen Schmelzbaddefizits $A_{\text{lok},x}$ und des absoluten Materialedefizits ΔV über die Nahtlänge bei Steppnähten mit einer Länge von 70 mm. (ZStE340, $t = 0,8 \text{ mm}$, elektrolytisch verzinkt, Fokussdurchmesser: $d_f = 680 \text{ }\mu\text{m}$).

Für das lokale Schmelzbaddefizit A_{lok} ergibt sich selbst bei einem Spaltmaß von nur 0,1 mm ein positiver Wert bis kurz vor dem Erreichen des Nahtendes, was bedeutet, dass der Anbindequerschnitt entlang der Schweißnaht, größer als die Summe der

beiden Nahtunterwölbungen ist. Wird das Spaltmaß weiter erhöht, so steigen die Werte für A_{lok} zunächst an d.h. $d A_{\text{lok}}/dx$ wird im ersten Teil der Naht deutlich größer. Ein gegen Ende der Naht bzw. beim Spaltmaß von 0,3 mm auch bei $x=40$ mm auftretender negativer Wert ist ein Indiz für die Entstehung eines Kraters bzw. Loches vor dem Erreichen des Nahtendes.

Dieser Sachverhalt legt die Einführung und Definition einer weiteren charakteristischen Größe, des *Volumendefizits*, nahe. Nimmt man dafür die Kontinuitätsgleichung als Basis an, so kann mit den Beziehungen in Abbildung 5.30 eine mathematische Beziehung für das Volumendefizit als $f(x)$ aufgestellt werden, siehe Gl. 5.8. Dabei wird vereinfachend angenommen, dass die Nahtbreite einen längs x konstanten Wert b hat, der auch der Breite des Anbindequerschnitts A_2 entspricht; die Werkstoffdichte ρ wird als gleichbleibend vorausgesetzt.

Die durch Summationsbildung angenäherten experimentellen Werte des Volumendefizits entsprechend Gl. (5.8) sind ebenfalls in Abbildung 5.29 wiedergegeben. Aus den Versuchen, siehe Abbildung 5.29, wurde bereits erkannt, dass der Term $A_2 - (A_1 + A_3)$ eine Funktion des Ortes $f(x)$ sein muss. Die Gleichung 5.7 macht dies ebenfalls deutlich.

Am Beispiel einer Schweißprobe mit einem Spaltmaß von $s = 0,1$ mm liegt das durchschnittlich entstandene Volumendefizit bei $0,05 \text{ mm}^3$ pro Millimeter Schweißnaht. Beim Schweißen von Nahtmustern im Karosserierohrbau mit einer typischen Länge von 20 mm bedeutet dies am Nahtende ein Volumendefizit von etwa $0,9 \text{ mm}^3$, was einen erheblichen Endkrater verursacht. Bei einer Blechdicke von je 1,0 mm und unter der Annahme, dass der Endkrater vorwiegend auf der laserzugewandten Seite entsteht, entspricht diese Nahtunregelmäßigkeit einer Größe von einem Quader von $L \times b \times H$ mit $2,0 \times 1,0 \times 0,5$ Millimeter. Dies stellt bereits eine Endkratertiefe der halben Blechdicke dar.

Die Auswertung der Probe mit einem Spaltmaß von 0,3 mm zeigt die Schmelzbadabrisslöcher, welche bereits während des Schweißverlaufs entstanden sind (Abbildung 5.29). Dabei nehmen die Nahtunterwölbungen und die Größen A_{lok} und ΔV sehr schnell zu, bis es bei einem Volumendefizit von 7 mm^3 zum oben genannten Schmelzbadabriss während des Schweißens kommt. Nach kurzer Zeit entsteht erneut ein Volumendefizit, was am Ende der Schweißnaht zu einer weiteren Schmelzbadabrisspore führt.

Die prinzipiellen Ursachen für ein Volumendefizit können auf Grund der experimentellen Beobachtungen und Betrachtungen zum Massenerhalt drei wesentliche, voneinander getrennt ablaufende Vorgänge sein:

- Spritzerbildung: am Nahtanfang (häufig) und während des Schweißens (selten bei ausreichendem Spalt). Dies wird für die in dieser Arbeit untersuchten Parameterfelder als vernachlässigbar betrachtet.
- Nahtüberhöhung am Nahtbeginn: Schmelze wird über den Nahtanfang beschleunigt und ausgeworfen; dieser Effekt ist zwar auch hier zu beobachten, doch ist sein Beitrag vergleichsweise gering.
- Der Schmelzfluss hinter der Dampfkapillare ergießt sich in ein größeres Volumen, als das je Zeiteinheit aufgeschmolzene. Beim Schweißen mit im Vergleich zur Blechdicke nicht sehr kleinen Spaltmaßen ist dies die wesentliche Ursache für die Entstehung von durch Schmelzbadabriss verursachte Löcher in der Naht.

Dieser zuletzt genannte Aspekt sei anhand folgender geometrischer Betrachtungen näher erläutert.

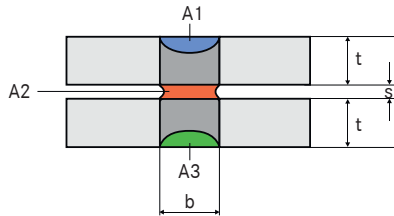


Abbildung 5.30: Abmessungen im Querschnitt einer Schweißnaht.

Die gesamte aufgeschmolzene Masse einer Naht der Länge l ist:

$$V_s = 2 \cdot t \cdot b \cdot l \quad (5.6)$$

In Folge lokal als $f(x)$ sich ändernden Schmelzflüsse bzw. erstarrten Volumina muss gelten, wenn für den Anbindequerschnitt näherungsweise $s \cdot b = A_2$ angenommen wird, und A_1 wie A_2 Funktionen von x sind:

$$\begin{aligned} V_s &= \int_0^l [(t \cdot b) - A_1] + s \cdot b + [(t \cdot b) - A_3] \cdot dx \\ &= \int_0^l 2(t \cdot b) \cdot dx + \int_0^l [A_2 - (A_1 + A_3)] \cdot dx \end{aligned}$$

$$= 2 \cdot t \cdot b \cdot l + \int_0^l [A_2 - (A_1 + A_3)] \cdot dx \quad (5.7)$$

Aufgrund des geltenden Massenerhalts – V_s nach Gl. 5.6 muss gleich V_s nach Gl. 5.7 sein – muss deshalb

$$\int_0^l [A_2 - (A_1 + A_3)] \cdot dx = 0 \quad (5.8)$$

sein. Somit ist $\int_0^x [A_2 - (A_1 + A_3)] \cdot dx$ gleich dem *lokalen, an der Stelle x bestehenden Volumendefizit ΔV* .

Ein stetiges lokales Flächendefizit ($A_2 > (A_1 + A_3)$) ergibt über die Nahtlänge ein ansteigendes Volumendefizit ΔV , was zu einer Schmelzbadöffnung und bei großem Spaltmaß zu einem Schmelzbadabrissloch führt.

Diese auf dem Massenerhalt beruhende Betrachtung erklärt anschaulich, dass für $s > 0$ Nahtenfälle und Löcher im Verlauf einer Naht entstehen müssen. Aufgrund der Zusammenhänge nach Gl. 5.7 kann man das Auftreten eines Loches im Oberblech vorhersagen, wenn für einen vereinfachten Fall angenommen wird, dass die Anbindung $A_2 = b \cdot s$ und kein Nahtenfall am Unterblech ($A_3 = 0$) vorhanden ist. Damit tritt ein Loch an der Stelle x_L auf, wenn $A_1(x_L) = t \cdot b$ geworden ist.

$$\int_0^{x_L} ((t \cdot b) - A_1(x)) \cdot dx = \int_0^{x_L} (b \cdot s) \cdot dx \quad (5.9)$$

Daraus folgt für $b \cdot s = \text{const.}$:
$$\frac{t}{s} \int_0^{x_L} \left(1 - \frac{A_2(x)}{b} \right) dx = \int_0^{x_L} dx, \quad (5.10)$$

was erlaubt, die Abhängigkeit von x_L von den Größen s , t und b abzuschätzen. Mit der Konstante t/s vor dem Integrals ist sofort erkennbar, dass die Lochentstehung in umso kleinerem Abstand x auftritt, je größer der Spalt s wird. Andererseits also geschieht bei dünnen Blechen bei gleicher Spaltgröße die Lochentstehung früher, als bei dicken Blechen, was in den experimentellen Ergebnissen übereinstimmend bestätigt wurde. Auch eine kleinere Nahtbreite sollte nach dieser geometrischen Betrachtung zu kürzerem x_L führen.

Würde man überdies die physikalischen Gesetzmäßigkeiten kennen, nach denen sich alle Größen als $f(x)$ verändern, so wäre eine theoretische Beschreibung der Nahtform

als $f(x)$ möglich. Insbesondere jedoch die Auswirkungen der Oberflächenspannung, die auch von den Größen t , b , und s abhängen, lassen die Formulierung solcher Beziehungen als überaus schwierig erscheinen.

Evolution der Fehlerentstehung

Im Folgenden wird qualitativ versucht, die beobachteten Einflüsse von t , s und d_f anhand physikalischer Gegebenheiten zu klären die bei der Entstehung eines bestimmten Nahtfalls bzw. beim "Auffüllen" des Spalts von Bedeutung sind.

Anhand der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen können die beobachteten Schweißfehler nach ihrer zeitlichen Entstehung separiert und in einem Flussdiagramm dargestellt werden (Abbildung 5.31). Das Diagramm zeigt den chronologischen Verlauf einer

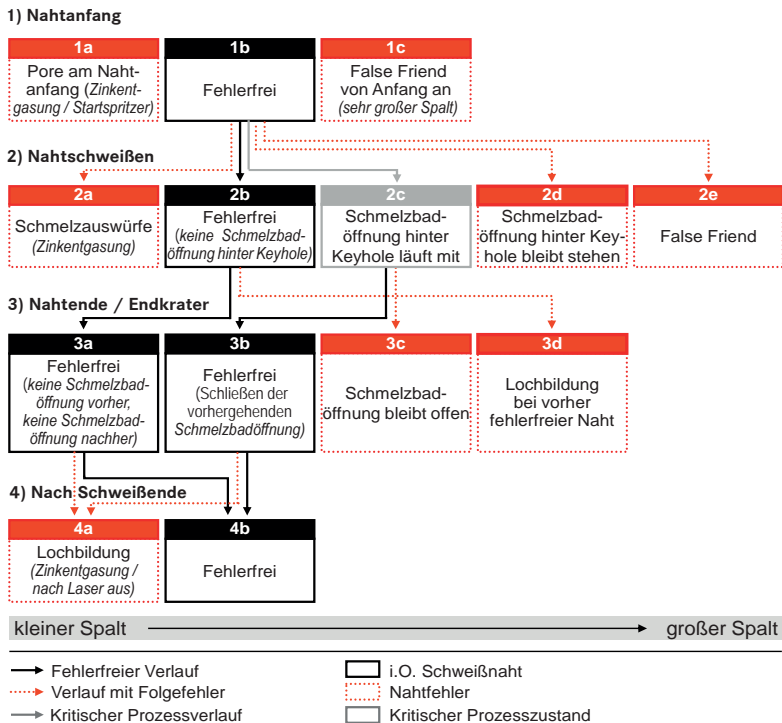


Abbildung 5.31: Zeitlicher und damit auch örtlicher Verlauf der Fehlerentstehung in vier Stufen beim Schweißen von verzinkten Blechen. Eine fehlerfreie Schweißnaht durchläuft folgende Positionen: 1b → 2b → 3a → 4b oder auch 1b → 2c → 3b → 4b.

Schweißnaht von oben (Schweißbeginn) nach unten (Schweißnahtende), und die Größe des Entgasungsspalt es steigt von links nach rechts an.

