

Reduzierung von Nahtimperfectionen beim Laserstrahlhartlöten

Der Fakultät Maschinenwesen

der

Technischen Universität Dresden

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegte Dissertation

Dipl.-Ing. Marco Heitmanek

geboren am 14.03.1985 in Dresden

Tag der Einreichung: 11.11.2014

Tag der Verteidigung: 02.06.2015

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. E. Beyer

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. U. Füssel

Kurzfassung der Arbeit

Das Laserstrahlhartlöten ermöglicht die Herstellung von Fügeverbindungen mit exzellenten Nahtqualitäten. Daher hat es sich bei anspruchsvollen Anwendungen, wie zweiteiligen Heckklappen und der Verbindung von Dach und Seitenwandrahmen (Dachnullfuge) etabliert. Um die hohen Qualitätsanforderungen durch das Laserstrahlhartlöten realisieren zu können, sind allerdings anspruchsvolle konstruktive Randbedingungen zu erfüllen, die über die Fertigungskette nicht immer vollständig sicherzustellen sind. Das Ergebnis solcher Fertigungs- und Materialschwankungen äußert sich dann oft als Nahtimperfectionen, die während des Laserlötprozesses entstehen. Diese verursachen vor allem mit steigenden Prozessgeschwindigkeiten einen erhöhten und kostenintensiven Nacharbeitsaufwand und sollten daher vermindert bzw. gänzlich vermieden werden. Das Ziel ist somit den Laserlötprozess so robust wie möglich auszulegen, um auf diese Fertigungsschwankungen ohne Einschränkungen in der Nahtqualität reagieren zu können.

Im ersten Teil dieser Arbeit werden wesentliche Einflussfaktoren auf die Ausbildung der Nahtqualität am schrägen Bördelstoß untersucht und die systemtechnischen Grenzen mit einem statischen und runden Laserspot aufgezeigt. Weiterhin werden die resultierenden Nahtqualitäten durch das Laserstrahllöten mit gescanntem Laserstrahl in Vorschubrichtung untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Nahtqualität mit diesem innovativen Ansatz bezüglich des Anbindungsquerschnittes und der Oberflächenqualität weiter steigern lassen. Dies lässt sich ebenfalls für höhere Prozessgeschwindigkeiten realisieren.

Abschließend werden neuartige Möglichkeiten der Prozessüberwachung, sowie erste Ansätze zur Prozessregelung des Laserstrahlhartlötens am schrägen Bördelstoß vorgestellt. Die erzielten Resultate zeigen, dass sich der Laserstrahlhartlötprozess durch die Regelung der Laserleistung in Verbindung mit evaluierten Temperaturfeldern im Bereich der Prozesszone online kontrollieren und sich dadurch die Prozessstabilität merklich steigern lässt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Forschung und der Technik	4
2.1	Laserfügeverfahren im Karosseriebau	4
2.2	Löten	6
2.2.1	Grundlagen	6
2.2.2	Lötvorgang und Mechanismen	9
2.3	Laserstrahllöten	16
2.3.1	Besonderheiten Laserstrahllöten	16
2.3.2	Strahlquellen/-führungen für Laserhartlötprozesse	19
2.3.3	Anlagentechnik zum Löten	22
2.4	Lötverfahren im Großserienumfeld des Karosseriebaus	25
2.5	Qualitätsanforderungen bzw. Kriterien an die Fügetechnik	29
2.5.1	Allgemeine Anforderungen nach Normen und Prüfvorschriften	29
2.5.2	Poren	30
2.5.3	Risse bzw. Lötbrüchigkeit	32
2.5.4	Oberflächenfehler	35
2.6	Werkstoffeinfluss	36
2.6.1	Grundwerkstoff	36
2.6.2	Beschichtung	36
2.6.3	Zusatzwerkstoff	38
3	Konkretisierung der Aufgabenstellung	40
4	Untersuchungen zur Nahtqualität sowie zur Entstehung von Nahtimperfectionen	41
4.1	Einflussfaktoren beim Laserstrahlhartlöten	41
4.2	Versuchsaufbau mit Standardequipment	42
4.2.1	Laserstrahlquelle	42
4.2.2	Bearbeitungsoptik	43
4.2.3	Roboter	47
4.2.4	Drahtzuführgerät	48
4.2.5	Fügegeometrie	50
4.2.6	Spanntechnik	51
4.2.7	Prüfvorgaben und -methoden	51
4.3	Analyse Energieeintrag	57
4.3.1	Einfluss Energieeintrag auf Nahtqualität	57
4.3.2	Winkelstellungen	79

4.4	Analyse Bauteil-/Spanntechnikeinflüsse	88
4.4.1	Variation Lateralversatz	88
4.4.2	Variation Biegeradius	92
4.4.3	Spaltvariation	96
4.5	Rissanalyse	97
4.6	Synopsis zur Lötnahtqualität und zur Entstehung von Nahtimperfectionen ...	99
5	Versuchsdurchführung und –ergebnisse zum Laserstrahlscanlöten	101
5.1	Laserlöten mit gescanntem Laserstrahl	101
5.2	Versuchsaufbau mit Scanoptik	102
5.2.1	Anlagentechnik	102
5.2.2	Scanoptik „LASSY“	103
5.2.3	Laserleistungsregelung (lasertronic® LompocPro)	107
5.3	Analyse Strahleinwirkung	109
5.3.1	Vorbetrachtungen	109
5.3.2	Evaluierung der Referenzparameter	110
5.3.3	Auffälligkeiten bei der Strahlauslenkung	114
5.3.4	Nahtqualität in Abhängigkeit der Strahlauslenkung	117
5.3.5	Nahtqualität in Abhängigkeit der „Eintauchposition“ des Drahtes (Offset)	121
5.3.6	Nahtqualität in Abhängigkeit der Scanfrequenz	122
5.3.7	Nahtqualität in Abhängigkeit von der Modulation des Energieeintrages	126
5.3.8	Nahtqualität in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit	128
5.4	Prozessüberwachung und -regelung beim Laserstrahlscanlöten	132
5.4.1	Prozessüberwachung (durch gezielte Datenerfassung)	132
5.4.2	Prozessregelung bei Geschwindigkeitsvariation	138
5.5	Synopsis zum Laserstrahlscanlöten	144
6	Zusammenfassung	147
	Danksagung	150
	Literaturverzeichnis	151

Formelzeichen und Abkürzungen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
α	$^{\circ}$	Lateralwinkel
α_{FL}	$^{\circ}$	Flankenwinkel (Benetzungswinkel zum Grundwerkstoff)
β	$^{\circ}$	Schleppwinkel
γ	$^{\circ}$	Verdrehwinkel
γ_{LM}	kg/s^2	Oberflächenspannung Lotwerkstoff zu Metall (Grundwerkstoff)
γ_{LU}	kg/s^2	Oberflächenspannung Lotwerkstoff zu Umgebung
γ_{MU}	kg/s^2	Oberflächenspannung Metall (Grundwerkstoff) zu Umgebung
δ	mm	Lateralversatz
θ	mrad	Divergenzwinkel
λ	μm	Wellenlänge
τ	$^{\circ}$	Drahtzuführwinkel
φ	$^{\circ}$	Benetzungswinkel
ω_0	mm	Strahlradius im Fokus
a	m/s^2	Beschleunigung
A	%	Absorptionsgrad
Ag	-	Silber
A_{ges}	-	Auslenkung des Scanspiegels (gesamt)
A_{GW}	-	Atome des Grundwerkstoffs
A_L	-	Atome des Lotwerkstoffs
Al	-	Aluminium
A_O	-	Nahtoberfläche
Au	-	Gold
b	mm	Spalt zwischen Bauteilen
Bi	-	Bismut
Cd	-	Cadmium
Co	-	Cobalt
CO	-	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	-	Kohlenstoffdioxid
Cr	-	Chrom
CT	-	Computer-Tomographie
Cu	-	Kupfer
D	mm	Diffusionszone bzw. Legierungszone (gesamt)
$D_{Cu, Fe}$	cm^2/s	Diffusionskoeffizient von Kupfer in Eisen
d_f	mm	Strahldurchmesser im Fokus
$D_{Fe, Cu}$	cm^2/s	Diffusionskoeffizient von Eisen in Kupfer
D_{GW}	mm	Diffusionszone im Grundwerkstoff
D_K	cm^2/s	Diffusionskoeffizient an den Korngrenzen im System Eisen-Kupfer
D_L	mm	Diffusionszone im Lotwerkstoff
D_x	cm^2/s	Diffusionskoeffizient
EDX	-	Energiedispersive Röntgenmikroanalyse
f	Hz	Scanfrequenz (des Scanspiegels)

f_B	Hz	Benetzungsfrequenz des Schmelzbades
Fe	-	Eisen
G	-	Phasengrenze zwischen Grundwerkstoff und erstarrtem Lotwerkstoff bei einer Hartlötverbindung
Ga	-	Gallium
Ge	-	Germanium
G_i	mm	Fugenmaß (Abstand zwischen Außenkonturen in Fuge und Unterkante Dachblech)
GW	-	Grundwerkstoff
h_0	mm	Löhtnahteneinfall, -überhöhung
Hf	-	Hafnium
HS	-	High-Speed
HV	-	Vickershärte
I	A	Elektrischer Strom
In	-	Indium
IWS	-	Institut für Werkstoff- und Strahltechnik (Fraunhofer IWS)
LLK	-	Lichtleitkabel
LM	-	Lichtmikroskop
l_s	mm	Stickout (Länge Drahtüberstand)
LSC	-	Laser Scanner Control
Mg	-	Magnesium
MIG	-	Metall-Inert-Gas
MK	-	Mischkristall
Mo	-	Molybdän
MW	-	Mittelwert
Nb	-	Niob
Ni	-	Nickel
n_P	-	Porenanzahl
P	-	Phosphor
Pb	-	Blei
Pd	-	Palladium
P_L	W	Laserleistung
PP	-	Programmierter Punkt
Pt	-	Platin
PVC	-	Polyvinylchlorid
P_{Vor}	W	Vorwärmleistung durch zusätzlichen Vorwärmstrom
r	mm	Radius
r_a	mm	Außenradius am Dachblech
REM	-	Raster-Elektronen-Mikroskop
r_i	mm	Innenradius am Dachblech
r_K	mm	Konturradius der Nahtoberfläche
s	mm	Weg
Si	-	Silizium
Sn	-	Zinn
s_{NL}	mm	Minimale Verbindungsbreite im Schliff (auch Lötnahtdicke)
SPP	mm*mrad	Strahlparameterprodukt
Sr	-	Strontium

SWR	-	Seitenwandrahmen
T	mm	Nahttiefe bezüglich horizontaler Außenkante des Dachbleches
Ta	-	Tantal
T _A	°C	Arbeitstemperatur beim Löten
t _B	s	Lötzeit
t _{bi}	mm	Blechdicke
t _C	s	Abkühlzeit
TCP	-	Tool Center Point (Bearbeitungspunkt der Optik)
TE _{Lompoc}	-	Temperatureinheiten (Lompoc-System)
t _H	s	Aufheizzeit
Ti	-	Titan
t _i	s	Zeit der Highspeed-Aufnahme
T _{max}	TE	maximales Temperatursignal (Lompoc) bzw. Spitzentemperatur
t _{min}	mm	Minimale Blechdicke
t _r	mm	Restwandstärke des Grundwerkstoffs nach Schleifbearbeitung
TPS	-	Trans Puls Synergic
U	V	Elektrische Spannung
V	-	Vanadium
v _{Dr}	m/min	Vorschubgeschwindigkeit Draht
v _R	m/min	Vorschubgeschwindigkeit Roboter
W	-	Wolfram
W _A	J/m ²	Adhäsionsenergie
WEZ	-	Wärmeeinflusszone
WIG	-	Wolfram-Inert-Gas
Z	-	Feuerverzinkung
ZE	-	Elektrolytische Verzinkung
Zn	-	Zink
z _i	mm	Anbindungslängen bzw. Benetzungsbreite
Zr	-	Zirconium
z _R	mm	Rayleighlänge

1 Einleitung

Die Erfindung des Lasers durch Maiman und Townes in den 1960er Jahren hat unsere heutige Welt maßgeblich verändert. Laseranwendungen in der Medizin, der Informations- und Kommunikationstechnik, der Unterhaltungselektronik und in vielen weiteren Bereichen gehören mittlerweile ganz selbstverständlich zum alltäglichen Leben. Einen ganz hervorragenden Stellenwert nimmt das Werkzeug „Laser“ mit seinen außergewöhnlichen Eigenschaften in technischen Anwendungen, wie beispielsweise der Lasermaterialbearbeitung ein. Ein besonders dynamischer Anwendungsbereich der Lasertechnik umfasst dabei die Gebiete des Laserschneidens, -schweißens und -lötens, sowie der Oberflächenbehandlung. Aufgrund ihrer Vielseitigkeit und der hohen Qualitätsstandards sind die Laserverfahren so auch aus dem Automobilbau und da insbesondere im modernen Karosseriebau nicht mehr weg zu denken.