Die zeitliche Aufteilung der Fehlerentstehung erfolgt in vier Bereiche: Nahtanfang, Nahtschweißen und Nahtende sind die Abschnitte während des Schweißprozesses, der vierte Bereich stellt das Schweißende nach endgültiger Erstarrung der Schmelze dar, wobei der kritische Prozessverlauf gestrichelt dargestellt ist.

Prozesszustände mit Folgefehlern (unterbrochene Linien), welche ein Loch zur Folge haben, werden im Flussdiagramm nicht in die zeitlich nächste Ebene weiter verbunden. Einen fehlerfreien Schweißnahtverlauf stellen die durchgezogenen Verbindungspfeile dar.

Die Betrachtung einer Nahtunregelmäßigkeit in zeitlicher bzw. örtlicher Abhängigkeit kann in fast allen Fällen direkt mit der Ursache und den bei der Schweißnaht vorherrschenden Prozessbedingungen in Verbindung gebracht werden.

Stellte man zeitlich einen genauen Zusammenhang zwischen einem Ereignis, wie beispielsweise ein Schmelzbadabriss, und einem möglichen Folgefehler (z.B. ein Loch) her, so könnte mit diesen Informationen, verbunden mit entsprechenden Korrekturmaßnahmen aus Kapitel 6, eine Prozessregelung realisiert werden, was in dieser Arbeit jedoch nicht weiter betrachtet wird.

Einfluss von Schmelzeströmung und Oberflächenspannung auf den Nahtquerschnitt

Die Oberflächenform einer Schweißnaht hängt von mehreren Faktoren ab. Insbesondere die Geschwindigkeit der Kapillarumströmung $v_{s,x}$, welche im Wesentlichen mit der Schweißgeschwindigkeit und dem Fokusedurchmesser zusammen hängt und lokal in manchen Bereichen des aufgeschmolzenen Querschnitts deutlich höhere Werte als v_s annimmt, wirkt sich auf die Anbindeform aus. Daher ist die kinetische Energie der Schmelze (bzw. der ihr entsprechende dynamische Druck)

$$\varepsilon_{kin} = \frac{\rho \cdot v_s^2}{2} \quad (5.11)$$

eine bestimmende Größe für die ortsabhängig sich bildende Querschnittsfläche einer Schweißnaht. Vor allem sind die lokalen Schmelzefflüsse zusammen mit lokalen Erstarrungsvorgängen bei der Bildung des Querschnitts als $f(x)$ von Bedeutung.

Da es insbesondere beim Schweißen mit größeren Spaltmaßen zu diskreten Schmelzeströmungen an Ober- und Unterblech kommt, spielt auch die Oberflächenspannung σ eine wichtige Rolle, die hier – zusätzlich zu ihren allgemein bekannten Wirkungen hinsichtlich von Unterwölbungen – von elementarer Bedeutung sein kann. Anhand der folgenden Skizzen soll versucht werden, dies zu verdeutlichen.

In der Literatur werden üblicherweise Betrachtungen zur Oberflächenspannung nur bezüglich ihrer schließenden Wirkung auf die Kapillare gemacht, aber auch ihr Einfluss auf das Strömungsfeld im Schmelzbad diskutiert [1]. Zumeist wird von zylindrischen oder leicht kegelförmigen Geometrien mit großem Aspektverhältnis t/d_f (Tiefe/Durchmesser) $\gg 1$ ausgegangen und vor allem ihr Beitrag $2\sigma/d_f$ zur Druckbilanz in der Kapillare untersucht. Eine gänzlich andere Situation tritt beim Schweißen von dünnen Blechen auf, wo das Aspektverhältnis klein ist, d.h. bei $t/d_f \leq 1$; hier zieht die Oberflächenspannung die Schmelze nach hinten, was zu einer Verlängerung der Kapillaröffnung in x-Richtung führt [99].

Beide Fälle sind in Abbildung 5.32 skizziert, und beide Wirkungen sind bei den in dieser Arbeit vorliegenden geometrischen Verhältnisse zu erwarten. Der in Abbildung 5.32 rechts gezeigte Effekt spielt auch bei der Spaltfüllung eine Rolle. Im Hinblick vor allem auf die Spritzerentstehung relevant ist der Beitrag σ/δ ; mit der Schmelzefilmdicke δ vor und seitlich der Kapillare.

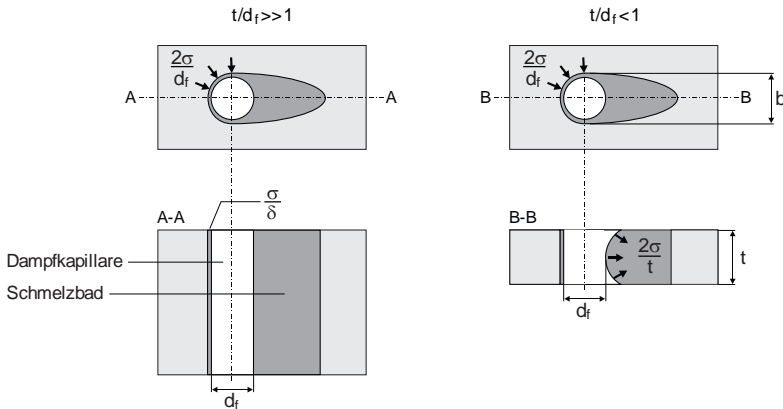


Abbildung 5.32: Auswirkungen der Oberflächenspannung auf die Druckbilanz bei zylindrischen Kapillargeometrien mit unterschiedlichen Aspektverhältnissen: $2\sigma/d_f$ hat "schließende", $2\sigma/t$ "öffnende" Wirkung bezüglich des Kapillardurchmessers.

Darüber hinaus treten hier, insbesondere bei Verhältnissen, die einem Schmelzbadabriss voraus gehen, weitere Effekte auf. Wie in Abschnitt 5.3.2.1 geschildert, fließt die die Kapillare umströmende Schmelze eine gewisse Distanz als Film längs der seitlichen Nahtbegrenzung, ehe sie erstarrt bzw. den Spalt auffüllt. Zur Kräftebilanz trägt deshalb auch die an den Flanken und im Spalt wirkende Oberflächenspannung bei, was in Abbildung 5.33 ebenfalls qualitativ angedeutet ist. Die dafür charakteristischen Größen sind die Blechdicke, Nahtbreite und Spalthöhe.

Im Hinblick auf die Spaltfüllung bzw. die Geometrie des Schmelzbades deutet Abbildung 5.33 auf ein vielschichtiges und mehrdimensionales Wirken der Oberflächenspannung hin.

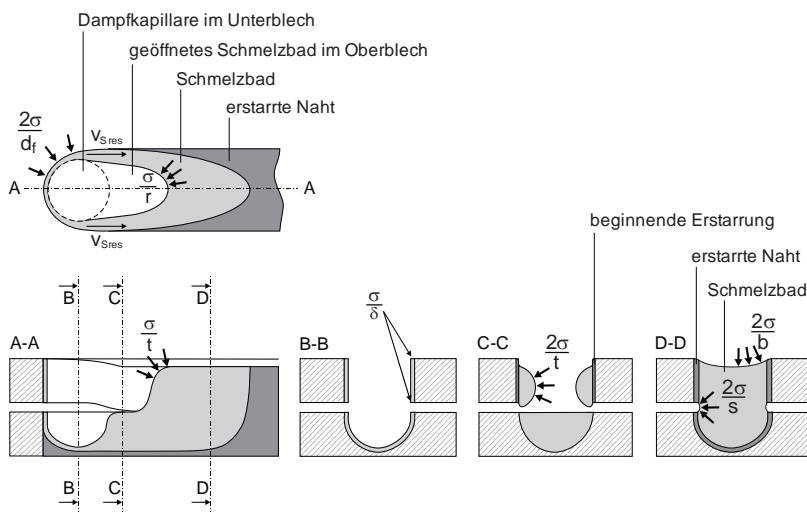


Abbildung 5.33: Schematisch, vereinfachte Wiedergabe der Wirkung von Oberflächenspannung an unterschiedlichen Nahtpositionen bei Schweißungen von Blechen mit Spalt und daher stark elongierter Kapillaröffnung.

So wirkt sie sowohl an der Kapillarwand mit $2\sigma/d_f$ – insbesondere am vorderen Bereich des Oberbleches – als auch am hinteren Ende des geöffneten Schmelzbades mit σ/r – als schließende Kraft (r beschreibt den Radius der Schmelzbadöffnung). Der dort ebenfalls existierende Beitrag σ/t hat eine öffnende Wirkung (ähnlich wie in [99]) und ist bei einem Schmelzbaddefizit in Folge eines Spaltes hauptverantwortlich für einen stark elongierten Bereich hinter der Einkoppelfront.

Der Längsschnitt A-A liegt in der Mitte der Schweißnaht und zeigt – wie die Draufsicht – am Oberblech den weit geöffneten Bereich hinter der Einkoppelfront und die Kapillare im Unterblech. Deutlich gemacht ist die Vereinigung der beiden zunächst noch getrennten Schmelzeströmungen am Oberblech mit der Schmelzströmung des Unterblechs, die bei C-C noch separiert sind. Im Bereich zwischen den Schnitten C-C und D-D entsteht dann erst ein gemeinsames Schmelzbad mit der Schmelze des Unterblechs. Die vereinigte Schmelze am Ende der Schmelzbadöffnung erfährt hier zusätzlich zu σ/r mit σ/t eine weitere – öffnende – Kraftkomponente; also eine von der Blechdicke abhängige Größe.

Im Schnitt B-B, also in der Mitte der Kapillare, fließen die die Kapillare umströmenden Schmelzfilme mit hoher Geschwindigkeit V_{res} getrennt voneinander entgegen der Schweißrichtung, sodass an dieser Stelle noch keine Verbindung zwischen der Schmelze des Oberblechs und der des Unterblechs vorliegt.

Im Schnitt in der Ebene C-C, bei dem sich die kinetische Energie der Schmelzeströme reduziert hat, fließen die beiden Schmelzeströme des Oberblechs noch immer getrennt vom Unterblech. Die Oberflächenspannung $2\sigma/t$ lässt sie eine zur Nahtmitte hin gerichtete, nahezu halbzylindrische Form einnehmen. In Folge geringerer Geschwindigkeiten und der Gewichtskraft nähern sich die beiden Schmelzeströmungen dem ebenfalls aufgeschmolzenen Unterblech an. In Folge der deutlich größeren Schmelzefilmdicken im Vergleich zu Schnitt B-B, überwiegt nun die Gewichtskraft und die Oberflächenspannung kann die Schmelzeströme nicht mehr am Oberblech halten.

Die Nahtposition im Schnitt D-D zeigt die bereits erfolgte Vereinigung der Schmelzeströme zu einem zusammenhängenden Querschnitt, und die seitlichen Ränder der Schweißnaht erstarren hier weiter. In der Nahtmitte befindet sich noch Schmelze, und die Oberflächenspannung $2\sigma/s$ wirkt in der Fügeebene zwischen Ober- und Unterblech und ist spaltabhängig. Auch an der Nahtoberfläche wirkt eine Oberflächenspannung $2\sigma/b$. Sie beeinflusst den Nahteneinfall und wird beispielsweise bei kleinerem Fokusbereich – also schmalen Schweißnähten – größer.

Aus dem Zusammenspiel dieser grundsätzlich wirkenden Mechanismen lässt sich zusammenfassend für den erstarrten Anbindequerschnitt ein Deutungsstrang ableiten, was die unterschiedlichen Anbindeformen bzw. Fehlerentstehungen in Abhängigkeit des Fokusbereichs, insbesondere für große Spaltmaße, längs der Schweißnaht erklärt:

Die Entwicklung der Anbindeform mit zunehmender Nahtlänge und steigendem Schmelzbadvolumendefizit bei unterschiedlichen Fokusburchmessern ist in Abbildung 5.34 dargestellt. Dabei wurde versucht, die Erkenntnisse aus obiger Diskussion zur Wirkung der Oberflächenspannung für die Erklärung des Einflusses des Fokusburchmessers auf die Fehlerentstehung zu nutzen. Demnach wäre bei großen Durchmessern (breiteren Nähten) vor allem Lochbildung, bei kleineren Durchmessern insbesondere das Fehlerbild “False Friend” zu erwarten.

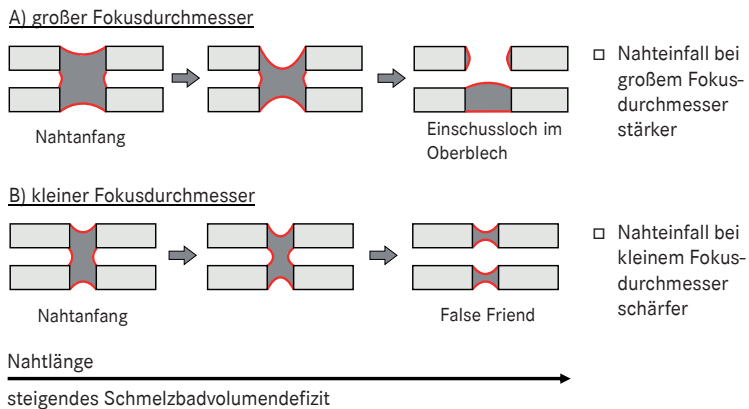


Abbildung 5.34: Querschnittsformen entlang einer Schweißnaht bei unterschiedlichen Fokusburchmessern beim Schweißen mit Spalt und dafür typische Fehler.

Beim Vergleich dieser “theoretischen” Fehlerentstehung mit den Querschliffe aus den Versuchen in Abschnitt 5.3.2.1 erkennt man, dass das typische Fehlerbild bei großen Spaltmaßen eine damit übereinstimmende Abhängigkeit des Fokusburchmessers zeigt. Bei Schweißnähten, welche mit einem kleinen Fokusburchmesser geschweißt wurden, entstehen bereits bei geringeren Spaltmaßen “Falsche Freunde”, während die breiteren Schweißnähte mit größeren Fokusburchmesser bei vergleichbarem Spaltmaß bevorzugt große Lochbildung am Ende in Folge Schmelzbadabriss und Volumendefizit aufweisen.

6 Maßnahmen zur Reduzierung von Schweißfehlern

In diesem Kapitel sind prozesstechnische Lösungsmöglichkeiten zur Qualitätssteigerung von Lasernähten im Überlappstoß beschrieben, welche in Verbindung mit der Scannertechnik möglich werden. Ziel ist nicht, zu speziellen Einzelversuchen statistisches Zahlenmaterial zu erheben oder physikalische Mechanismen zu diskutieren, sondern es soll einen Überblick über die prozesstechnischen *Möglichkeiten* gegeben werden.

Unterschieden wird im Folgenden zwischen einer direkten Fehlervermeidungsstrategie, welche innerhalb der ersten Schweißüberfahrt mit Anpassung der Prozessparameter realisiert werden kann und einer Schweißnaht mit Nachbehandlung, bei der eine zweite Überfahrt des Lasers benötigt wird.

Um eine schnelle Fokusslageänderung während des Schweißprozesses realisieren zu können und damit z.B. eine direkte Fehlervermeidung während des Schweißens zu ermöglichen, wird für die Versuche in Kapitel 6.1.2 und Kapitel 6.2.2 ein 3D-Scanner verwendet, bei dem die dritte Achse eine Defokussierung in $\pm z$ ermöglicht. Diese Verschiebung der Kaustik wird durch bewegte Linsen innerhalb der Kollimation des Scanners erreicht. Die Verfahrszeit eines vollständigen z-Hubes beträgt weniger als 10 ms. Die damit erreichte Spotgröße entspricht dem drei- bis vierfachen Fokussdurchmesser, verglichen mit der neutralen Position der z-Achse. Die Bearbeitungsgröße des Scanfeldes in der x- und y-Ebene, sowie die Brennweite entsprechen den Spezifikationen des 2D-Scanners, welcher in Kapitel 3.1.2 vorgestellt ist.

Der Endkrater nimmt beim Laserschweißen eine besondere Stellung ein und tritt bei jeder Schweißung auf. Mit steigendem Spaltmaß nimmt die Größe des Endkraters bis zur Lochbildung zu. Große Potenziale beim Remote-Schweißen bestehen in der direkten Nachbearbeitung – also mit einer weiteren Überfahrt des Laserstrahls nach dem Schweißen – von Nahtunregelmäßigkeiten, was zu einer erheblichen Qualitätsverbesserung der Schweißnähte führt. Eine gezielte Prozessbeeinflussung durch schnelle Strahlbewegungen und wiederholten Überfahrten ist ohne Scannertechnik nicht möglich.

Prozessoptimierung unter Berücksichtigung der Fehlereinflussgrößen

Aus den Erkenntnissen aus Kapitel 5.3. können erste, unmittelbar wirkende Maßnahmen zur Prozessoptimierung direkt abgeleitet werden, sie sind im Folgenden aufgeführt:

- Die Einhaltung eines erforderlichen Minimalspalts, z.B. durch Noppen, ist für eine kontrollierte Zinkentgasung zwingend notwendig.
- Geschlossene Schweißmuster sind, vor allem bei kleinem Spaltmaß, auf Grund des zum Nahtende hin eingeschlossenen Zinkdampfes, zu vermeiden.
- Eine Durchschweißung führt zu einer Verbesserung der Spaltüberbrückbarkeit und erweitert daher die Größe des Prozessfensters.
- Das Schweißen von kurzen Nähten verhindert die Entstehung einer Schmelzbadabrisspore bei großem Spaltmaß.
- Vermeidung von Spaltmaßen größer 0,2 mm durch geeignete Spanntechnik, um die Entstehung von Endkraterlöchern, Schmelzbadabrisslöchern und “Falsche Freunde“ zu verhindern.

Darüber hinaus gehende, gezielte prozesstechnischen Maßnahmen werden im Folgenden geschildert.

6.1 Direkte Maßnahmen

Direkte Maßnahmen zur Vermeidung von Nahtunregelmäßigkeiten oder Schweißfehlern sind Vermeidungsstrategien während des Schweißens durch Parametereinstellungen, dass erst kein Fehler entstehen kann.

6.1.1 Spritzervermeidung

Die vorgestellten Spritzertypen Typ 1 bis Typ 4 aus Kapitel 5.2 können alle – insbesondere 1 und 2 – einen Schmelzbadvolumenverlust mit einer direkten Fehlerentstehung in Form eines Loches oder einer indirekten Fehlerentstehung in Form eines Endkraterloches oder eines Schmelzbadabrissloches verursachen.

Spritzertypen 1 und 2

Spritzer beim Einstechen am Nahtanfang und kurz nach Nahtbeginn werden durch die Entstehung der Dampfkapillare, die zu einer schnellen Verdrängung der Schmelze führt, erzeugt. Die Verdrängung kann als Impuls beschrieben werden, der von Masse und Geschwindigkeit der bewegten Schmelze abhängt. Ein geringerer Impuls ist daher mit einer Reduzierung von bewegter Masse und Geschwindigkeit erreichbar. Demzufolge kann mit einer kurzen Leistungsrampe am Nahtbeginn die Ausbildung einer Dampfkapillare und mit einer Geschwindigkeitsrampe das Strömungsfeld so verändert werden, dass die Spritzerbildung minimiert wird.

Zunächst konnte bei den Versuchen eine Abhängigkeit der Spritzerrichtung von der Leistungsrampe festgestellt werden: abhängig von der Einschweißtiefe am Nahtbeginn werden bei einer kurzen Rampe Spritzer nahezu senkrecht nach oben ausgeworfen. Bei längeren Leistungsrampen in Verbindung mit hohen Schweißgeschwindigkeiten werden die Spritzer mit einem Winkel bis zu 50° gegenüber der Vertikalen entgegen der Schweißrichtung abgelenkt.

Beim Schweißen mit Laserleistungen ab 4 kW kann eine zusätzliche Schweißgeschwindigkeitsrampe am Nahtbeginn erforderlich sein, um die Geschwindigkeitskomponenten der Schmelze um die Dampfkapillare, v_x und v_y , zu verringern, sodass auch die resultierende Schmelzegeschwindigkeit v_{res} herabgesetzt wird. Die Strecke, in der auch die Leistungsrampe erfolgt, beträgt wenige Millimeter Nahtlänge.

Die Abbildung 6.1 zeigt den Vergleich von Spritzerbildung mit und ohne die oben beschriebenen Rampen. Da die genaueren Details der Parameter von der konkreten Anwendung abhängen, wird darauf nicht eingegangen.

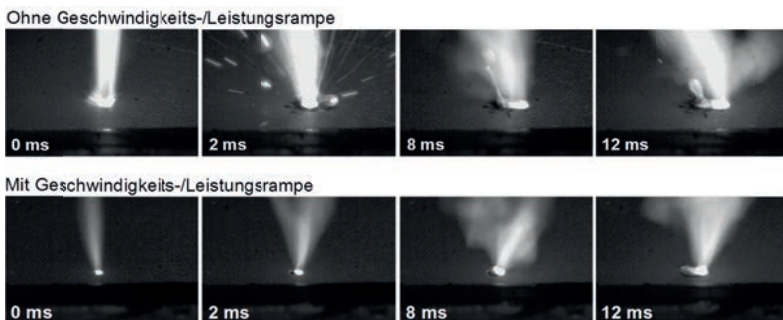


Abbildung 6.1: Vergleich der Spritzerbildung am Nahtanfang und kurz nach Nahtbeginn mit (unten) und ohne (oben) Leistungs- /Geschwindigkeitsrampe.

Spritzertypen 3 und 4

Durch einen ausreichenden Entgasungsspalt können Spritzer des Typs 3, welche durch unkontrollierte Zinkentgasung entstehen, vermieden werden. Bei Werkstoffen, die prozesstechnisch schwierig laserschweißbar sind, ist eine Parameteranpassung unter genauer Prozessbeobachtung erforderlich. Allgemein nimmt die Spritzerbildung bei höheren Laserleistungen und höheren Schweißgeschwindigkeiten zu. Diese Art von Spritzern bestehen aus sehr kleinen Partikeln, die beim Schweißen als Funkenflug zu beobachten sind; auf die Nahtqualität haben sie keinen nennenswerten Einfluss.

Problematisch gestaltet es sich, verzinkte Bleche ab 2,0 mm Dicke im Überlappstoß zu schweißen. Es zeigen sich heftige Schmelzbadbewegungen trotz ausreichendem Entgasungsspalt. Eine Spritzerentstehung kann dabei vor allem direkt um die Dampfkapillare beobachtet werden. Eine Vorgehensweise zur Sicherstellung dieser Spritzervermeidung konnte hier nicht gefunden werden (war jedoch auch nicht als Ziel definiert).

Die Vermeidung des Spritzertyps 4 ist prozesstechnisch durch ein offenes Schweißmuster zu erzielen. Diese Art von Spritzern kann auch bei unverzinkten Materialien auftreten und ist nicht allein auf eine unkontrollierte Zinkentgasung zurück zu führen. Die Erkenntnis aus Abschnitt 5.3.1.2, offene Nahtmuster zu bevorzugen, führt auch hier zur Vermeidung von Spritzern.

6.1.2 Reduzierung des Schmelzbaddefizits beim Schweißen

Um die Zunahme des Schmelzbaddefizits über die Nahtlänge (siehe Abschnitt 5.3.2) möglichst gering zu halten, wurden in den nachfolgenden Versuchen zwei unterschiedliche Schweißparameter entwickelt.

6.1.2.1 Fokuslageänderung während des Schweißprozesses

Zunächst wurden in dieser Versuchsreihe nur kurze Steppnähte geschweißt. Variiert man zusätzlich während der Schweißnahtlänge den Fokusdurchmesser so, dass gegen Schweißnahtende um einige Millimeter defokussiert wird, lässt sich ein tiefer und scharfer Endkrater vermeiden. Die Form des so verbleibenden Endkraters ist auf Grund der Fokusvergrößerung zwar etwas breiter, aber weniger tief. Es ergibt sich am Nahtende ein V-förmiger Anbindequerschnitt.