Mit dem Leitbild des 21. Jahrhunderts „Nachhaltigkeit“ [Ste12] wurden die Forderungen nach CO₂-Einsparungen durch die neuen gesetzlichen Rahmenbedingungen weiter verschärft. Ein konsequenter Karosserieleichtbau leistet dazu einen wichtigen Beitrag. Dieser nachhaltige und ressourcenschonende Karosserieleichtbau kann dabei nur durch eine ganzheitliche Betrachtungsweise von Werkstoffkonzepten und Bauweisen sowie zugehörigen Herstellungsverfahren erfolgen. [Goed07] Die verschiedenen Laserverfahren können hierfür durch Technologieneu- und weiterentwicklungen gezielt genutzt werden [Jahn12]. Dabei werden die derzeit eingesetzten Stahlgüten in ihrer Blechdicke reduziert oder gänzlich substituiert und mittels geeignetem Fügeverfahren verbunden. Der Anteil an höher- und höchstfesten Stählen wird stetig erhöht, um bei gleichzeitig geringen Blechdicken gleichbleibende Festigkeitsanforderungen bei reduziertem Gewicht sicherzustellen.

Im Außenhautbereich des Automobilbaus kommen allerdings weiterhin Tiefziehstähle mit sehr hohem Umformvermögen zum Einsatz, um die immer markanter werdenden Außenkonturen der Fahrzeuge herstellen zu können. Die stetige Reduzierung der Blechstärke erhöht in diesen Bereichen massiv die Anforderungen an die Laserfügeverfahren, da sich die eingebrachte Energie zur Ausprägung der Fügeverbindung auf ein immer kleineres Volumen konzentriert. Zusätzlich ist in einer Großserienfertigung unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten eine sehr hohe Stückzahlausbringung aus den Anlagen erwünscht, was wiederum kurze Prozesszeiten und hohe Prozessgeschwindigkeiten erfordert.

Diese Herausforderungen betreffen besonders das im Außenhautbereich eingesetzte Verfahren des Laserstrahlhartlötens. Die Vorreiterrolle bei diesem Verfahren nahm der VW-Konzern mit der Einführung dieser Technologie beim Fügen der zweiteiligen Heckklappe beim VW Bora und durch das Verbinden der C-Säule mit dem Kotflügel beim Audi TT ein [Hoff04a]. Heute sind Laserlötnähte aufgrund ihrer sehr hohen Oberflächenqualität in fast

allen Automobilen zu finden. Bei der Audi AG und im VW-Konzern wird mittels des Laserstrahlhartlötens die Verbindung zwischen Dach und Seitenwandrahmen im direkten Sichtbereich des Kunden hergestellt (siehe Abbildung 1.1).



Abbildung 1.1 Laserstrahlgelötete Dachnaht beim aktuellen Audi A3 [Grau12]

„Im direkten Sichtbereich des Kunden“ bedeutet allerdings auch, dass die höchsten Qualitäts- und Anmutungsanforderungen (Class A) im gesamten Karosseriebau an diese Fügeverbindung gestellt werden. Das Laserstrahlhartlöten stellt somit eine Schlüsseltechnologie, welche zusätzlich große Designfreiheiten und hohe Festigkeiten der Fügeverbindung ermöglicht, dar.

Beim Laserstrahlhartlöten können vor allem bei höheren Prozessgeschwindigkeiten Nahtfehler wie bspw. Poren entstehen, die einen hohen Nacharbeitsaufwand erfordern und damit die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens senken. Die Entstehungsmechanismen sind sehr komplex und bis heute nicht vollständig geklärt. So wird die Nahtqualität dabei nicht nur durch die Bauteilgeometrie und die Einflussgrößen aus dem Laserstrahlhartlötprozess selbst, sondern auch maßgeblich durch die Material- und Oberflächenbeschaffenheit der zu fügenden Bauteile bestimmt. Zusätzlich treten häufiger Schwankungen der Verbindungsmaße auf, welchen mit verschiedenen systemtechnischen Prozessansätzen (wie bspw. Zweistrahltechnologien) reduziert werden sollen. Diese Ansätze konnten allerdings bisher noch nicht in der Großserienfertigung mit hohen Stückzahlen und mit hohen Prozessgeschwindigkeiten umgesetzt werden.

In dieser Arbeit sollen daher die wichtigsten Einflussgrößen hinsichtlich Nahtimperfectionen unter Beachtung der Class-A-Oberflächenanforderungen am schrägen Bördelstoß der Dachnullfuge identifiziert werden. Darauf aufbauend wird mittels eines neuen innovativen „Scanansatzes“ für das Laserstrahlhartlöten die Einflussnahme auf die Prozessbedingungen hinsichtlich eines verbesserten Drahtabschmelzverhaltens untersucht. Die erforderliche Prozessentwicklung zu dieser neuen Technologie ist daher ebenfalls Gegenstand dieser Arbeit. Weiterhin sollen Regelgrößen für das Laserstrahlhartlöten am Bördelstoß identifiziert und potenzielle Anwendungsfälle aufgezeigt werden.

Zielstellung ist es, durch seriennahe, experimentelle Untersuchungen die Entstehungsmechanismen für Nahtimperfectionen zu identifizieren und daraus Prozessverbesserungen abzuleiten und zu entwickeln, um die Prozessstabilität und die Nahtqualität zu steigern sowie damit Nacharbeitsaufwände zu reduzieren bzw. gänzlich zu vermeiden.

2 Stand der Forschung und der Technik

2.1 Laserfügeverfahren im Karosseriebau

Moderne Fügetechnologien sind der Schlüssel für effiziente und umweltfreundliche Produktionsprozesse [Heit12]. Besonders im Karosseriebau bieten Laserverfahren durch Ihre schnellen Bearbeitungsgeschwindigkeiten, hohe Automatisierbarkeit sowie einseitige Zugänglichkeit ein großes Maß an Flexibilität und sind Grundlage für effiziente, ressourcenschonende Karosseriekonzepte. Zusätzlich lassen sich unter bestimmten Voraussetzungen (bspw. bei Einhaltung der Bauteiltoleranzen) sehr hohe Nahtgüten erzielen. In den letzten Jahren haben sich dadurch im Karosseriebau der AUDI AG neben Tür- und Strukturapplikationen vor allem im Bereich der Außenhautanwendungen zwei Technologien durchgesetzt. Bei Aluminiumapplikationen kommt das Laserstrahlschweißen mit Aluminiumzusatzdraht und bei Stahlanwendungen das Laserstrahlhartlöten mit Kupferzusatzwerkstoffen zum Einsatz. Beispiele für derartige Verbindungen sind zweiteilige Heckklappen und die Verbindung zwischen Dach und Seitenwandrahmen, die sogenannte Dachnullfuge (Abbildung 2.1).

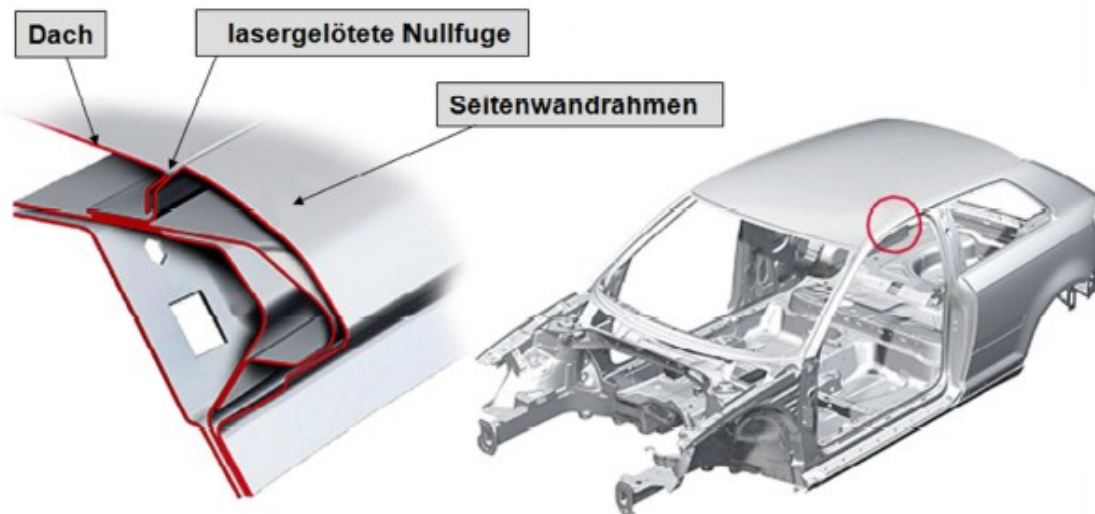


Abbildung 2.1 Dachnullfuge des AUDI A3 [Koen03]

Mittlerweile ist die Dachnullfuge sowohl für Aluminium als auch für Stahlwerkstoffe eine Standardapplikation. In dieser Arbeit werden die Aluminiumanwendungen aber nicht weiter diskutiert. Die lasergelötete Dachnullfuge mit Stahlblechen wurde von der Audi AG erstmals beim Audi A3 (2. Generation, seit 2003) erfolgreich in der Großserie umgesetzt und später bei nahezu allen Fahrzeugen in Stahlbauweise eingeführt. Sie stellt gegenüber den meisten Herstellern außerhalb des Volkswagen-Konzerns ein Alleinstellungsmerkmal dar und weist im

Vergleich zu konventionellen Bauweisen mit sogenannten Dachabdeckleisten (siehe Abbildung 2.2) Vorteile bezüglich Design und Korrosion auf.

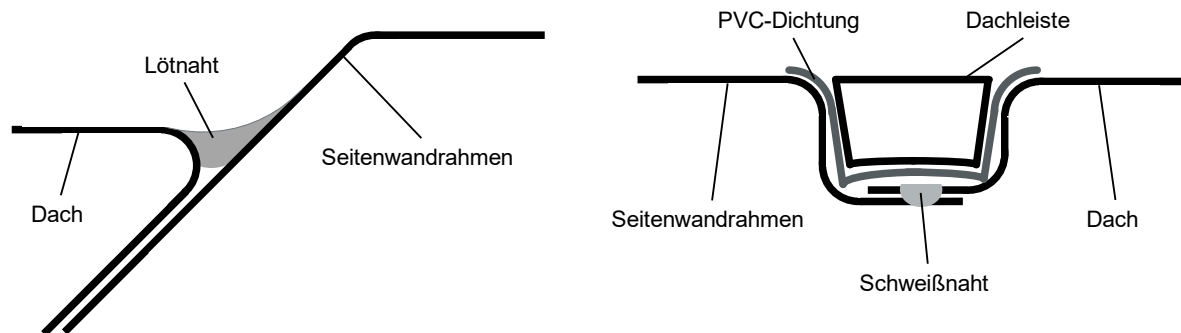


Abbildung 2.2 Vergleich Dachnullfuge (Laserlöten, links) mit konventioneller Bauweise (rechts)

So erfolgt die konventionelle Verbindung von Dach und Seitenwandrahmen am Überlappstoß durch Widerstandspunktschweißen oder andere Schweißverfahren (bspw. Laserstrahlschweißen). Um die Anforderungen an das Design bzw. die Optik zu erfüllen, muss die Verbindung allerdings anschließend mit einer Dachleiste abgedeckt sowie mit einer PVC-Abdichtung und eventueller Wachsversiegelung aufwendig gegen Korrosion geschützt werden. Erhebliche Kosten entstehen bei dieser Variante im Premiumsegment durch die Lackierung der Abdeckleiste. Die Herstellung der Dachnullfuge mittels Laserstrahllöten (vgl. Abschnitt 2.3) erlaubt hingegen die direkte Verbindung der beiden Außenhautbleche, wodurch es zu einer Vereinheitlichung von Funktion (Festigkeit, Korrosionsbeständigkeit) und Design (Anmutung) in einer Verbindung kommt. Durch die 45°-Schräge können die Bauteiltoleranzen (vor allem Breitenschwankungen des Dachbauteils) mittels Gleitbewegung des Daches auf dem bereits fixierten Seitenwandrahmen der Rohkarosse ausgeglichen werden und es entsteht eine nahezu spaltfreie, linienförmige Anlage zwischen den beiden Fügepartnern. Des Weiteren besteht durch die direkte Laserlötverbindung (metallisch) ein sehr guter Korrosionsschutz, sofern keinerlei äußere Nahtfehler vorhanden sind und die Naht vor dem Lackiervorgang gereinigt wird. Dies stellt allerdings die spezielle Problematik dieser Verbindung dar, denn die Verbindung Dach - Seitenwandrahmen ist nicht nur der letzte Arbeitsschritt im Aufbau der Karosserie, sondern sie liegt auch im direkten Sichtbereich des Kunden und stellt damit die höchsten optischen Anforderungen an eine Fügeverbindung. Daher sind Nahtimperfectionen jeglicher Art (vgl. Abschnitt 2.5) zu vermeiden und aufwendige Nacharbeitslösungen zu verhindern.

Nachfolgend sollen die notwendigen Prozessgrundlagen eingehend erläutert werden, um die Besonderheiten beim Löten der Dachnullfuge mittels Laserstrahl an verzinkten Stahlblechen herauszuarbeiten.

2.2 Löten

2.2.1 Grundlagen

Durch den Begriff *Löten* ist nach [DIN ISO 857-2] ein thermisches Verfahren zum stoffschlüssigen Fügen und Beschichten von Werkstoffen definiert. Dabei entsteht eine flüssige Phase durch Schmelzen eines Lotes (Schmelzlöten) oder durch Diffusion an den Grenzflächen (Diffusionslöten) [Dorn07]. Die Solidustemperatur (Schmelztemperatur) der Grundwerkstoffe wird im Gegensatz zum Schweißen nicht erreicht, wodurch eine Fest-Flüssig-Grenzflächenreaktion beim Löten erfolgt [Kreu97].

Als *Lot* wird ein zum Löten geeigneter metallischer Zusatzwerkstoff oder eine geeignete metallische Legierung bezeichnet. Der Schmelzbereich des Lotes ist demnach definiert als Temperaturbereich vom Beginn des Schmelzens (Solidustemperatur) bis zur vollständigen Verflüssigung (Liquidustemperatur). Als Arbeitstemperatur wird dagegen beim Schmelzlöten die niedrigste Oberflächentemperatur der Lötstelle, bei der das Lot benetzt oder beim Diffusionslöten die Temperatur, bei der durch Grenzflächenreaktion die flüssige Phase entsteht, gekennzeichnet. Diese Arbeitstemperatur liegt dabei stets höher als die Solidustemperatur des Lotes. Gegenüber der Liquidustemperatur des Lotes kann die Arbeitstemperatur sich sowohl ober- als auch unterhalb befinden, sowie mit dieser zusammenfallen [Dorn07]. Der Lotwerkstoff ist passend zu den Grundwerkstoffen und entsprechend der Fügeanforderung bzw. Belastung im späteren Einsatzbereich auszuwählen. Die Zusatzmaterialien können dabei der Fügezone in Form von Drähten, Stäben, Bändern, Stangen, Pulvern, Pasten oder Formteilen zugeführt werden. [Fahr09]

Grundvoraussetzung für die Erfüllung der gestellten Anforderungen an die Lötverbindung und somit auch für eine gute Nahtqualität ist nach [DIN 8514] ein Sicherstellen der Lötbarkeit. Diese definiert sich über die Löteignung, Lötbarkeit und Lötbarkeit (siehe Abbildung 2.3). [Kreu97]

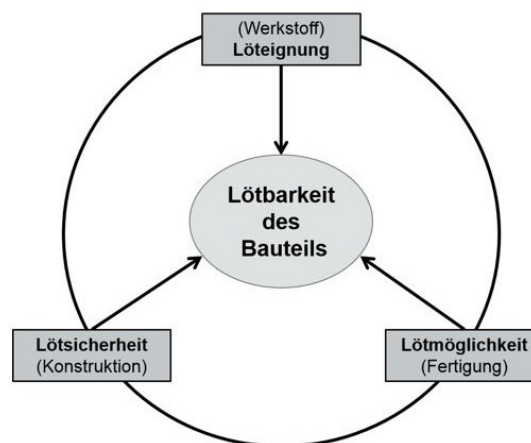


Abbildung 2.3 Definition Lötbarkeit nach [DIN 8514]

Die Löt eignung beschreibt nach [DIN 8514] die Werkstoffeigenschaft, die von der Fertigung und in geringem Maße von der Konstruktion mitbestimmt wird. Die Lötmöglichkeit wiederum ist die Fertigungseigenschaft, welche vorwiegend von der Konstruktion und weniger vom Werkstoff bestimmt wird. Abschließend definiert die Lötsicherheit die Konstruktionseigenschaft, die gleichermaßen vom Werkstoff und von der Fertigung bestimmt wird. Letztlich kann die Lötbarkeit eines Bauteils oder einer Baugruppe ausschließlich unter Beachtung aller Faktoren sichergestellt werden.

Das Fügen mittels Löten weist unterschiedlich stark ausgeprägte Vorteile in Abhängigkeit von der Legierungszusammensetzung des Lotes und der damit verbundenen Einsatztemperatur gegenüber anderen Fügeverfahren auf (siehe Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1 Vorteile des Fügeverfahrens Löten [Fahr09], [Kreu97], [Brau03]

Allgemeine Vorteile	Vorteile gegenüber anderen thermischen Fügeverfahren (Schweißen)	Vorteile gegenüber anderen nicht thermischen Fügeverfahren (Kleben)
<ul style="list-style-type: none"> • Lötstelle muss nicht direkt zugänglich sein • elektrische Leitfähigkeit der Verbindung • dichte Naht • sehr glatte Fügenahtoberfläche 	<ul style="list-style-type: none"> • geringere thermische Beeinflussungen der Grundwerkstoffe • geringer Verzug der Bauteile • die Möglichkeit verschiedenartige, auch nicht metallische Werkstoffe (Keramik) miteinander zu verbinden 	<ul style="list-style-type: none"> • relativ hohe Festigkeit • elektrische Leitfähigkeit der Verbindung • dauerhaft dichte Nähte herstellbar • thermische Beständigkeit

Die am meisten verbreitete Einteilung der Lötverfahren ist die Einteilung nach der Liquidustemperatur des Zusatzwerkstoffes in Weich- und Hartlötten. Beim Weichlöten liegen die Liquidustemperaturen der Lote unterhalb von 450°C, beim Hartlöten hingegen oberhalb von 450°C. Früher fand zusätzlich noch das Hochtemperaturlöten im deutschen Sprachgebrauch Verwendung [DIN 8505]. Das Hochtemperaturlöten bezeichnete den Sonderfall des Lötens bei Temperaturen oberhalb von 900°C im Vakuum oder unter Schutzgas. [Dorn07] Heute wird diese Bezeichnung allerdings nicht mehr verwendet.

In [Tuer04] wird die vorher beschriebene Einteilung zumindest für einige Werkstoffkombinationen in Frage gestellt, sowie darauf hingewiesen, dass eine Einteilung nach der homologen Temperatur ($0,4 \cdot \text{Schmelztemperatur des Lotes}$) sinnvoller wäre. Demnach ist bekannt, dass alle mechanischen Eigenschaften der Metalle bis zu einer Kelvintemperatur von 40% ihrer Schmelztemperatur relativ temperaturunabhängig sind. Wohingegen oberhalb dieser kritischen Rekristallisationstemperatur die Eigenschaften des Werkstoffes sehr stark von der Temperatur abhängen. Ausgehend von dieser Definition kann eine genauere werkstoffspezifische Einteilung in Weich-, Hart- und Übersoliduslötten vorgenommen werden (Abbildung 2.4).

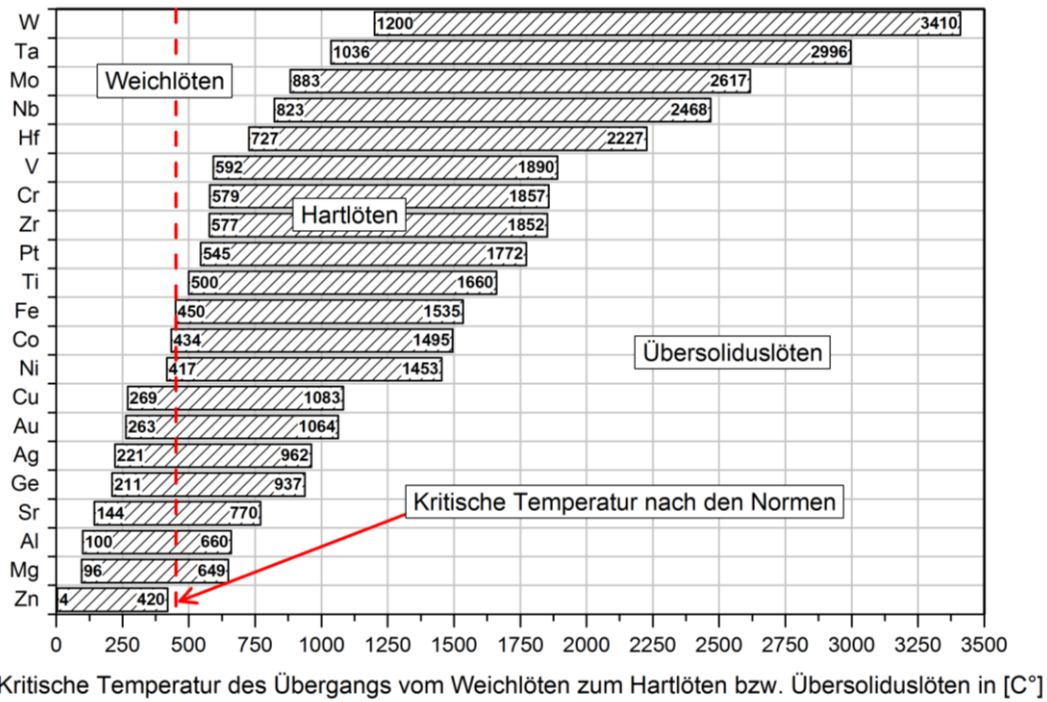


Abbildung 2.4 Weitere Einteilung in Weichlöten, Hartlöten und Übersoliduslöten [nach Wittke, zitiert in Tuer04]

Weiterhin können die Lötverfahren nach dem Energieträger, der Lötstellenform, der Lotzuführung und der Fertigungsart eingeteilt werden (siehe Tabelle 2.2). Das in dieser Arbeit verwendete Fügeverfahren wird demnach in der weiteren Arbeit als Laserstrahllöten bzw. Laserstrahlhartlöten bezeichnet (siehe Kapitel 2.3). Die zugehörigen Beispiele zu den Einteilungen sind für diese Arbeit nicht relevant und daher den angegebenen Quellen [Dorn07, Kreu97] zu entnehmen.