Die kurzen Stepps werden unmittelbar aneinander geschweißt, so dass sogenannte "Steppketten" entstehen, siehe Abbildung 6.2. Dadurch kann erreicht werden, dass die Schmelze der Nahtüberhöhung zu Beginn des Folgestepps in den Endkrater des Vorgängerstepps fließt. Da die Steppketten aus mehreren kurzen Stepps bestehen, werden ebenso viele kleine Endkrater erzeugt. Bei einem sehr großen Spalt können also mehrere Endkraterlöcher in einer solchen Naht entstehen.

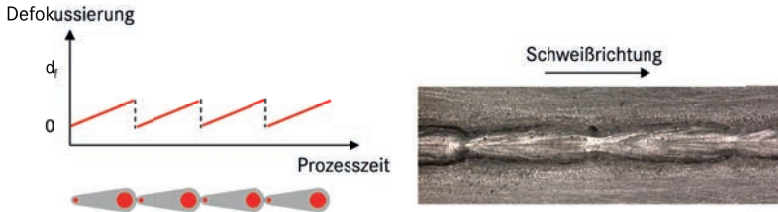


Abbildung 6.2: Nahtbreite und Defokussierung als Funktion der Zeit. Steppkette mit ansteigender Defokussierung: kein Endkraterloch bei einem Spaltmaß von 0,3 mm bei einer Blechdicke von $t = 2 \times 1,0$ mm.

Im Idealfall kann bei dieser Methode am Nahtende mehr Schmelze pro Zeit zur Verfügung gestellt werden, was dem entstehenden Schmelzbaddefizit entgegen wirkt. Dabei müssen Schweißgeschwindigkeit und Laserleistung aufeinander abgestimmt werden. Eine solche Prozessführung, die den wissenschaftlich-technischen Ansatz der Minimierung des lokalen Schmelzbaddefizits aufzeigt, ist jedoch für eine industrielle Anwendung nur schwer realisierbar.

6.1.2.2 Gezielte Anpassung des Entgasungsspalts

Stand der Technik für das Laserstrahlschweißen verzinkter Bleche ist, dass das Spaltmaß über den gesamten Schweißnahtbereich konstant gehalten wird. Am Anfang einer Schweißnaht entsteht, besonders bei kleinen Spalten, die Problematik der aufgestauten Schmelze hinter der Dampfkapillare, was zu Nahtüberwölbungen oder Spritzern am Nahtanfang führen kann. Versuche zeigen, dass sich das Problem der Nahtüberwölbung bei erhöhtem Spaltmaß und einer Laserleistungsrampe deutlich reduzieren lässt. Um Schmelzbadabrisslöcher, tiefe Endkrater und starke Nahtunterwölbungen zu vermeiden, ist es andererseits notwendig, das Spaltmaß insgesamt möglichst gering zu halten. Dabei ist darauf zu achten, dass ein Nullspalt vermieden wird. Sollen beide zuvor getroffenen Aussagen gleichzeitig berücksichtigt werden, erscheint es zielführend, das Spaltmaß nicht konstant zu halten, sondern über die Schweißstrecke zu variieren.

Die Ergebnisse von Stichversuchen beim Schweißen mit veränderlichem Spalt, welcher am Nahtbeginn 0,2 mm und am Nahtende 0,1 mm beträgt, sind durchweg positiv zu bewerten. Die zuvor aufgestellten These, dass ein „schiefer“ Spalt zur Reduzierung von Nahtüberwölbungen führt und zusätzlich kleinere Endkrater ermöglicht, können bestätigt werden.

Diese Art der Spaltgestaltung ist bei der Verwendung von Lasernoppen durchaus denkbar, indem die Noppen in einer geeigneten Matrix um die jeweilige Schweißgeometrie platziert werden. Durch Variation von Noppenhöhe und Noppen- bzw. Schweißnahtposition kann ein solcher variierender Spalt exakt eingestellt werden.

6.2 Optimierung der Nahtqualität unmittelbar nach dem Schweißen

Beim Remote-Laserstrahlschweißen kann die Scannertechnik für eine direkt im Anschluss erfolgende Schweißnahtoptimierung genutzt werden: es wird unmittelbar nach dem Schweißprozess ein weiteres Schweißmuster abgefahren, welches vorher entstandene Nahtunterwölbungen, Endkrater oder Löcher schließt.

6.2.1 Minimierung des Endkraters durch Strahlbewegung

Strahlbewegungen sind im Rahmen der vorliegenden Arbeit unter „Stand der Technik“ in Verbindung mit Optimierungen beim Schweißen verzinkter Bleche im Nullspalt und zur Vergrößerung des Anbindequerschnitts beschrieben.

Unter Strahlbewegung sei hier eine spiral- oder kreisförmige Laserstrahlbewegung um das Nahtende verstanden, die unmittelbar nach dessen Erreichen zu einer Endkraterbehandlung eingesetzt werden kann. Diese Strahlbewegung wird mit einer höheren Geschwindigkeit als die des Schweißprozesses durchgeführt, sodass nur der obere Bereich des Bleches aufgeschmolzen wird. Die Laserleistung muss dabei so gewählt werden, dass keine Dampfkapillare entsteht – also nur Wärmeleitungsschweißen stattfindet.

In Abschnitt 5.3.2 wird über die Entstehung einer Schmelzbadöffnung diskutiert und ein lokales Schmelzbaddefizit – insbesondere am Nahtende – festgestellt. Durch eine Strahlbewegung, welche im Bereich des Nahtendes die scharfkantigen Einfallstellen um den Endkrater abschmilzt, kann der Endkrater über diese dergestalt gewonnene

Schmelze geschlossen werden (Abbildung 6.3). Wichtig dabei ist, dass zwischen Schweißnahtende und anschließender Strahlbewegung kein zeitlicher Verzug entsteht und die Schmelze zu sehr abkühlt. Denn sonst würde eine sehr hohe Leistungsdichte zum Wiederaufschmelzen der Nahtflanken benötigt, was wiederum zu einer hohen Dynamik innerhalb des Schmelzbades führen würde.

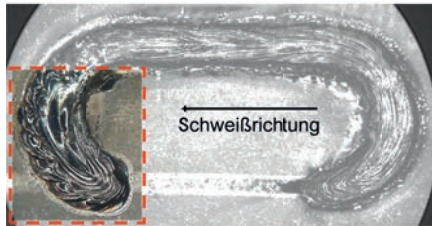


Abbildung 6.3: Endkraterfüllung mit Hilfe Strahlbewegung: Schweißnaht mit Nachbehandlung im Bereich des Endkraters innerhalb einer zweiten Laserüberfahrt. Die unterbrochene Linie kennzeichnet den Bereich der nachträglichen Endkraterfüllung.

Diese Art der Nachbehandlung von Schweißnähten kann in einer Prozesszeit von etwa 50 ms pro Schweißnaht erfolgen. Es können damit Endkrater und Endkraterlöcher geschlossen werden. Bei sporadisch auftretenden Prozess- und Toleranzschwankungen indessen können Nahtfehler, die nicht unmittelbar im Bereich des Nahtendes vorkommen, nicht vollständig eliminiert werden.

6.2.2 Kantenabschmelzen

Anwendungsbereiche für einen Scanner mit einer zusätzlichen Möglichkeit, die Fokusslage zu variieren (3D-Scanner), sind aus Prozesssicht die Reduzierung von Nahtüberhöhungen, Nahtunterwölbungen und Endkratern. Löcher durch Auswürfe können ebenfalls durch eine zweite Überfahrt nach dem Schweißen eliminiert werden. Die Lösungen, die ein 3D-Scanner in allen diesen Bereichen bietet, sind als Nachbehandlungen oder Reparaturen einzuordnen.

So kann eine breitere und weniger tiefe Nahteinfallform erzeugt werden mit allen positiven Auswirkungen auf den minimalen Anbindequerschnitt, die Kerbwirkung und den Korrosionsschutz. Nicht beeinflussen kann ein nachträgliches Kantenabschmelzen die Größe des Nahteinfallvolumens, aber dessen Tiefe. Schweißnähte mit einer solcherart beschriebenen Nachbehandlung stellen im Bereich Schweißen verzinkter Karosserie-

werkstoffe einen neuen, bisher nicht erreichbaren Qualitätsstandard dar. Die Qualität einer Schweißnaht mit defokussierter Nachbehandlung in einer zweiten Überfahrt ist im Vergleich zu einer Endkraterbehandlung mittels Strahlbewegung nach Abschnitt 6.1.2 qualitativ höher zu bewerten. Vorhandene Nahtunregelmäßigkeiten lassen sich hier noch effizienter eliminieren.



Abbildung 6.4: Prinzipskizze zur Reduzierung scharfer Einbrandkerben und großem Nahteinfall: Kantenabschmelzen durch eine zweite Überfahrt mit defokussiertem Laserstrahl.

Aufgrund der Defokussierung wird bei der zweiten Überfahrt ein breiterer Bereich als bei der vorangegangenen Schweißung überfahren (siehe Abbildung 6.4). Während dieser defokussierten Überfahrt ist die Leistungsdichte des Laserstrahls entsprechend geringer, ähnlich wie bei der Strahlbewegung in Abschnitt 6.2.1, sodass auch hier nur Wärmeleitungsschweißen stattfindet und keine Dampfkapillare entsteht. Der zusätzlich aufgeschmolzene Bereich der zuvor entstandenen Nahtkanten, welche die Schweißnaht ohne nachträgliche Optimierung begrenzen, verteilt sich nach dem Prozess des Kantenabschmelzens gleichmäßig über die gesamte Nahtbreite. Dabei wird die im ersten Schritt erzeugte Schweißnaht nur an der Oberfläche aufgeschmolzen.

Die Beobachtungen zeigen ein ruhiges Schmelzbad und einen sehr stabilen Prozessverlauf während dieser Überfahrt. Zusätzlich kann die Überfahrgeschwindigkeit wesentlich größer als die ursprüngliche Schweißgeschwindigkeit gewählt werden, was die Energieeinbringung in die Bleche verringert und die gesamte Prozesszeit des Schweißens nicht wesentlich erhöht. Es erweist sich, dass mit dem 3D-Scanner hervorragend glatte Nahtoberflächen erzeugen werden können und der Nahteinfall deutlich verringert wird (Abbildung 6.5).

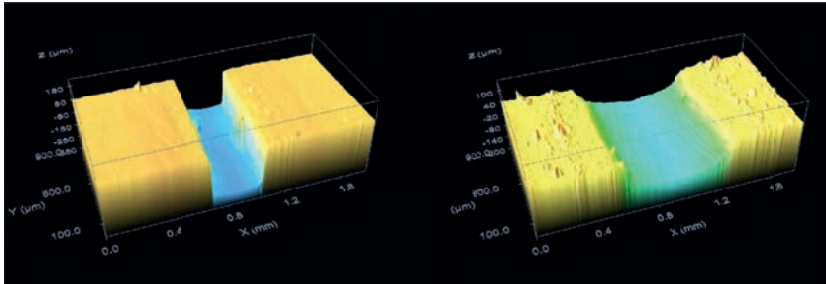


Abbildung 6.5: Vergleichsmessung zum Naht-einfall: Schweißnähte mit einem Spaltmaß von $s = 0,25$ mm, links: ohne Nachbehandlung mit scharfkantigem Naht-einfall, rechts: mit defokussierter, zweiter Überfahrt und geglättetem Naht-querschnitt.

Es resultieren größere Anbindebreiten, was scharfe Kanten und die Kerbwirkung reduziert. Es sind daher, insbesondere bei Schweißnähten mit großem Spalt, verbesserte Festigkeitseigenschaften zu erzielen. Ob eine zweite Überfahrt der gesamten Schweißnaht mit defokussiertem Laserstrahl notwendig ist, hängt von den jeweiligen Qualitätsanforderungen des Bauteils ab.