Tabelle 2.2 Weitere Einteilungsmöglichkeiten des Lötens [Dorn07]

nach Energieträgern (Wärmequellen) - Löten durch:	nach Lötatmosphäre - Löten mit	nach Art der Lötstelle - in	nach Art der Lotzuführung - in	nach Art der Fertigung - in
<ul style="list-style-type: none"> - festen Körper - Flüssigkeit - Gas - Gasentladung - Strahl - Ofen - elektrischen Strom 	<ul style="list-style-type: none"> - Flussmittel - reduzierendem Schutzgas - inertem bzw. reaktionsträgem Schutzgas - Vakuum 	<ul style="list-style-type: none"> - Auftragslöten - Verbindungslöten 	<ul style="list-style-type: none"> - Löten mit angesetztem Lot - Löten mit an- oder eingelegtem Lot - Tauchlöten - Wiederaufschmelz- (Reflow-) Löten 	<ul style="list-style-type: none"> - Handlöten - teilmechanisiertes Löten - vollmechanisiertes Löten - automatisches Löten

2.2.2 Lötvorgang und Mechanismen

Grundsätzlich werden beim Löten die Fügebereiche der zu verbindenden Werkstoffe durch das Lot benetzt und die Verbindungsbildung erfolgt durch Diffusionsvorgänge. Die entstehende Verbindung weist metallischen Charakter auf und ist irreversibel (nicht lösbar). [Dorn07, Kreu97]

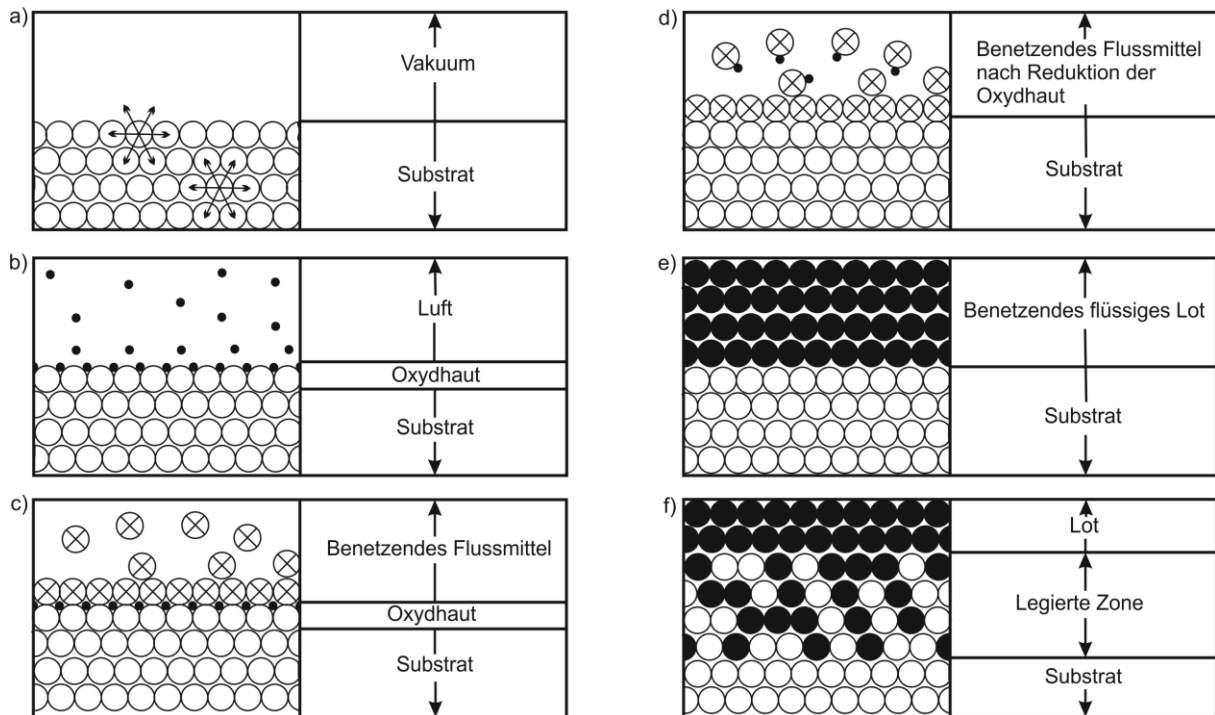


Abbildung 2.5 Vorgänge beim Löten (schematisch nach Fasching) [Dorn07]

Die Abbildung 2.5 zeigt schematisch das Prinzip des Lötvorganges. Unter Vakuum weisen die an der Metalloberfläche liegende Atome ungesättigte Bindungskräfte auf (siehe Teilbild a)). Wird die Metalloberfläche hingegen atmosphärischer Luft ausgesetzt, so können sich infolge der ungesättigten Bindungskräfte Gasmoleküle, insbesondere Sauerstoff, an der Oberfläche anlagern b). Die adsorbierenden Sauerstoffmoleküle reagieren mit den Atomen an der Metalloberfläche und bilden mit diesen eine Oxidhaut. Durch die Absättigung der Bindungskräfte geht die Aktivität der Oberfläche allerdings verloren und die gebildete Oxidhaut verhindert beim Löten den erforderlichen Kontakt zwischen schmelzflüssigem Lot und festem Grundwerkstoff. Um diese Schicht zu entfernen, werden Medien (wie bspw. Flussmittel) eingesetzt c), welche die Oxide benetzen und chemisch durch Reduktion beseitigen, sowie deren Neubildung verhindern d). In ähnlicher Weise können auch speziell verwendete Schutzgase wirken. Wird das flüssige Lot auf eine derartig vorbereitete Metalloberfläche aufgebracht, kann es diese benetzen und gleichzeitig das noch vorhandene Flussmittel verdrängen e). Aufgrund der Absättigung der freien atomaren Bindungskräfte entsteht eine Bindung primär basierend auf Adhäsion. Infolge der thermischen Beweglichkeit

kommt es anschließend bei ausreichend hoher Temperatur zu atomaren Platzwechselfvorgängen (Diffusion) zwischen Lot und Grundwerkstoff, d.h. zur Legierungsbildung in der Grenzschicht, was eine Erhöhung der Haftkräfte zur Folge hat f). Bei der nachfolgenden Abkühlung erstarrt das Lot und die Kohäsion (Bindungskräfte zwischen den Atomen innerhalb des Werkstoffes) nimmt zu. Die resultierende Festigkeit der Lötverbindung wird sowohl von der erreichten Adhäsion als auch Kohäsion der Werkstoffe bestimmt. [Fahr09]

Der Lötvorgang basiert somit auf physikalischen Wechselwirkungen durch Adhäsion, chemischen Reaktionen durch Diffusion und/oder Bildung neuer Phasen, sowie mechanischen Verklammerungen in submikroskopischen Bereichen, bspw. infolge inhärenter Aufrauhung [Kreu97]. Das Löten stellt daher einen komplexen physikalisch-chemischen Prozess dar. Die grundlegenden Vorgänge Benetzung, Adhäsion und Diffusion werden im Folgenden näher erläutert.

2.2.2.1 Benetzung

Die Verbindungsbildung beim Löten wird begleitet durch Benetzungs- und Fließvorgänge des Lotes auf dem Grundwerkstoff. Die Benetzung bezeichnet eine Grenzflächenreaktion zwischen Lot und Substrat. Nach [Frit10] erfolgt ein Benetzen, wenn Lot und Grundwerkstoff Mischkristalle oder intermediäre Verbindungen bilden können, wobei deren Löslichkeit ineinander gering sein kann. Nur bei völliger Unlöslichkeit werden deren Oberflächen nicht benetzt. Weitere Voraussetzungen für ein Benetzen und Ausbreiten sind dabei direkter Kontakt zwischen den zu fügenden Werkstoffoberflächen und ein Erwärmen der Fügepartner auf Löttemperatur, um den notwendigen niedrigviskosen Zustand der Lotschmelze aufrechtzuerhalten. Ein allgemein anerkanntes Maß für den Grad bzw. die Güte der Benetzung stellt der Benetzungswinkel φ (Abbildung 2.6) dar. [Dorn07, Barg08]

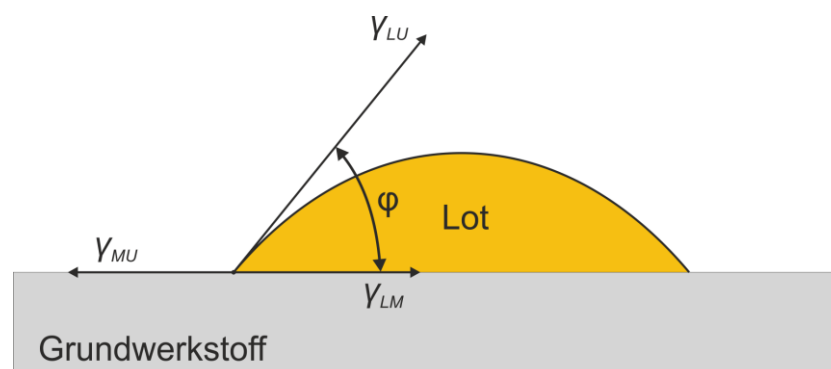


Abbildung 2.6 Definition Benetzungswinkel an Lottropfen auf ebenem Blech [Dorn07]

Der Benetzungswinkel lässt sich anhand der Oberflächen- bzw. Grenzflächenspannungen zwischen den Fügepartnern sowie dem umgebenden Medium definieren. Im idealisierten Fall, d.h. bei vollkommen glatten und sauberen Oberflächen sowie keinerlei Reaktion

zwischen Lotschmelze und Grundwerkstoff (GW), lässt sich das energetische Gleichgewicht der Grenzflächenspannungen zwischen Lot und Metall (γ_{LM}) sowie des Metalls (γ_{MU}) und des Lotes (γ_{LU}) gegenüber dem Umgebungsmedium (Vakuum, Flussmittel oder Schutzgas) mit dem Youngschen Theorem beschreiben (siehe Gleichung 1). [Dorn07]

$$\gamma_{MU} = \gamma_{LM} + (\cos \varphi) * \gamma_{LU} \quad \text{Gleichung 1}$$

Dabei sind die horizontal wirkenden Oberflächenspannungen in Beziehung gesetzt. Die vertikalen Kräfte werden aufgrund der Starrheit des Substrates bzw. des Grundwerkstoffes nicht berücksichtigt. Der Benetzungswinkel ergibt sich somit als Randwinkel zu:

$$\cos \varphi = \frac{\gamma_{MU} - \gamma_{LM}}{\gamma_{LU}} \quad \text{Gleichung 2}$$

Die Benetzung ist umso besser, je kleiner der Benetzungswinkel ist. Aus Gleichung 2 lässt sich ableiten, dass die Benetzung mit zunehmender Grenzflächenspannung des Substrates (γ_{MU}), verringerter Oberflächenspannung des Lotes (γ_{LU}) zur Umgebung, sowie abnehmender Spannungen an der Grenzfläche zwischen Lot und Grundwerkstoff (γ_{LM}) steigt. [Dorn07] Die Grenzflächenspannungen sind somit die für den Benetzungsvorgang bestimmenden Größen. [Frit10]

Die bestmögliche Benetzung wird erreicht, wenn der Benetzungswinkel $\varphi = 0^\circ$ beträgt und eine vollständige Ausbreitung des Lotes als monomolekularer Film auf dem Grundwerkstoff vorliegt. [Dorn07] In der Realität sind die Benetzungswinkel aufgrund der nicht idealisierten Randbedingungen größer 0° . Der Bereich zwischen 0° und 180° ist als teilweise Benetzung definiert. Bei $\varphi = 90^\circ$ beginnt die sogenannte Entnetzung, d.h. das Lot rollt bei zunehmend stumpfen Winkel auf der Oberfläche ab. Bei einem Benetzungswinkel von $\varphi = 180^\circ$ liegt vollkommene Unbenetzbarkeit vor, d.h. das geschmolzene Lot zieht sich in kugelige Tropfenform zusammen. [Herr02]

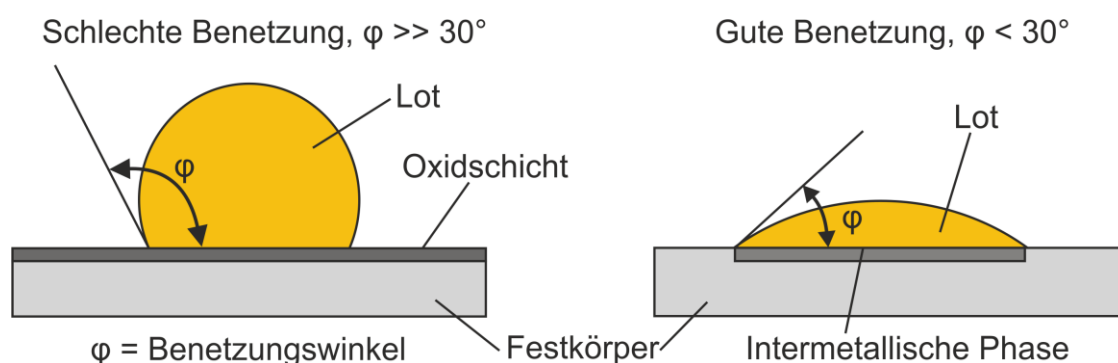


Abbildung 2.7 Benetzungswinkel als Kriterium für eine schlechte bzw. gute Benetzung [Herr02]

Im Allgemeinen wird in der Literatur [Kreu97, Dorn07, Frit10, Barg08] bei einem Winkel von $0^\circ < \varphi < 30^\circ$ von ausreichender bzw. guter Benetzung gesprochen (siehe Abbildung 2.7), welche bezüglich der Festigkeiten der erzeugten Verbindungen zu guten Lötresultaten führt und somit als Anhaltspunkt dienen kann. Für Lötverbindungen im Automobilbau werden neben glatten Oberflächen möglichst tangential Übergänge zum Grundwerkstoff angestrebt. Dies bedeutet, die Benetzungswinkel bei Löt Nähten im Sichtbereich sollten ca. 30° betragen, da hinterher nur eine leichte Korrektur durch Schleifprozesse (Finish) erfolgen kann. Im besten Falle ist die Oberflächenqualität der Naht so gut, dass keine Nachbearbeitung durchgeführt werden muss.

2.2.2.2 Adhäsion

Ähnlich der Benetzung setzt das Wirksamwerden von Haftkräften zweier Werkstoffe durch atomare Anziehung metallischen Kontakt voraus [Dorn07]. Beim Lötvorgang entsteht eine adhäsive Bindung durch das Absättigen der freien Bindungskräfte durch das Lot [Kreu97]. Die sogenannte Adhäsionsenergie (W_A) ist dabei ein Maß für die Haftung zwischen flüssiger (Lot) und fester Phase (GW). Sie definiert den flächenspezifischen Arbeitsaufwand, der zum reversiblen Abheben der Flüssigkeit vom Festkörper notwendig wäre (siehe Gleichung 3). [Dorn07]

$$W_A = \gamma_{MU} + \gamma_{LU} - \gamma_{LM} \quad \text{Gleichung 3}$$

Die Dimension entspricht derjenigen einer Grenzflächenspannung [J/m^2]. Daher sind die Zahlenwerte von Grenzflächenenergie zu Grenzflächenspannung identisch. Für den Trennvorgang, durch welchen zwei neue Oberflächen entstehen, ist die Grenzflächenenergie vom Betrag $\gamma_{MU} + \gamma_{LU}$ aufzubringen. Dagegen entfällt die Grenzfläche Lot – Grundwerkstoff, wodurch die zugehörige Energie (γ_{LM}) frei gesetzt wird. [Dorn07] Mit Gleichung 1 und 3 lässt sich folgende Beziehung ableiten (Gleichung 4):

$$W_A = \gamma_{LU} * (1 + \cos \varphi) \quad \text{Gleichung 4}$$

Für eine vollständige Benetzung ($\varphi = 0^\circ$) ergibt sich demzufolge eine Adhäsionsenergie von $W_A = 2 * \gamma_{LU}$. Somit wäre ein gleichgroßer Energiebetrag ($2 * \gamma_{LU}$) notwendig, um das Lot vom Grundwerkstoff zu trennen. Die maximal erreichbare Adhäsionsenergie entspricht daher der Kohäsionsenergie des Lotes. Im Falle der vollständigen Nichtbenetzung ($\varphi = 180^\circ$) entsteht keine Haftung, da die Adhäsionsenergie gleich Null ist. Bei teilweiser Benetzung verringert sich diese Energie mit zunehmendem Benetzungswinkel. Allerdings erlaubt die Adhäsionsenergie bei teilweiser Benetzung keine quantitative Aussage über die Haft-

festigkeit zwischen Lot und Substrat. Zu berücksichtigen sind außerdem in diesem Zusammenhang die physikalischen und chemischen Grenzflächenreaktionen, sowie der Einfluss der durch die Wärmeeinbringung erzeugten inneren Spannungen. Eine gute Benetzung ist somit eine notwendige, aber keine hinreichende Bedingung für die Gewährleistung einer hohen Haftfestigkeit der Lötverbindung. [Kreu97, Dorn07]

2.2.2.3 Diffusion

Die Verbindung entsteht im Lötprozess basierend auf Legierungsbildung zwischen den beteiligten Werkstoffen in den benetzten Bereichen. Dabei kommt es bei erhöhten Temperaturen zu Platzwechselvorgängen bzw. Diffusionsprozessen zwischen den Fügepartnern, d.h. Elemente des Lotes diffundieren in den Grundwerkstoff (D_{GW}) sowie umgekehrt (D_L) und bilden die Legierungszone D (siehe Abbildung 2.8). [Frit10] Diese Vorgänge sind irreversibel und eine stoffschlüssige Fügeverbindung mit gleicher chemischer Bindung aber unterschiedlicher Zusammensetzung entsteht [Tuer04]. In Abhängigkeit der jeweiligen Löslichkeit von mindestens einer Hauptkomponente des Lotes mit einer Komponente des Grundwerkstoffes ineinander bilden sich Mischkristalle (MK), Eutektika und/oder Intermetallische Phasen [Kreu97]. Dabei wird je nach Konstruktionsauslegung gegenüber der wirkenden Belastung die höchste Bauteilsicherheit erreicht, wenn die Legierungszone aus Mischkristallen besteht und intermetallische Phasen mit ihren meist komplizierten Raumgittern und spröden Charakter vermindert bzw. vermieden werden [Frit10]. Bei bestimmten Werkstoffkombinationen werden allerdings höhere Festigkeiten mithilfe der intermetallischen Phasen erreicht (bspw. γ' -Phase vom Typ Ni_3Al) [Kreu97]. In jedem Falle sind die resultierenden mechanisch-technologischen Eigenschaften der entstehenden Lötverbindung im starken Maße vom Verhältnis der Arbeitstemperatur zur Schmelztemperatur des Grundwerkstoffes und den damit verbundenen metallurgischen Wechselwirkungen abhängig [Tuer04]. Dies bedeutet, dass bei gleicher Art des Fügeverfahrens, der Konstruktion sowie der verwendeten Werkstoffe allein ein verändertes Temperatur-Zeit-Regime zu unterschiedlichen Eigenschaften der Verbindung führen kann. Im Allgemeinen gilt, je höher die Arbeitstemperaturen sind, desto stärker laufen die Platzwechselvorgänge an der Phasengrenzfläche (G) ab und umso größer bildet sich die Legierungszone aus [Barg08].

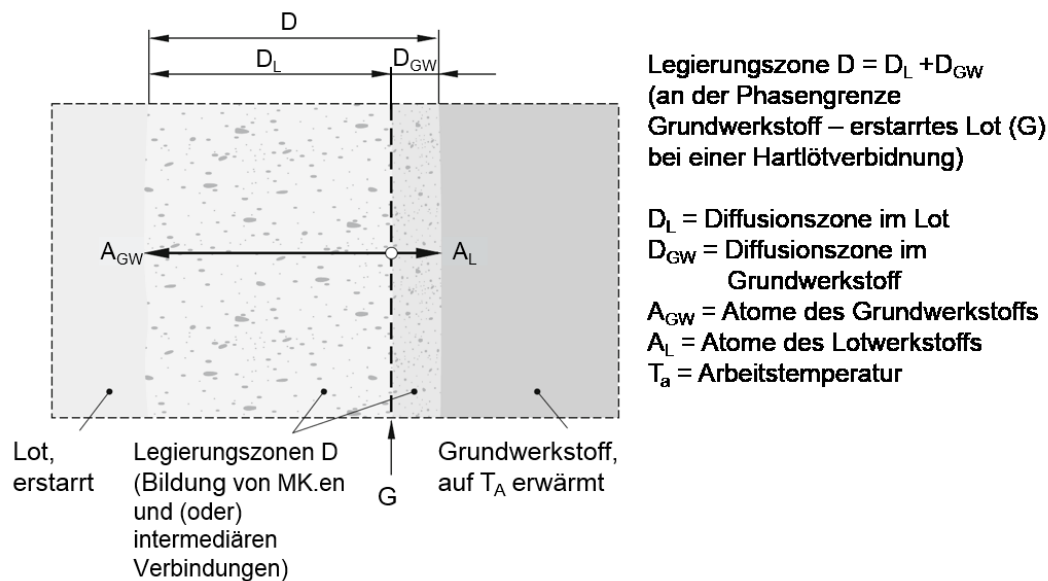


Abbildung 2.8 Zonencharakter einer Lötverbindung [Frit10]

Die Diffusion ist ein statistischer Vorgang, bei dem eine temperaturabhängige Bewegung von Atomen, Ionen und anderen Teilchen aufgrund von Konzentrationsunterschieden sowie äußerer oder innerer Spannungen stattfindet [Kreu97]. Diese Bewegung hat einen gerichteten Stofftransport zur Folge und kann durch die Fickschen Gesetze beschrieben werden [vgl. Barg08]. Neben der zeitlichen Abhängigkeit wird die Diffusionsgeschwindigkeit danach durch die vorherrschenden Konzentrationsunterschiede und den Diffusionskoeffizienten (D_x) bestimmt. Der Koeffizient D_x ist abhängig von der Aktivierungsenergie (Q) und wird somit von der Temperatur maßgeblich beeinflusst [Barg08]. Generell erreicht das durch die Aktivierung am Beginn des Lötvorgangs vorliegende inhomogene Gesamtsystem unter erneuter Energieabgabe (bspw. Gitterschwingungen, Wärme) einen energetisch stabileren Zustand. Dadurch wird im Allgemeinen eine Verstärkung der Haftkräfte und damit verbunden eine Erhöhung der Festigkeit erzeugt. [Dorn07]