6.3 Fertigungstechnische Aspekte

Die Möglichkeiten, welche die Scannertechnik aus Prozesssicht bietet, sind so einzuordnen, dass die Prozessführung mit Scanner die Ursachen für die Entstehung von Nahtunregelmäßigkeiten wenig beeinflussen kann, wohl aber hervorragende, neue Möglichkeiten zur Nachbehandlung von Nahtunregelmäßigkeiten durch schnelle Strahlbewegung und Rampenfunktionen bietet. Dessen ungeachtet müssen Toleranzen bezüglich des Entgasungsspalts dennoch eingehalten werden, was die hohen Anforderungen an die Spanntechnik im Vergleich zum konventionellen Laserstrahlschweißen weiterhin bestehen lässt.

Die in dieser Arbeit diskutierten Spritzer wurden primär mit einer Qualitätsverschlechterung der Schweißnaht in Verbindung gebracht. Für den gesamten Fertigungsprozess haben Spritzer noch weitere negative Auswirkungen. Spritzer, welche direkt neben der Schweißnaht oder über das gesamte Bauteil verteilt haften bleiben, stellen ein Korrosionsrisiko dar. Die Spritzeranhaftung im Sichtbereich der Bauteile kann eine aufwändige Nacharbeit erforderlich machen, welche nicht automatisiert werden kann und zusätzliche Kosten verursacht.

Spritzer, welche an der Spanntechnik oder am Schutzglas der Scanneroptik haften bleiben, führen zu Prozessschwankungen, z.B. einer geringeren Einschweißtiefe und einer geringeren Verfügbarkeit der Gesamtanlage auf Grund erforderlicher Instandhaltungsmaßnahmen.

Lochbehaftete Schweißnähte sind verbunden mit einem erhöhten Risiko von Korrosion bzw. undichter Bauteilflansche und einer Reduzierung der Festigkeit. Die zulässigen Nahtunregelmäßigkeiten unterscheiden sich von Bauteil zu Bauteil und legen die Anforderungen an die Schweißnahtqualität fest.

Die Einhaltung von Taktzeiten, oder besser: eine hohe Auslastung der Laserstrahlquelle ist die Voraussetzung für den wirtschaftlichen Einsatz einer solchen Technologie. Die in Kapitel 6 beschriebenen Maßnahmen zur Qualitätsoptimierung von Schweißnähten führen meist zu einer geringfügigen Schweißzeitverlängerung. Ob die Taktzeit einer gesamten Produktionsanlage dadurch ebenfalls ansteigt, ist hauptsächlich von der Bearbeitungsbahn und der Laserauslastung ohne zusätzliche Prozessoptimierungen abhängig. Lassen sich mit der Scannertechnik aufwändige manuelle Nacharbeiten, wie beispielsweise das Abdichten lochbehafteter Schweißnähte, eliminieren und somit zu einer Steigerung der Bauteilqualität führen, ist der Einsatz durch Nachbehandlungen von Schweißnähten mit Strahlbewegung bzw. Kantenabschmelzen von großem Vorteil.

7 Zusammenfassung

Inhalt dieser Arbeit ist das prozesssichere Fügen beschichteter Karosseriestahlbleche durch die Anwendung der Remote-Laserschweißtechnik unter Einhaltung des geforderten Qualitätsstandards beim so genannten Welding-on-the-Fly. Die Problematik beim Schweißen beschichteter Bleche besteht darin, den Dampf des Beschichtungswerkstoffs, der bei niedrigeren Temperaturen entsteht als der Schmelzvorgang beim Grundwerkstoff, aus der Fügeebene abzuleiten. Gelingt dies nicht, ist ein fehlerloser Schweißprozess nicht darstellbar, da die Beschichtungsdämpfe über die Schmelze entweichen und Poren verursachen. Im Kapitel Stand der Technik wird eine Zusammenfassung und Bewertung der bisher untersuchten Verfahrensansätze zum Fügen verzinkter Stahlbleche gegeben.

Die in der Literatur vorgeschlagenen Prozessbeeinflussungen durch Strahlbewegung, Pulsen, Doppelfokustechnik, Hybridtechnik und die Verwendung von Zusatzwerkstoffen können keinen Nachweis erbringen, dass ein prozesssicheres Schweißen mit Nullspalt unter Serienproduktionsbedingungen möglich ist. Alle bisherigen Bemühungen, beschichtete Karosseriebleche mit Nullspalt durch Laserschweißen zu fügen, hatten meist einen eher wissenschaftlichen Charakter. So sind nur unter Laborbedingungen bei einigen Verfahrensvarianten fehlerfreie Schweißnähte im Nullspalt möglich. Faktoren wie Leistungsschwankung, Änderung des Einstrahlwinkels, Fokuslageänderung und Schichtdickenschwankung beeinflussen die Prozessstabilität enorm. Daher findet das Laserschweißen von verzinkten Blechen mit Nullspalt in der Serienfertigung keine Anwendung.

Ein möglichst gleichmäßiger Entgasungsspalt für das Abströmen des Zinkdampfes ist deshalb die sicherste Methode, beschichtete Bleche im Überlappstoß zu schweißen. Die erforderlichen Spaltmaße von ca. 50 bis 150 μm sind abhängig von Blechdicke, Beschichtungsstärke und Stahlsorte. Konstruktive Möglichkeiten zur Spalterzeugung stellen Sicken, Keilspalt und Rändelungen dar. Die Spalteinstellung über stationäre oder mitlaufende Spanntechniken sind aufwändig, bauteilspezifisch und kleinste Bauteiländerungen erfordern einen hohen Umrüstaufwand.

Die Notwendigkeit eines garantiert konstanten Fügespalts von rund 0,1 mm für die Entgasung der verdampfenden Beschichtungsanteile war Anlass für die Entwicklung

von topografischen Erhebungen mittels Laserstrahlung. Der Vorteil besteht darin, dass diese Abstandsnoppen mit der bestehenden Remote-Schweißanlage dargestellt werden können und mit dem Prozess des anschließenden Schweißens sinnvoll kombiniert werden kann.

Eine der beiden Hauptaufgaben der Arbeit war es, eine Spalterzeugung durch Laserpulse zu generieren. Diese so genannten Lasernoppen werden mit dem Laser vor dem eigentlichen Schweißvorgang auf einem der zu fügenden Bleche erzeugt. Mit Hilfe dieser Lasernoppen als Abstandshalter ist die Darstellung des erforderlichen Spaltmaßes beim Schweißen beschichteter Karosseriebleche sehr gut realisierbar. Der Vorteil beim Remote-Verfahren ist die flexible Anpassung der Noppengeometrie und die schnelle Positionierung des Laserstrahls auf die programmierten Noppenkoordinaten.

Die Auswertung zahlreicher Versuchsreihen und Hochgeschwindigkeitsaufnahmen geben Aufschluss über die Noppenentstehung. Es können zwei völlig unterschiedliche Entstehungsmechanismen für unterschiedliche Stähle nachgewiesen und erklärt werden. Die Noppenentstehung auf Stählen bis 400 MPa – hergestellt im Modus des Wärmeleitungsschweißens – beruht auf den Wirkungsmechanismen der Oberflächenspannung, während die Noppenentstehung auf dem höchstfesten TRIP Werkstoff – hergestellt im Modus des Tiefschweißens – durch Schmelzströmung hervorgerufen wird.

Es wurden Noppenparameter für weiche DC04 Stähle, für hochfeste Stähle bis 400 MPa und für höchstfeste TRIP-Werkstoffe bis 700 MPa entwickelt. Auf den verschiedenen Stählen wurden Noppenhöhen im Bereich zwischen 50 und 250 μm realisiert. Einflussgrößen für die Noppenentstehung sind Prozesszeit, Intensität des Laserstrahls (Defokussierung), Grundwerkstoff, Blechdicke, Beschichtung und Einstrahlwinkel. Die Prozesszeiten für Noppen im Modus des Wärmeleitungsschweißens liegen bei 12 bis 50 ms. Die wichtigsten Stellgrößen für Noppenhöhe und Gestaltung sind Defokussierung und Prozesszeit, also sowohl Intensität als auch Energiedichte. Mit zunehmender Defokussierung und entsprechend längerer Prozesszeit kann die Noppenhöhe gesteigert werden. Dabei nimmt die Streuung der Noppenhöhe außerhalb der idealen Kombination von Pulszeit und Defokussierung zu.

Im Kapitel 5 werden alle für das Schweißen von verzinkten Karosserieblechen relevanten Nahtunregelmäßigkeiten bzw. Schweißfehler zunächst definiert und bewertet. In einer breit angelegten Versuchsreihe werden Einflussgrößen auf die Fehlerentstehung herausgearbeitet und die zugehörigen Fehlerentstehungsmechanismen – insbesondere beim Laserstrahlschweißen mit Spalt – identifiziert.

Der experimentell ermittelte Minimalspalt für eine fehlerfreie Schweißnaht elektrolytisch verzinkter Stähle mit Blechdicken zwischen 0,7 und 1,5 mm bei der Laserleistung von 4 kW und einem Fokusbereich von 680 µm bewegt sich zwischen 0,07 und 0,1 mm. Bei der Untersuchung des Einflusses des Spaltmaßes bei unterschiedlichen Fokusbereichen stellt sich heraus, dass Endkraterlöcher und Anbindefehler bei der Verwendung kleiner Fokusbereiche bereits bei kleinerem Spaltmaß auftreten.

Die Größen Spaltmaß, Blechdicke und Fokusbereich bestimmen vorwiegend die Prozessstabilität beim Laserschweißen verzinkter Bleche.

Mit zunehmendem Spaltmaß vergrößert sich die Anbindefläche in der Fügeebene und auch der Nahteinfall nimmt zu. Über alle Versuchsreihen hat sich gezeigt, dass die Größe des Entgasungsspaltes zwischen den Blechen ein zentraler Parameter ist und damit den größten Einflussfaktor beim Laserschweißen mit Überlappstoß darstellt.

Bei der Beobachtung der Hochgeschwindigkeits-Sequenzen konnte ein geöffnetes Schmelzbad hinter der Dampfkapillare beobachtet werden, welches sich mit zunehmender Nahtlänge vergrößert. Es konnte auf ein Schmelzbaddefizit zurückgeführt werden, welches durch eine Materialumverteilung entlang einer Schweißnaht hervorgerufen wird. Schweißspritzer und große Spaltmaße erhöhen das Schmelzbaddefizit, die Auswirkung sind Endkraterlöcher und Schmelzbadabrisporen.

Des Weiteren konnten in der Arbeit verschiedene Spritzertypen definiert und Vermeidungsstrategien für die Typen 1 und 2 hergeleitet werden. Allgemein sind Schweißspritzer auf eine hohe Schmelzbaddynamik zurückzuführen und nehmen mit Steigerung von Laserleistung und Schweißgeschwindigkeit zu. So können beispielsweise mit einer kurzen Laserleistungsrampe und wahlweise einer zusätzlichen Geschwindigkeitsrampe Startspritzer am Nahtanfang vermieden werden. Geschlossene Schweißmuster sind zu vermeiden, da sie am Nahtende zu Schmelzauswürfen führen.

Durch eine zweite Laserüberfahrt nach der Schweißung können Nahtüberhöhungen, Nahtunterwölbungen, Endkrater, Löcher und Schmelzauswürfe reduziert bzw. vermieden werden. Dies erfolgt bei geringerer Leistungsdichte und mit höherer Geschwindigkeit, was den zusätzlichen Prozesszeitaufwand reduziert. Diese nachträgliche Bearbeitung kann derart ausgeführt werden, in dem der Laserstrahl spiralförmig um die Fehlstelle geführt wird, um benachbartes Material aufzuschmelzen und in die Fehlstelle fließen zu lassen. Dabei ergibt sich nach dem Prozess des Kantenabschmelzens ein

gleichmäßiger Nahtquerschnitt mit reduziertem Nahteinfall und hervorragend glatten Nähten, deren Anbindequerschnitt und Festigkeit optimiert und Kerbwirkung reduziert ist.