Im Grundwerkstoff kann es beim Löten aufgrund der verschiedenen Fehlstellendichten zu unterschiedlichen Diffusionsvorgängen kommen (siehe Abbildung 2.9). Während des Benetzungsvorganges treten hauptsächlich Oberflächendiffusionen auf. Allerdings können im weiteren Prozessverlauf und vor allem bei erhöhter und/oder länger andauernder Temperatureinwirkung Volumendiffusionen ablaufen. Darunter ist im Wesentlichen die Korngrenzendiffusion zu verstehen, bei der aufgrund der höheren Fehlstellendichte an den Korngrenzen gegenüber dem Korninneren die bedeutend höhere Wahrscheinlichkeit des Atomübergangs in benachbarte Lehrstellen besteht. [Kreu97]

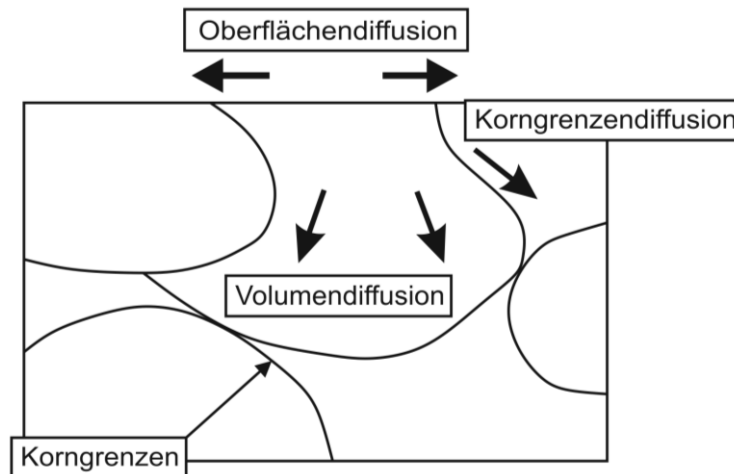


Abbildung 2.9 Schematische Darstellung von unterschiedlichen Diffusionsvorgängen [Kreu97]

Nach [Barg08, Frit10, Dorn07] können bei einigen Werkstoffen durch die Korngrenzendiffusion erhebliche metallurgische Probleme entstehen, wie z.B. beim Löten von kaltverformten Stahlblechen mit kupferhaltigen Loten besonders unter hohen Temperaturen sowie auftretenden Zugspannungen (siehe Kapitel 2.6.3).

In [Kreu97] wurden zusätzlich ausgehend von dem simplifizierten System Eisen-Kupfer sowie einer aus Strahlradius und Vorschubgeschwindigkeit des Laserstrahls bestimmten Strahleinwirkzeit die Diffusionskoeffizienten ermittelt. Diese Untersuchungen ergaben einen Diffusionskoeffizienten von Kupfer (als Lotbestandteil) in Eisen von $D_{\text{Cu,Fe}} = 1,76 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$. Der Koeffizient für die Diffusion von Eisen (als Grundwerkstoffbestandteil) in Kupfer beträgt $D_{\text{Fe,Cu}} = 4,88 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$. Im Vergleich dazu liegt der Diffusionskoeffizient im Bereich der aufgerissenen Korngrenzen bei $D_{\text{K}} = 4,48 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ und ist somit um den Faktor 10^4 größer, was die Tendenz zu Löteindringungen an den Korngrenzen bestätigt. Die Temperaturen in der Prozesszone werden in dieser Quelle nicht genannt. Nach [Ishi98] ist die Volumendiffusion erst ab einer Temperatur oberhalb von 1200°C vorherrschend, während darunter beide Diffusionsarten dominieren, vor allem aber die Korngrenzendiffusion.

Beim Laserstrahllöten von verzinkten Stahlblechen mit Kupferbasisloten bilden sich kleine Diffusionszonen im Bereich weniger Mikrometer (bspw. $2,5 \mu\text{m}$ in [Kreu97]) mit dünnen Schichten aus Eisensilikat (siehe Abbildung 2.10), welche bedingt durch die kurze Temperatureinwirkung hauptsächlich auf dem Auflösen des Grundwerkstoffes im Lot basieren [Kolt10, Ebbi98]. Während [LiLi08] schreibt, dass die Größe der Diffusionszonen vom Energieeintrag abhängig ist, zeigt [Ishi98], dass selbst nach mehreren Minuten bei hohen Temperaturen die Diffusionszonen die oftmals kritische Dicke von $10 \mu\text{m}$ nicht überschreiten. Durch die angestrebten höheren Lötgeschwindigkeiten ($\geq 3 \text{ m/min}$) werden in dieser Arbeit sehr kleine Diffusionszonen im niedrigen einstelligen Mikrometerbereich erwartet.

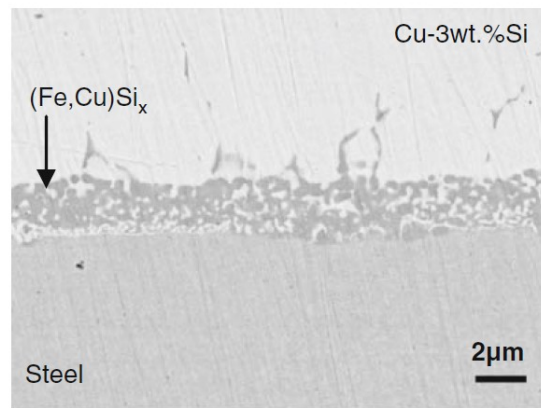


Abbildung 2.10 Grenzschicht von Kupferbasislot ($CuSi_3$) und verzinktem Stahlblech [Kolt10]

Durch die speziell beim Laserstrahllöten (siehe nachfolgendes Kapitel) vorliegenden äußerst kurzen Strahl-Stoff-Wechselwirkungszeiten wird im Gegensatz zu längeren Lötprozessen kein Gleichgewichtszustand hinsichtlich der Reaktionskinetik erreicht. Nach [Kreu97] erfordert dies eine transiente Betrachtung des Lötzyklusses, d.h. die dabei auftretenden abhängigen Adhäsions-, Diffusions- und Lösungsvorgänge sollten eigens für den Laserstrahl­lötprozess untersucht und bewertet werden.

2.3 Laserstrahl­löten

2.3.1 Besonderheiten Laserstrahl­löten

Das Löten mittels Laserstrahlung gehört nach [DIN 8505-3] zur Verfahrensvariante Löten durch Strahl. Die benötigte Prozesswärme für den Fügeprozess entsteht dabei durch Absorption der hochenergetischen Strahlung. Als Energieträger dient der besonders gut fokussierbare Laserstrahl.

Im Wesentlichen unterscheidet sich das Laserstrahl­löten von anderen Lötverfahren durch die präzise lokale Energieeinbringung, so dass eine signifikante Erwärmung und damit ein großer Verzug der zu löten­den Bauteile minimiert bzw. gänzlich vermieden werden kann [Kreu97]. Der zeitliche Wärmefluss beim Laserstrahl­löten ist deutlich geringer als beispielsweise beim Ofenlöten [Demm08]. Die Abbildung 2.11 zeigt exemplarisch für Titan­legierungen qualitativ die Gegenüberstellung der Prozesse Laserstrahl­löten und Ofenlöten.

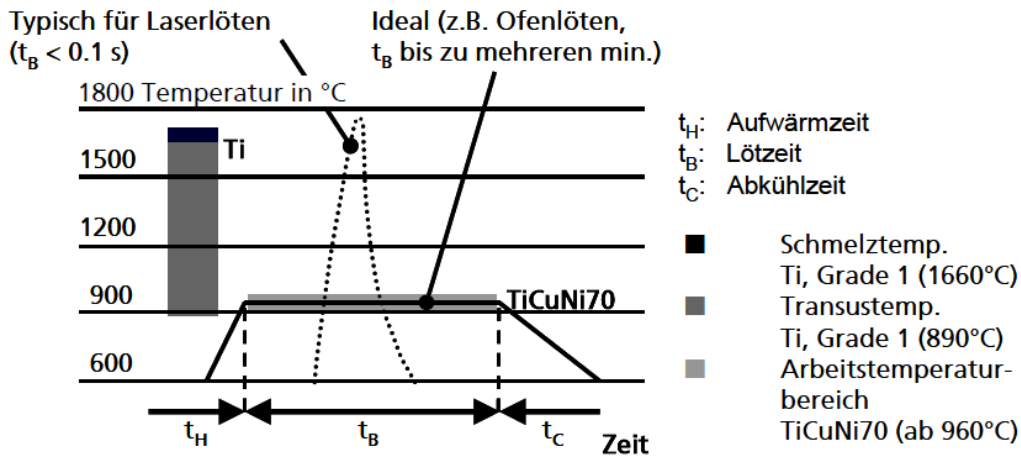


Abbildung 2.11 Schematische Darstellung von Laserstrahllöten gegenüber Ofenlöten (qualitativ) [Demm08]

Der Laserstrahl bietet als Bearbeitungswerkzeug neben der gezielten kurzzeitigen lokalen Wärmeeinbringung zahlreiche weitere Vorteile, beispielsweise die einseitige Zugänglichkeit, relativ hohe Prozessgeschwindigkeiten und eine sehr hohe Automatisierbarkeit, welche für die wirtschaftliche Klein- und Großserienfertigung im Karosseriebau unabdingbar ist. Die Tabelle 2.3 zeigt zusammenfassend vor- bzw. nachteilige Prozessmerkmale des Laserstrahl-lötens.

Tabelle 2.3 Vor- und Nachteile des Laserstrahl-lötens [Demm08]

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • gut steuerbare Energiezufuhr • geringer Verzug der Bauteile • hohe Vorschubgeschwindigkeiten • geringe Nahtbreite • verringerte Spaltkorrosion • hohe Festigkeit • dichte Naht • hohe Flexibilität • einseitige Zugänglichkeit • glatte Fügenahtoberfläche 	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Geometrieanforderungen • hohe Materialanforderungen (z.B. Beschichtungsdicke) • Lasersicherheit

Dieses Fügeverfahren bietet die Voraussetzungen und damit die Möglichkeiten die außerordentlich hohen Anforderungen an die Nahtanmutungen im Außenhautbereich des Karosseriebaus zu erfüllen (vgl. Kapitel 2.5). Zudem sind durch die einseitige Zugänglichkeit und hohe Flexibilität vielfache Designmöglichkeiten gegeben.

Es existieren verschiedene Varianten des Laserstrahl-lötens, mit direkter und indirekter Energieeinbringung in die zu fügenden Bauteile [Brau03]. Da für diese Arbeit allerdings nur die direkte Energieeinbringung von Bedeutung ist, soll diese im Folgenden erläutert werden. Das Verfahrensprinzip ist in Abbildung 2.12 exemplarisch dargestellt.