Die Schweißnahtqualität, die beim Remote-Schweißen in Verbindung mit schnellen Spiegelbewegungen oder einer Defokussierung im direkten Anschluss an den Schweißprozess erreichbar ist, stellt einen neuen Qualitätsstand beim Laserstrahlschweißen von beschichteten Blechen dar. Selbst mit einem Scanner ohne ein Modul zur Fokusslageneinstellung kann durch zusätzliche Strahlbewegung zur Eliminierung von Endkratern eine sehr gute Nahtqualität erreicht werden. Bei Verwendung eines Scannersystems, bei welchem zusätzlich der Fokussdurchmesser während des Schweißens verändert werden kann, kommt es in Folge einer effizienteren Fehlerreduzierung zu einer weiteren Steigerung der Nahtqualität.

Modernste Festkörperlaser mit höheren Leistungen, wie Scheibenlaser und Faserlaser im Leistungsbereich zwischen 10 und 20 kW ermöglichen grundsätzlich höhere Fügegeschwindigkeiten und könnten zu einer noch höheren Wirtschaftlichkeit des Verfahrens beitragen. Die direkte Umsetzung dieser hohen Laserleistungen in Schweißgeschwindigkeit ist jedoch prozesstechnisch nach heutigem Kenntnisstand, abhängig vom Material, nur bedingt möglich. Insbesondere in Verbindung mit weichen Stählen kommt es bei sehr hohen Schweißgeschwindigkeiten zum so genannten „Humping“. Da eine prozessseitige Umsetzung und die Auswirkungen derart hoher Laserleistungen bisher nur ansatzweise untersucht sind, ist das angeführte Leistungsniveau für das Schweißen von Blechen noch nicht bestätigt.

Die Ergebnisse dieser Arbeit bieten ein umfassendes Prozessverständnis der Noppenentstehung mittels Laserstrahlung in Verbindung mit der Remote-Schweißtechnik. Die wesentlichen Fehlerentstehungsmechanismen beim Schweißen verzinkter Bleche im Überlappstoß konnten identifiziert und zielführende Abhilfemaßnahmen erarbeitet werden. Die untersuchten Schweißprozesse in Verbindung mit der Scannertechnik wurden zur Serienreife entwickelt und sind im industriellen Umfeld in Großserien weltweit erfolgreich im Einsatz.

8 Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] HÜGEL, H.: *Laser in der Fertigung*. Springer Verlag, Stuttgart, 3. Auflage, 2013.
- [2] CARSLAW, H. S.; JAEGER, J. C.: *Conduction of Heat in Solids*. 2nd Edition, Oxford: Oxford University Press, 1959.
- [3] GRATZKE, U.; KAPADIA, P. D.; DOWDEN, J.: *Heat conduction in high-speed laser welding*. In: Journal of Applied Physics D., Vol. 24, 1991, S. 2125.
- [4] FUHRICH, T.: *Marangoni-Effekt beim Laserstrahl-tiefschweißen von Stahl*. Dissertation, Universität Stuttgart, In: Forschungsberichte des IFSW, Herbert Utz Verlag, 2005.
- [5] HOHENBERGER, B.: *Schweißen mit Zweistrahltechnik*. Universität Stuttgart, Institut für Strahlwerkzeuge, 1999.
- [6] RATZEK, U.; GREIS, P.: *Das ULSAB-Projekt: Neue Wege im Automobilleichtbau mit Stahl*. *Stahl und Eisen*. 118 H. 8 (1998), S. 45–48.
- [7] DIN 8528 Blatt 1, 06.73: *Schweißbarkeit – metallische Werkstoffe – Begriffe*.
- [8] GLUMANN, C.: *Verbesserte Prozesssicherheit und Qualität durch Strahlkombination beim Laserschweißen*. Stuttgart: Teubner, 1996. Universität Stuttgart, Dissertation, 1996 (Reihe Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW).
- [9] RADAJ, D.; U. A.: *Laserschweißgerechtes Konstruieren – Beiträge zu innovativen Fertigungsverfahren*. Forschungsbericht DaimlerChrysler, Stuttgart (1993).
- [10] LEWIS, C.: *Fatigue performance of fusion welded automotive high strength steels*. In: *Welding & Metal Fabrication* 64, H. 7 (1996), S. 719–725.

- [11] LEUSCHEN, B.: *Fügen von höherfesten und hochfesten Stählen im Karosseriebau*. In: Dilthey, U. (Hrsg.): 6. Aachener Schweißtechnik Kolloquium: *Fügen zukunftsweisender Werkstoffe – Fortschritte, Erfahrungen, Tendenzen – Band 2*. Aachen: Shaker, 1999, S. 293–302.
- [12] Internetseite: Stahl-Informations-Zentrum, Düsseldorf, www.stahl-info.de, 2005.
- [13] BARGEL, H.-J.; SCHULZE, G. (Hrsg.): „*Werkstoffkunde*“. 7.Aufl. Berlin: Springer, 2000.
- [14] KRUSKA, J. U.; EHLERS, K. D.: *Weigt savings in the car body using newly developed high strenght and organically coated sheet steel*. Salzgitter: Fa. Preussag Stahl AG, 1997.
- [15] Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, Friedrich Vieweg & Sohn, 24. Auflage, Verlagsgesellschaft mbH, Robert Bosch GmbH Braunschweig / Wiesbaden, ISBN 3-528-13876-9, 2002.
- [16] DaimlerChrysler, Intranet-Datenbank MADIS (Material Datenbank System).
- [17] WICHELHAUS, W.; LORENZ, W.: *Schweißbare Bandbeschichtungen für die Automobilindustrie*. In: Automotive Circle International Conference (2000), Bad Nauheim.
- [18] DETTINGER, T.: *Laserstrahlschweißen beschichteter Stahlbleche*. Diplomarbeit, DaimlerChrysler AG, Sindelfingen.
- [19] KÄGELER, C.: *Prozessdynamik beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche im Überlappston*. Dissertation, Universität Erlangen, Meisenbach Verlag 2013
- [20] ZOPF, P.: *Bauteilgestaltung für das Schweißen mit Festkörperlaser*. Hanser Elektronik, Fachbuch 1995.
- [21] DOMMASCHK, R.; MAYRHOFER, R.: *Laserstrahlschweißen verzinkter Bleche*. Projektdokumentation LAS-18, INPRO, 1996.

- [22] MA, J., KONG, F., CARLSON, B., KOVACEVIC, R., *Mitigating Zinc Vapor Induced Weld Defects in Laser Welding of Galvanized High-Strength Steel by Using Different Supplementary Means*, In: InTech, 2012
- [23] Schutzrecht US 4, 642, 446 (1987). PENNINGTON, E. J.: *Laser Welding of Galvanized Steel*.
- [24] Offenlegungsschrift DE A1 10309157, DaimlerChrysler 2003.
- [25] DENNEY, P.; XIE, J.: *The welding of galvanized steel*. In: ICALEO 2000, Laser Microfabrication Conf., 19th Internat. Congress 91 (2000), S. A.1–9, Dearborn USA, 02.–05.10.2000.
- [26] LOREDO, A.; MARTIN, B.; ANDRZEJEWSKI, H.; PILLOZ, M.; GREVEY, D.: *Numerical Study of Zinc Coated Car Body Laser Welding*. Society of Automotive Engineers, October 2001, S. 59 – 64.
- [27] KIELWASSER, M.; FABBRO, R.; POPRAWA, R.: *Physical Processes During Pulsed Nd:YAG Laser and CW-CO₂ Laser Welding of Zinc-Coated Steel*. ICALEO 2000.
- [28] MOMBO-CARISTAN, J. C.; MUELLER, R. E.; SHARP, C. M.; MCCAY, M. H.: *Parabolic Mirror Adapted-Alignment for High Speed – High Power Laser Welding with an Oblong Focused Beam Spot*. ICALEO 1997.
- [29] GRAHAM, M. P.; HIRAK, D. M.; KERR, H. W.; WECKMAN, D. C.: *Nd:YAG Laser Beam Welding of Coated Steels Using a modified Lap Joint Geometry*. In: Welding Journal 75 (1996), Nr. 5, S. 162–170.
- [30] TZENG, Y.-F.: *Toward process optimization in pulsed Nd:YAG laser seam welding of zinc coated steel*. In: JSME International Journal, Series C (Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing) 43 (2000), Nr. 1, S. 47–54.
- [31] Patentschrift DE B3 10355049 DaimlerChrysler 2003.
- [32] ULANOWSKI, M.: *Einsatz von Scannertechnik zum Laserstrahlschweißen von Stahlblechen*. Diplomarbeit DaimlerChrysler AG, Ulm, 2002.

- [33] FAIßT, F.; FRITZ, R.; KERN, M.; WEICK, J.-M.: *Anwendungen der TWINFOKUS-Technik*. In: SLT (1999), S. 50–52.
- [34] HOHENBERGER, B.: *Laserstrahlschweißen mit der Doppelfokustechnik. Grundlagen und industrielle Anwendung*. In: Werkstattstechnik – wt 91 (2001), Nr. 1, S. 12–19.
- [35] SALMANN, I., MUDDASSIR, M.S., ATEEQ, R.: *Dual beam method for laser welding of galvanized steel*, In: Optics & Laser Technology 42, 2010, S. 93–98
- [36] BEREN, J.; SEEFELD, T.; VOLLERTSEN, F.; PIONTEK, D.; DILTHEY, U.: *Laserstrahlschweißen mit prozessintegrierter Reinigung*. in: Der Praktiker, Ausgabe 04/2004, S. 118–120.
- [37] XIE, J.; DENNEY, P.; ROBINSON, J.; PEZZUTTI, M.: *Zero-Gap Laser Lap Welding of Galvanized Steel – Phase I*. Edison Welding Institute, Columbus, 2001.
- [38] XIE, J.; DENNEY, P.: *Galvanized Steel Joined with Lasers*. Welding Journal 80/6, 2001, S. 59–61.
- [39] FORREST, M.; FENG, L.: *Development of a novel dual beam configuration*. Konferenz-Einzelbericht: ALAC 2004, Advanced Laser Application Conference & Exposition, in Ann Arbour, USA, 20.–22. September 2004.
- [40] FAIßT, F.; RAPP, J.; SCHINZEL, C.; DAUSINGER, F.; HÜGEL, H.: *Prozeßsicheres Laserschweißen von Aluminiumlegierungen*. 4. Konferenz für Strahltechnik, DVS-Verlag, Halle, 1996.
- [41] DAUSINGER, F.; RAPP, J.; HOHENBERGER, B.; HÜGEL, H.: *Laser beam welding of aluminum: state of the art and recent developments*. In: Proceedings of the International Body Engineering Conference (IBEC '97) on Advanced Technologies & Processes. Stuttgart, 1997, S. 38.
- [42] GREF, W.; HOHENBERGER, B.; DAUSINGER, F.; HÜGEL, H.: *Energy coupling and process efficiency in double- focus welding with Nd:YAG*. In: Proceedings of ICALAO, Scottsdale, Arizona, USA, 2002, Vol 94, S. 289.
- [43] BONSS, S.; HANNWEBER, J.: *Machbarkeitsstudie zum Hybridschweißen von beschichteten Karosserieblechen*. Bericht IWS Mai 2002.

- [44] Patentschrift DE 3926781 C2, Fraunhofer-Gesellschaft 1991.
- [45] BEHLER, K.; IMHOFF, R.; BEYER, E.: *Laserstrahlschweißen beschichteter Feinbleche*. In: *Dünnblechverarbeitung*. (1996), Seite 44–61.
- [46] YANG, S., CARLSON, B., KOVACEVIC, R.: *Laser Welding of High-Strength Galvanized Steels in a Gap-Free Lap Joint Configuration under Different Shielding Conditions*, In: *Welding Journal*, Vol. 90, 2011
- [47] MAZUMDER, J.: *Alloying Based Laser Welding of Galvanized Steel*. University of Michigan, 2000.
- [48] AKHTER, R.; CRINCIANI, D.; STEEN, W. M.: *Laser welding of zinc coated steel*. In: *Lasers in Manufacturing*, Proc. of the 5th Int. Conf. org. by IFS (1988), S. 195–206, Stuttgart, 13.–14.9.1988.
- [49] Patentschrift US 5,371,337, General Motors 1992.
- [50] ZHOU, S., ZHAO, Y., PENG, Z., REN, F.: *The Investigation of Laser Lap Welding Process on High-Strength Galvanized Steel Sheets*, In: *ISRN Mechanical Engineering*, 2011
- [51] Patentschrift DE 19943752 C1, BMW 2001.
- [52] Patentschrift DE 3812448 C1, BMW 1989.
- [53] Patentschrift EP 1005944, BMW 1999.
- [54] Patentschrift DE 4407190 A1, Thyssen Laser-Technik 1995.
- [55] FORREST, M.: *Recent Developments on Laser Lap Welding of Zinc Coated Steel Sheets Without Gap at the Interface*. Konferenzbericht EALA, 2004.
- [56] CHEN, W., ACKERSON, P., MOLIAN, P.: *CO₂ Laser welding of galvanized steel sheets using vent holes*, In: *Materials & Design*, Vol. 30, S. 245–251, 2009
- [57] TARUI, T.; MORI, K.: *Laser Welding Application of Nissan Car Bodies*. NISSAN MOTOR Co. Ltd. Japan, Automotive Circle Conference 2005.
- [58] Offenlegungsschrift DE A1 10259604, Tünkers Maschinenbau GmbH 2002.

- [59] LÖSCHMANN, F.: *Der neue Golf V von VOLKSWAGEN*. 19. Fachtagung – „Prozesskette Karosserie“, November 2003.
- [60] LÖFFLER, K.: *Laserapplications Golf V: Concept and Implementation in Production*. Vortrag, EALA, Automotive Circle Conference 2004.
- [61] BÖHM, K.; REIBEL, J.; HEIN, ST.: *Der neue Audi A3 – Schweißapplikationen*. Vortrag, EALA, Automotive Circle Conference 2004.
- [62] Homepage Fa. Scansonic, Berlin: <http://www.scansonic.de/de/news/fso-gewichtersparnis-dank-innovativer-schweisstechnik>, 2015
- [63] HAFERKAMP, H.; ALVENSLEBEN, F. VON; SCHMID, C.: „*Das leichte Stahlrad durch hochfesten Stahl und Laserstrahlschweißtechnik*“. Konferenz-Einzelbericht, DVM-Tag, Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung (DVM), pp. 135–141, 1999.
- [64] THYSSENKRUPP STAHL, Infobroschüre: *Zink-Magnesium-Oberflächen – Die neue Generation von Zinklegierungsüberzügen: korrosionsbeständiger, verarbeitungsfreundlicher*. November 2003.
- [65] NN: *Metallische Überzüge auf Stahl*, VoestAlpine, Vortrag 2005.
- [66] DEBSCHÜTZ, K.; BECKER, W.; BERNHARDT, R.; MANN, K.: *New laser application potential through robot-guided remote laser welding*. In: 3th European Conference and Exhibition, „Automotive Circle International“ Bad Nauheim, 2002. tci – Technik & Kommunikation Verlags GmbH, Berlin, 2002.
- [67] BEYER, E.: *Schweißen und Schneiden mit Faserlasern – ein Entwicklungssprung in die Lasertechnik aus Anwendersicht*. Vortrag, EALA, Automotive Circle Conference 2006.
- [68] BECKER, W.; BECK, M.; BERNHARD, R.: *Laser Welding: Potential of Robot-Guided Remote Welding*. Konferenzbericht, LANE 2004.
- [69] BECKER, W.; BECK, M.; BERNHARD, R.: *Laser Welding: Potential of Robot-Guided Remote Welding*. Konferenzbericht, LANE 2004.
- [70] VDI Nachrichten, Ausgabe 06/05: *Lasertechnik*, Düsseldorf, 2005.

- [71] DILTHEY, U.: *Fügen im Fahrzeugbau – Verfahren, Fortschritte, Anwendungen*. 9. Internationales Aachener Schweißkolloquium 2004.
- [72] ÖFELE, F.: *Remote Laserstrahlschweißen mit brillanten Laserstrahlquellen*, IWB München, Dissertation 2012
- [73] HORNIG, H.; SCHUPP, A.: *Das Remote-Laserstrahl-Schweißen bei der neuen BMW 3er Reihe*. Vortrag, Stuttgarter Lasertage 2005.
- [74] BERNHARDT, R.: *Robotergeführtes Remote-Laserschweißen auf dem Weg in den Karosseriebau*. EALA, Automotive Circle Conference 2005.
- [75] OELJEKLAUS, M.; GERMANN, V.; CORDES, R.: *Die neue Passat-Karosserie*. Präsentation, EuroCarBody 2005.
- [76] STEWEN, C.: *Scheibenlaser mit Kilowatt-Dauerstrichleistung*. Universität Stuttgart, Dissertation. In: *Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW*. München: Herbert Utz Verlag, 2000.
- [77] GIESEN, A.; BRAUCH, U.; JOHANNSEN, I.; KARSZEWSKI, M.; STEWEN, C.; VOSS, A.: *Diode pumped thin disc high power Yb laser*. In: *Conference on Lasers and Electro - Optics - Europe (Technical digest of CLEO-Europe '96)*, Hamburg. Piscataway (NJ), 1996, S 41.
- [78] VOSS, A.: *Der Scheibenlaser: theoretische Grundlagen des Dauerstrichbetriebs und erste experimentelle Ergebnisse anhand von Yb:YAG*, Dissertation. In: *Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW*. München: Herbert Utz Verlag, 2002.
- [79] MANN, K.: *Mit dem Scheibenlaser zu neuer Applikationen*. Vortrag, EALA, Automotive Circle Conference 2004.
- [80] VOSS, A.; BRAUCH, U.; WITTIG, K.; GIESEN, A.: *Efficient high- power diode-pumped thin- disk Yb:YAG- laser*. In: *Proceedings of the 9th Meeting on Optical Engineering in Israel, Tel Aviv, 1994*. Bellingham (WA): SPIE Proc. Vol. 2426, 1995, S. 501.
- [81] Trumpf Homepage 2015:
www.trumpf-laser.com/de/produkte/festkoerperlaser/scheibenlaser.html

- [82] DAHL, W.: Werkstoffkunde Stahl, Band 1: Grundlagen. Berlin: Springer, 1984.
- [83] DANZER, W.: *Schutzgase beim Laserstrahlschweißen – mehr als nur ein Hilfsstoff?*. Schweißtechnische Tagung: Schweißen und Schneiden, 2004.
- [84] DONGJIE, L., LU, S., DIANZHONG, L., YIYI, L.: *Weld pool shape variations and electrode protection in double shielded TIG welding*. In: Advanced Materials Research Vols. 97-101, 2010
- [85] GERTHSEN, C.: Physik. Springer Verlag, Berlin, 1966.
- [86] FUJI, H., LU, S., SATO, T., NOGI, K.: *Effect of oxygen content in He-O₂ shielding gas on weld shape for ultra deep penetration TIG*. In: Transactions of JWRI, Vol. 37, 2008
- [87] WANG, Y, TSAI, H.L.: *Effects of surface active elements on weld pool fluid flow and weld penetration in gas metal arc welding*. In: Metallurgical and Materials Transactions, Volume 32B, 2001
- [88] OZAWA, S., TAKAHASHI, S., SUZUKI, S., SUGAWARA, H., HIBIYA, T., FUKUYAMA, H.: *Surface tension of molten iron measured by oscillating droplet method using electromagnetic levitation*. In: Transactions of JWRI, Vol.39, 2010
- [89] CZERNER, S.: *Schmelzbaddynamik beim Laserstrahlwärmeleitungsschweißen von Eisenwerkstoffen*. Dissertation Universität Hannover, 2005
- [90] TAKAMICHI, I.; GUTHRIE, R.: *The Physical Properties of Liquid Metals*. Clarendon Press, Oxford 1988.
- [91] N.N.: Voest Alpine: Messung der chemischen Analyse von hochfesten Stählen, 2014
- [92] SCHULZ, M.: *Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen*. Bamberg: Maisenbach Verlag, 1997. Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation 1996. Reihe: Fertigungstechnik Erlangen.
- [93] Europäische Norm EN ISO 13919-1:1996.

- [94] GRIEBSCH, J.: *Grundlagenuntersuchungen zur Qualitätssicherung beim gepulsten Lasertiefschweißen*. Dissertation Universität Stuttgart, Teubner Verlag, 1996
- [95] HÜGEL, H., BERGER, P.: *Zur Bedeutung von gleitenden Stufen an der Kapillarfront beim Schweißen und Schneiden mit Laserstrahlen*, In: Schweißen und Schneiden, Band 63, 2011
- [96] ERIKSON, I., POWELL, J., KAPLAN, A.F.H.: *Melt behavior on the keyhole front during high speed laser welding*, In: Optics and Lasers in Engineering, Vol. 51, S. 735-740, 2013
- [97] Beck, M., Modellierung des Lasertiefschweißens 1996, 160 Seiten, Dissertation IFSW Universität Stuttgart
- [98] BERGER, P., HÜGER, H., *Fluid dynamic effects in keyhole welding – an attempt to characterize different regimes*, In: Lasers in Manufacturing Conference 2013
- [99] AALDERINK, B. J.: *Experimental observation of keyhole shapes in the laser welding of aluminum blanks*, In: Journal of Laser Applications, Vol. 19, 2007

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

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

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

Zoske, Uwe

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

Gorritz, Michael

Adaptive Optik und Sensorik im Strahlführungssystem von Laserbearbeitungsanlagen
1992, vergriffen, ISBN 3-519-06206-2

Mohr, Ursula

Geschwindigkeitsbestimmende Strahleigenschaften und Einkoppelmechanismen beim CO₂-Laserschneiden von Metallen
1993, 130 Seiten, ISBN 3-519-06207-0

Rudlaff, Thomas

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

Borik, Stefan

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

Paul, Rüdiger

Optimierung von HF-Gasentladungen für schnell längsgeströmte CO₂-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 CO₂-Lasern
1994, 158 Seiten, ISBN 3-519-06213-5

Shen, Jialin

Optimierung von Verfahren der Laseroberflächenbehandlung mit gleichzeitiger Pulverzufuhr
1994, 160 Seiten, ISBN 3-519-06214-3

Arnold, Johannes M.

Abtragen metallischer und keramischer Werkstoffe mit Excimerlasern
1994, 192 Seiten, ISBN 3-519-06215-1

Holzwarth, Achim

Ausbreitung und Dämpfung von Stoßwellen in Excimerlasern
1994, 153 Seiten, ISBN 3-519-06216-X

Dausinger, Friedrich

Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und Prozesseffektivität
1995, 143 Seiten, ISBN 3-519-06217-8

Meiners, Eckhard

Abtragende Bearbeitung von Keramiken und Metallen mit gepulstem Nd:YAG-Laser als zweistufiger Prozeß
1995, 120 Seiten, ISBN 3-519-06222-4

Beck, Markus

Modellierung des Lasertiefschweißens
1996, 160 Seiten, ISBN 3-519-06218-6

Breining, Klaus

Auslegung und Vermessung von Gasentladungsstrecken für CO₂-Hochleistungslaser
1996, 131 Seiten, ISBN 3-519-06219-4

Griebsch, Jürgen

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

Krepulat, Walter

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

Xiao, Min

Vergleichende Untersuchungen zum Schneiden dünner Bleche mit CO₂- und Nd:YAG-Lasern
1996, 118 Seiten, ISBN 3-519-06223-2

Glumann, Christiane

Verbesserte Prozeßsicherheit und Qualität durch Strahlkombination beim Laserschweißen
1996, 143 Seiten, ISBN 3-519-06224-0

Gross, Herbert

Propagation höhermodiger Laserstrahlung und deren Wechselwirkung mit optischen Systemen
1996, 191 Seiten, ISBN 3-519-06225-9

Rapp, Jürgen

Laserschweißgunn von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Leichtbau
1996, 202 Seiten, ISBN 3-519-06226-7

Wittig, Klaus

Theoretische Methoden und experimentelle Verfahren zur Charakterisierung von Hochleistungslaserstrahlung
1996, 198 Seiten, ISBN 3-519-06227-5

Grünenwald, Bernd

Verfahrensoptimierung und Schichtcharakterisierung beim einstufigen Cermet-Beschichten mittels CO₂-Hochleistungslaser
1996, 160 Seiten, ISBN 3-519-06229-1

Lee, Jae-Hoon

Laserverfahren zur strukturierten Metallisierung
1996, 154 Seiten, ISBN 3-519-06232-1

Albinus, Uwe N. W.