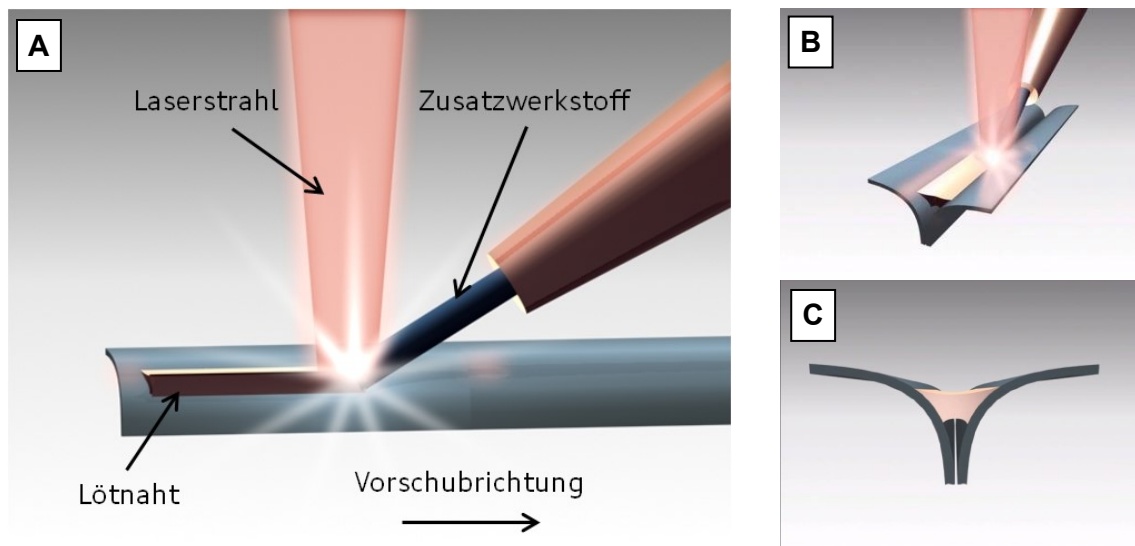


Abbildung 2.12 Verfahrensprinzip des Laserstrahlhartlötens (Arbeitsbereich: Ansicht seitlich [A], isometrisch [B] und Querschnitt der Lötnaht am geraden Bördelstoß [C])

Beim flussmittelfreien Laserstrahlhartlöten wird der größte Teil der Laserstrahlung zum Aufschmelzen des Lotes und nur ein geringer Teil für die Erwärmung der Fügepartner benötigt. Der Laserstrahl wird dabei mit Hilfe einer strahlführenden Optik meist senkrecht auf der zu bearbeitenden Fügestelle abgebildet. Die Erwärmung der Grundwerkstoffe sowie des Lotes erfolgt simultan durch den absorbierten Teil der Laserstrahlung. Nach [Grim12] entsteht nur im Bereich der Interaktionszone des Laserstrahls mit den Fügepartnern flüssige Schmelze, welche beim Verlassen des bestrahlten Bereichs sofort zu erstarren beginnt. Ein größeres Schmelzbad über mehrere Millimeter wie beim Laserstrahlschweißen konnte nicht beobachtet werden. Zusätzlich laufen Schmelz- und Verdampfungsprozesse von Beschichtung und Verschmutzungen im direkten Umfeld der Fügezone ab [Kimu06]. Dadurch kann die Schmelzbadynamik und die daraus folgende Nahtausbildung beeinflusst werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit, dass es durch die bereits geschilderte geringe lokale Energieeinbringung und die damit zusammenhängende sehr schnelle Erstarrung zur Ausbildung von Nahtimperfectionen kommt (vgl. Kapitel 2.6). Zudem wird in [Grim12] die zyklische Benetzung beim Laserstrahlhärten von verzinkten Stahlblechen am Bördelstoß beschrieben, durch die wiederum Schwingungen im Schmelzbad induziert werden können. Ein Benetzen der Grundwerkstoffe findet nur in den Bereichen der direkten Bestrahlung durch den Bearbeitungslaser statt. Folglich bildet sich eine Lotbrücke (siehe Abbildung 2.12, Teilbild C). Weiterhin kann es durch die Verdampfung der Zinkbeschichtung und der Schmutzrückstände zu einer Schmauchbildung oberhalb der Naht kommen. Zusätzlich ist die zyklische Benetzung für die Ausbildung der Oberflächenschuppung maßgebend. [Grim12] Ein ausgeprägtes Gravitationsverhalten beim Laserlöten in unterschiedlichen Raumlagen tritt nach [Kreu97] aufgrund der kurzen Strahl-Werkstoff-Wechselwirkung nicht auf. Ebenfalls zeigte die Polarisation des Bearbeitungslasers keinen signifikanten Einfluss.

Zusammenfassend lassen sich die vielen Vorteile des Laserstrahlhlötens (siehe Tabelle 2.3) hervorheben. Demgegenüber steht der größte produktions- und prozesstechnische Nachteil, dass dieses Verfahren anfällig gegenüber Parameterschwankungen, insbesondere der Lage des Laserstrahls zum Draht sowie zur Fuge, ist [Hoff06]. Somit sollte die verwendete Systemtechnik an die Applikation spezifisch angepasst werden. Die wichtigsten Bestandteile der Systemtechnik zum Laserstrahlhartlöten werden nachfolgend erläutert.

2.3.2 Strahlquellen/-führungen für Laserhartlötprozesse

Wie in 2.3.1. bereits erwähnt, bietet ein Bearbeitungslaser im Multikilowattbereich die notwendigen hohen Energiedichten, wie sie für die industrielle Materialbearbeitung (bspw. Schweißen und Schneiden) benötigt werden. Die allgemeinen Grundlagen der Laserstrahlerzeugung, wie Pumpquelle, aktives Medium und Resonator sollen an dieser Stelle nicht explizit erläutert werden und sind den Standardwerken der Literatur [Beye95, Hueg09, Eich10 usw.] zu entnehmen. Die unterschiedlichen Wellenlängen der einzelnen Lasertypen im Bereich 900 -1100 nm, welche aus Ihrer Erzeugung resultieren, eignen sich dabei, um im Automobilbau gängige Werkstoffe zu bearbeiten. Die Abbildung 2.13 zeigt die wellenlängenabhängigen Absorptionsspektren verschiedener Werkstoffe und die Wellenlängen der gängigen Lasertypen für die Materialbearbeitung.

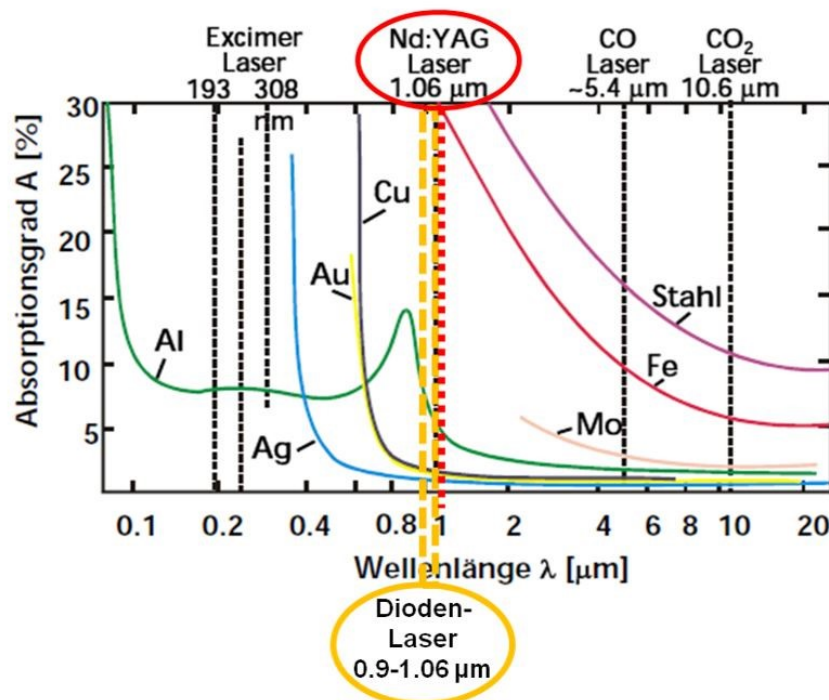


Abbildung 2.13 Absorptionsspektren von Werkstoffen bei Raumtemperatur [Beye95, Diodenlaser ergänzt]

In der industriellen Großserie des Automobilbaus haben sich zwei Laserarten durchgesetzt, der Festkörperlaser und der Diodenlaser. Dies liegt zum einen an der höheren Absorption an den meisten Werkstoffoberflächen gegenüber CO₂-Lasern, zum anderen aber auch an den am Markt verfügbaren hohen Laserleistung (bis 5 kW im Dauerstrichbereich) gegenüber bspw. Eximer-Lasern. Des Weiteren eignen sich die Wellenlängen um 1 µm hervorragend, um die Strahlung in sehr flexiblen Glasfasern zum Bearbeitungsort zu transportieren, was wiederum in einer Großserie mit vielen Roboteranwendungen sehr vorteilhaft ist.

Beim Laserstrahllöten sind geringere Energiedichten im Vergleich zum Laserstrahlschweißen oder -schneiden notwendig, da der Grundwerkstoff nicht aufgeschmolzen werden muss. Dagegen ist ein für die Benetzung erforderliches ausgedehnteres Wärmefeld auf der Bauteiloberfläche notwendig, wodurch defokussierte Festkörperlaser [Kreu97] oder Diodenlaser, mit generell etwas schlechterer Strahlqualität, zum Einsatz kommen. Vor allem die in den letzten Jahren entwickelten fasergekoppelten Diodenlaser bieten bei kompakter Bauweise und hoher Ausgangsleistung (bis 5 kW) sowie durch die direkte Anregung mittels elektrischen Stromes einen hohen Steckdosenwirkungsgrad von bis zu 40%. Zudem besitzen die Laserdioden eine hohe Lebensdauer und verglichen mit anderen neuartigen Festkörperstrahlquellen (Scheiben- oder Faserlaser) durch die mikroelektronische Massenfertigung und den relativ einfachen optischen Aufbau ohne Resonator geringere Anschaffungskosten, was für eine wirtschaftliche Großserienfertigung einen Vorteil darstellt. [Kloc07, Trae05]

Für die Auslegung der Strahlformungs- und Bearbeitungsoptiken sind allerdings nicht nur die schlechtere Strahlqualität der Diodenlaser, welche durch den größeren Divergenzwinkel charakterisiert ist, sondern auch die durch Polarisations- und Frequenzkopplung erzeugte Bandbreite unterschiedlicher Wellenlängen zu beachten. Hierbei werden einerseits mittels Polarisationsstrahlteiler die linear polarisierten Teilstrahlen der Diodenlaserstacks einer Wellenlänge überlagert sowie verschiedene Diodenlaserwellenlängen über wellenlängenselektive Spiegel oder ähnliche Verfahren (siehe Abbildung 2.14) miteinander zu einem Laserstrahl gekoppelt. Derzeit ist es möglich, bei einer vergleichsweise geringen Verschlechterung der Ausgangsstrahlqualität der Laserdioden, bis zu vier unterschiedliche Wellenlängen miteinander zu koppeln und so die obengenannten Ausgangsleistungen zu erzielen. [Ruet12, Lase14]

Theoretisch würde jede einzelne Wellenlänge bei gleicher Brennweite zu einem jeweilig einzelnen Fokus führen, allerdings überlagern sich in der Praxis die Hüllkurven, sodass im Arbeitsbereich der resultierende Fokusradius und gleichzeitig die Rayleighlänge vergrößert wird.

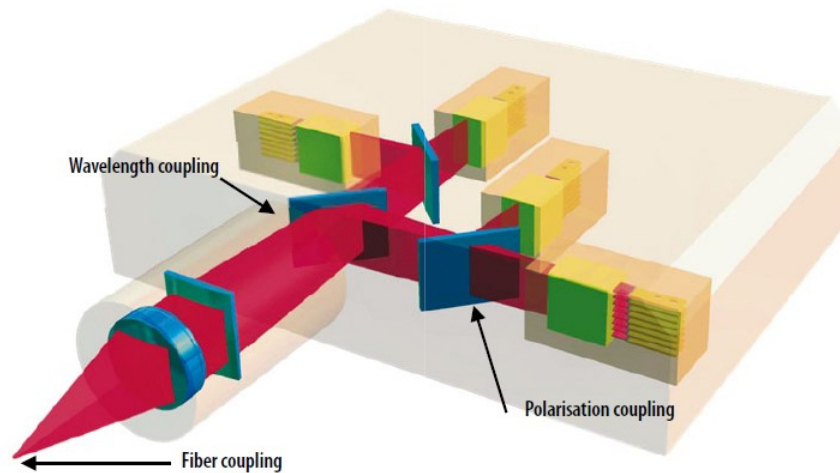


Abbildung 2.14 Polarisations- und Wellenlängenkopplung in einem Diodenlaser [Ruet12]

Neuere Entwicklungen der Diodenlaser beschäftigen sich mit einem Aufbau mittels externen Kavitäten und sollen Strahlqualitäten im Bereich der Faser- und Scheibenlaser bei hohen Ausgangsleistungen (bis 4 kW) ermöglichen [Lieb13].