Metallisches Beschichten mittels PLD-Verfahren
1996, 144 Seiten, ISBN 3-519-06233-X

Wiedmaier, Matthias

Konstruktive und verfahrenstechnische Entwicklungen zur Komplettbearbeitung in Drehzentren mit integrierten Laserverfahren
1997, 129 Seiten, ISBN 3-519-06228-3

Bloehs, Wolfgang

Laserstrahlhärten mit angepassten Strahlformungssystemen
1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06230-5

Bea, Martin

Adaptive Optik für die Materialbearbeitung mit CO₂-Laserstrahlung
1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06231-3

Stöhr, Michael

Beeinflussung der Lichtemission bei mikrokanalgekühlten Laserdioden
1997, 147 Seiten, ISBN 3-519-06234-8

Plaß, Wilfried

Zerstörschwellen und Degradation von CO₂-Laseroptiken
1998, 158 Seiten, ISBN 3-519-06235-6

Schaller, Markus K. R.

Lasergestützte Abscheidung dünner Edelmetallschichten zum Heißgaskorrosionsschutz für Mo-lybdän
1998, 163 Seiten, ISBN 3-519-06236-4

Hack, Rüdiger

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

Krupka, René

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

Pfeiffer, Wolfgang

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

Volz, Robert

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

Bartelt-Berger, Lars

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

Müller-Hummel, Peter

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

Rohde, Hansjörg

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

Huonker, Martin

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

Callies, Gert

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

Schubert, Michael E.

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

Kern, Markus

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

Raiber, Armin

Grundlagen und Prozeßtechnik für das 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

Bahn Müller, Jochen

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

Schellhorn, Martin Carl Johannes

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

Angstenberger, Birgit

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

Bachhofer, Andreas

Schneiden und Schweißen von Aluminiumwerkstoffen mit Festkörperlaser für den Karoseriebau
2001, 194 Seiten, ISBN 3-89675-881-0

Breitschwerdt, Sven

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

Mochmann, Gunter

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

Herrmann, Andreas

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

Mästle, Rüdiger

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

Voß, Andreas

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

Müller, Matthias G.

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

Abeln, Tobias

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

Erhard, Steffen

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

Contag, Karsten

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

Krastel, Klaus

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

Staud, Jürgen

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

Schinz, Cornelius M.

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

Sebastian, Michael

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

Lücke, Bernd

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

Hohenberger, Bernd

Laserstrahlschweißen mit Nd:YAG-Doppelfokus-
technik – Steigerung von Prozeßsicherheit, Fle-
xibilität und verfügbarer Strahlleistung
2003, 128 Seiten, ISBN 3-8316-0223-9

Jasper, Knut

Neue Konzepte der Laserstrahlformung und
-führung für die Mikrotechnik
2003, 152 Seiten, ISBN 3-8316-0205-0

Heimerdinger, Christoph

Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen
für die Luftfahrt
2003, 112 Seiten, ISBN 3-8316-0256-5

Christoph Fleig

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

Joachim Radtke

Herstellung von Präzisionsdurchbrüchen in ke-
ramischen Werkstoffen mittels repetierender
Laserbearbeitung
2003, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0285-9

Michael Brandner

Steigerung der Prozesseffizienz beim Löten und
Kleben mit Hochleistungsdiodelnlasern
2003, 195 Seiten, ISBN 3-8316-0288-3

Reinhard Winkler

Porenbildung beim Laserstrahlschweißen von
Aluminium-Druckguss
2004, 153 Seiten, ISBN 3-8316-0313-8

Helmut Kindler

Optische und gerätetechnische Entwicklungen
zum Laserstrahlspritzen
2004, 117 Seiten, ISBN 3-8316-0315-4

Andreas Ruf

Modellierung des Perkussionsbohrens von Metal-
len mit kurz- und ultrakurzgepulsten Lasern
2004, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0372-3

Guido Hergenhan

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

Klaus Goth

Schweißen von Mischverbindungen aus Alumi-
numguß- und Knetlegierungen mit CO₂-Laser
unter besonderer Berücksichtigung der Nahtart
2004, 143 Seiten, ISBN 3-8316-0427-4

Armin Strauch

Effiziente Lösung des inversen Problems beim
Laserstrahlschweißen durch Simulation und
Experiment
2004, 169 Seiten, ISBN 3-8316-0425-8

Thomas Wawra

Verfahrensstrategien für Bohrungen hoher Präzi-
sion mittels Laserstrahlung
2004, 162 Seiten, ISBN 3-8316-0453-3

Michael Honer

Prozesssicherungsmaßnahmen beim Bohren
metallischer Werkstoffe mittels Laserstrahlung
2004, 113 Seiten, ISBN 3-8316-0441-x

Thomas Herzinger

Prozessüberwachung beim Laserbohren von
Turbinenschaufeln
2004, 143 Seiten, ISBN 3-8316-0443-6

Reiner Heigl

Herstellung von Randschichten auf Aluminium-
gusslegierungen mittels Laserstrahlung
2004, 173 Seiten, ISBN 3-8316-0460-6

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW ab 2005 erschienen im Herbert Utz Verlag, München

Thomas Fuhrich

Marangoni-effekt beim Laserstrahltaiefschweißen von Stahl

2005, 163 Seiten, ISBN 3-8316-0493-2

Daniel Müller

Pulsenergiestabilität bei regenerativen Kurzpuls-verstärkern im Scheibenlaserdesign

2005, 172 Seiten, ISBN 3-8316-0508-4

Jiancun Gao

Neodym-dotierte Quasi-Drei-Niveau-Scheiben-laser: Hohe Ausgangsleistung und Frequenzver-dopplung

2005, 148 Seiten, ISBN 3-8316-0521-1

Wolfgang Gref

Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen mit der Fokusmatrixtechnik

2005, 136 Seiten, ISBN 3-8316-0537-8

Michael Weikert

Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laser-pulsen

2005, 116 Seiten, ISBN 3-8316-0573-4

Julian Sigel

Lasergenerieren metallischer Bauteile mit variabel-em Laserstrahldurchmesser in modularen Ferti-gungssystemen

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

Andreas Ruß

Schweißen mit dem Scheibenlaser-Potentiale der guten Fokussierbarkeit

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

Gabriele Seibold

Absorption technischer Oberflächen in der La-sermaterialbearbeitung

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

Dirk Lindenau

Magnetisch beeinflusstes Laserstrahlschweißen

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

Jens Walter

Gesetzmäßigkeiten beim Lasergenerieren als Basis für die Prozesssteuerung und -regelung

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

Heiko Ridderbusch

Longitudinal angeregte passiv gütegeschaltete Laserzündkerze

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

Markus Leimser

Strömungsinduzierte Einflüsse auf die Nahteigenschaften beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen

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

Mikhail Larionov

Kontakterung und Charakterisierung von Kristal-len für Scheibenlaser

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

Jürgen Müller-Borhanian

Kamerabasierte In-Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen

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

Andreas Letsch

Charakterisierung allgemein astigmatischer La-serstrahlung mit der Methode der zweiten Mo-mente

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

Thomas Kübler

Modellierung und Simulation des Halbleiterschei-benlasers

2009, 152 Seiten, ISBN 978-3-8316-0918-5

Günter Ambrosy

Nutzung elektromagnetischer Volumenkräfte beim Laserstrahlschweißen

2009, 170 Seiten, ISBN 978-3-8316-0925-3

Agnes Ott

Oberflächenmodifikation von Aluminiumlegierun-gen mit Laserstrahlung: Prozessverständnis und Schichtcharakterisierung

2010, 226 Seiten, ISBN 978-3-8316-0959-8

Detlef Breiting

Gasphaseneinflüsse beim Abtragen und Bohren mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung

2010, 200 Seiten, ISBN 978-3-8316-0960-4

Dmitrij Walter

Online-Qualitätssicherung beim Bohren mittels ultrakurz gepulster Laserstrahlung

2010, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-0968-0

Jan-Philipp Weberpals

Nutzen und Grenzen guter Fokussierbarkeit beim Laserstrahlschweißen

2010, 154 Seiten, ISBN 978-3-8316-0995-6

Angelika Beyertt

Yb:KYW regenerativer Verstärker für ultrakurze Pulse

2010, 166 Seiten, ISBN 978-3-8316-4002-7

Christian Stolzenburg

Hochrepetierende Kurzpuls-Scheibenlaser im infraroten und grünen Spektralbereich
2011, 184 Seiten, ISBN 978-3-8316-4041-6

Svent-Simon Beyertt

Quantenfilm-Pumpen zur Leistungsskalierung von Halbleiter-Scheibenlasern
2011, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4051-5

Sonja Kittel

Verzugsarmes Laserstrahlschweißen an axial-symmetrischen Bauteilen
2011, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-4088-1

Andrey Andreev

Schweißen mit dem Scheibenlaser im Getriebekonstruktion – Prozessmerkmale und Anlagenkonzepte
2011, 140 Seiten, ISBN 978-3-8316-4103-1

Christian Föhl

Einsatz ultrakurz gepulster Laserstrahlung zum Präzisionsbohren von Metallen
2011, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-4120-8

Andreas Josef Birnesser

Prozessregelung beim Laserstrahlschweißen
2011, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4133-8

Christoph Neugebauer

Thermisch aktive optische Bauelemente für den resonatorinternen Einsatz beim Scheibenlaser
2012, 220 Seiten, ISBN 978-3-8316-4178-9

Andreas Dauner

Fluidmechanische Maßnahmen zur Reduzierung von Schmelzablagerungen beim Hochgeschwindigkeitslaserbohren
2012, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4194-9

Axel Heß

Vorteile und Herausforderungen beim Laserstrahlschweißen mit Strahlquellen höchster Fokussierbarkeit
2012, 164 Seiten, ISBN 978-3-8316-4198-7

Christian Gehrke

Überwachung der Struktureigenschaften beim Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laserpuls
2013, 164 Seiten, ISBN 978-3-8316-4271-7

David Schindhelm

In-Prozess Qualitätssicherung für das Laserstrahlschneiden von Metallen
2013, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4345-5

Moritz Vogel

Speciality Fibers for High Brightness Laser Beam Delivery
2014, 187 Seiten, ISBN 978-3-8316-4382-0

Andreas Michalowski

Untersuchungen zur Mikrobearbeitung von Stahl mit ultrakurzen Laserpuls
2014, 176 Seiten, ISBN 978-3-8316-4424-7

Georg Stöppler

Untersuchung eines OPOs im mittleren Infrarot im Hinblick auf Anwendungen für minimalinvasive Chirurgie
2015, 144 Seiten, ISBN 978-3-8316-4437-7

Patrick Mucha

Qualitäts- und produktivitätsbeeinflussende Mechanismen beim Laserschneiden von CF und CFK
2015, 120 Seiten, ISBN 978-3-8316-4516-9

Claus-Dieter Reiniger

Fluidmechanische Effekte beim Remote-Laserstrahlschweißen von Blechen mit Fügeseit
2015, 188 Seiten, ISBN 978-3-8316-4528-2