Die Bearbeitungsoptik dient neben der Strahlführung vor allem der Strahlformung im Bearbeitungspunkt auf der Bauteiloberfläche. Für die technische Realisierung stehen verschiedene Ansätze zur Verfügung, welche nach [Beye98] grundsätzlich in 3 Klassen unterteilt werden können:

- 1.) Statische Optiken
- 2.) Dynamische Optiken (Scanner)
- 3.) Kombination aus 1. und 2.

Die statischen Varianten dienen als nicht bewegte Optiken dabei zur Beeinflussung der Strahlgeometrie und der Leistungsdichteverteilung des Laserstrahls, speziell angepasst auf die jeweilige Bearbeitungsaufgabe. Beispiele hierfür sind die Strahlformung durch Facetten- und Zylinderspiegel, wodurch bspw. homogene Rechteckspots bzw. linienförmige Leistungsdichteverteilungen erzeugt werden können. Eine variable Positionierung und Anpassung der Intensitätsverteilung an die Bearbeitungsaufgabe während des Prozesses ermöglichen hingegen bewegliche Schwingspiegel, welche in einer sogenannten Scanneroptik verbaut sind. Die bewegten optischen Systeme können aus ein bzw. zwei um jeweils eine Achse bewegliche Spiegel bestehen und werden zur gezielten Steuerung von Temperaturprofilen auf der Bauteiloberfläche bspw. an veränderlichen Bauteilquerschnitten beim Härten von Turbinenschaufeln [Bonß07] eingesetzt. Eine Kombination der beiden Varianten ist möglich, wenn z.B. eine Homogenisierungsoptik der Scanneroptik vorgeschaltet wird. [Beye98]

Für das Laserstrahllöten ebenfalls umgesetzte Varianten sind Strahlteileroptiken, welche den Rohstrahl in zwei Teilstrahlen aufteilt und im Bearbeitungspunkt wieder zusammen führt

[Horn06, Grim10] sowie Optiken mit voneinander unabhängigen Teilstrahlen (aus zwei Fasern), welche auch unterschiedliche Energieverteilungen ermöglichen [Hane96, Hoff04b].

2.3.3 Anlagentechnik zum Löten

Neben dem Laseraggregat und der Strahlformung sind für das Laserstrahlhartlöten weitere Betriebsmittel notwendig. Das typische Handhabungsgerät bildet dabei im modernen Karosseriebau ein 6-Achs-Knickarmroboter. Dieser ist in der Regel in allen Achsen frei programmierbar und damit in der Lage jeden Punkt im Raum innerhalb eines bestimmten Arbeitsbereiches in jeder beliebigen Orientierung der Bearbeitungsoptik anzufahren. Oftmals wird der Arbeitsbereich durch Medienzuführungen und Lichtleitkabel eingeschränkt. Dem kann allerdings durch die Montage des Roboters auf eine zusätzliche Linearachse (7. Achse) entgegengewirkt werden. Weiterhin übernehmen Roboter meist die Kommunikation mit sämtlichen anderen Prozessteilnehmern und steuern so die Prozesskenngrößen. [Dilt06] Der großen Flexibilität der Industrieroboter steht aufgrund der kinematischen Kette aus den sechs Achsen eine relative Ungenauigkeit verglichen mit Portalanlagen gegenüber. Zu unterscheiden ist dabei die absolute Genauigkeit mit der ein programmierter Punkt (PP) angefahren wird, die relative Wiederholgenauigkeit mit der der PP wiederholt angefahren wird und die dynamische Bahnabweichung, welche sich aus der Beschleunigung der einzelnen Achsen bei unterschiedlichen Verfahrensgeschwindigkeiten ergibt. So schwankt die Roboterbahn je nach Komplexität der auszuführenden Bahnbewegung (enge Radien) um einige Zehntel, was wiederum bei einem Laserstrahlhartlötprozess großen Einfluss auf die Bearbeitungsqualität haben kann. [Hoff06] Kommt zusätzlich noch ein lateraler Versatz oder Schwankungen in der Drahtzuführung hinzu, kann es zur Ausbildung von Nahtimperfectionen kommen. Die maximale zulässige laterale Bahnabweichungen beim Laserstrahllöten beträgt so bspw. für einen Laserstrahldurchmesser von 3 mm nach [Hoff02] nur $\pm 0,3$ mm. Um diesen Problemen entgegen zu wirken, wurden Systeme mit Tastspitze [Hoff04a], sowie taktile Nahtführung entwickelt [Scan14]. Auch sensorgestützte Bahnoptimierungen können die sogenannten „Überschwinger“ und Bahnungenauigkeiten minimieren [Hoff06].

Eine weitere wichtige Komponente ist die Drahtzuführung. Diese sollte möglichst genau und reproduzierbar sein, um konstante Lötbedingungen im Arbeitspunkt zu gewährleisten. Es gibt verschiedene Systemvarianten, wobei sich bisher aufgrund der hohen Drahtförderstrecken im Karosseriebau (vom Drahtfass außerhalb der Zelle bis zum Bearbeitungspunkt oftmals > 7 m) die Zwei-Rollen-Antriebe (Push-Pull, Push-Push usw.) etabliert haben. Zugeführt werden kann der Draht mit oder ohne Drahtvorwärmung (Heiß- bzw. Kaltdraht), wobei die Vorwärmung meist konduktiv über den elektrischen Widerstand des Drahtes (Widerstandserwärmung) erfolgt. Die Drahtdüse für die Zuführung in die Prozesszone wird direkt an die Optik gekoppelt, um eine Relativbewegung zum Laserstrahl zu vermeiden. Bisher hat

sich die schleppende Anordnung von Draht zu Bearbeitungsoptik in der Großserie durchgesetzt.

Weiterhin ist das Lötnahtergebnis abhängig von der Bauteilgenauigkeit, d.h. wie groß sind die Toleranzen der einzelnen Bauteile sowie der Bauteile zueinander und wie stark ist der Einfluss der Spanntechnik. So können sich die obengenannten zulässigen lateralen Abweichungen bei Laserstrahlrötprozessen durch die Bauteiltoleranzen und den Spannprozess selbst auf ein Minimum von nur $\pm 0,1$ mm reduzieren [Hoff03]. Über die möglichst genaue Positionierung der Bauteile hinaus ist die Spanntechnik zudem entscheidend für die Wärmeableitung, welche den Prozess vor allem beim Bearbeiten von dünnen Blechen beeinflussen kann, verantwortlich. Generell ist bei der Anlagenplanung eine funktions-, beanspruchungs- und prozessorientierte Auswahl der Betriebsmittel für jede Applikation notwendig, um eine sichere Produktion mit stabilen Prozessen zu gewährleisten [Horn06].

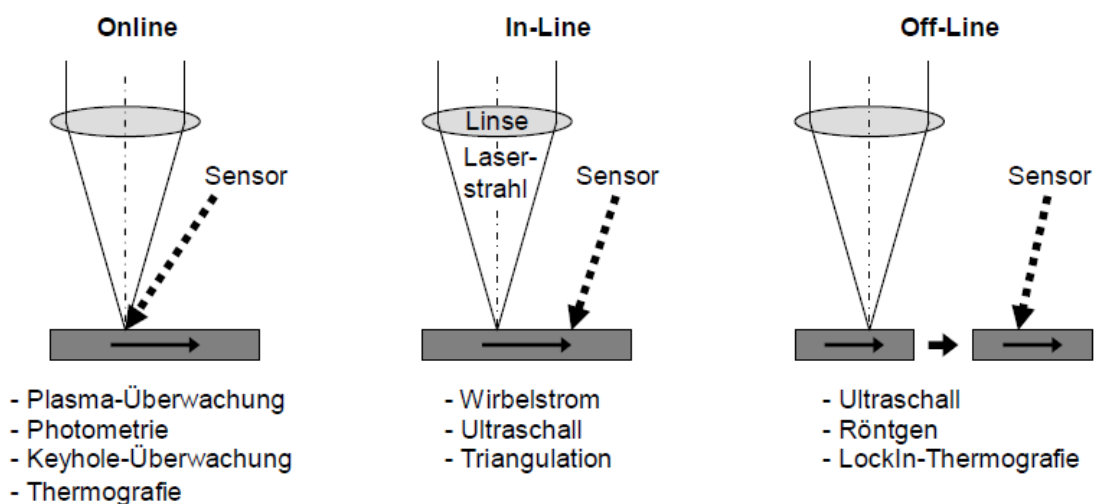


Abbildung 2.15 Anordnungsvarianten von Sensorik zur Überwachung von Laserstrahlprozessen [Demm08]

Aus den oben genannten Gründen besteht bei immer schneller werdenden Prozessen an geometrisch komplexeren Bauteilen die Forderung nach einer Prozessüberwachung während des Lötens [Grim12], um eine gleichbleibende Qualität sicherzustellen. Für die Prozessüberwachung gibt es verschiedene Ansätze (siehe Abbildung 2.15). Bei den beiden Varianten In- und Off-Line erfolgt eine Überwachung bzw. Kontrolle des Bearbeitungsergebnisses. Während In-Line-Verfahren diese Kontrolle in einem separaten Prozessschritt innerhalb der Prozesskette durchführen (bspw. Lötnahtkontrolle durch Lichtschnitt- und Graubildaufnahme), erfolgt die Überwachung bei Off-Line-Verfahren dagegen komplett außerhalb der Fertigungslinie unabhängig der Taktzeit. Zu ihnen zählen zum Beispiel die zerstörenden und zerstörungsfreien Bauteilprüfverfahren, wie bspw. die metallografische Anfertigung und Untersuchung von Schliiffproben. Die Online-Variante dagegen erfolgt direkt

während der Bearbeitung, d.h. im selben Prozessschritt und innerhalb der Hauptzeit der Bearbeitung, womit wiederum Kosten- und Platzersparnisse erzielt werden können. [Grim12] Die Online-Prozessüberwachung kann zusätzlich in drei Verfahrensvarianten hinsichtlich ihrer örtlichen Anordnung der Messposition gegenüber dem Bearbeitungsort unterschieden werden. So überwacht die Pre-Prozesskontrolle die Prozesseingangsgrößen, wie zum Beispiel die Fugendetektion mittels Lichtschnitt. Die Post-Prozess-Variante hingegen ermöglicht eine Kontrolle unmittelbar nach der eigentlichen Bearbeitung (Lichtschnittsensoren für Nahtkontrolle). [Grim12] Die In-Prozess-Kontrolle, welche direkt die Signale des Prozesses aufnimmt (bspw. Prozessemissionen), ist im Hinblick auf kurze Regelkreise entlang der Prozesskette oder gar für die Ableitung von Regelstrategien für die direkte Prozessbeeinflussung unabdingbar und damit auch am interessantesten für die Entwicklung neuer Sensorkonzepte. So wird bspw. beim Laserstrahlschweißen die Analyse der Wechselwirkungszone durch Photodioden, durch Spektrometer oder mithilfe von bildgebenden Sensoren weitverbreitet durchgeführt. Weiterhin sind für die Aufnahme der Prozessemissionsanteile die Begriffe on-axis, welche koaxial erfolgt, und off-axis, welche quasikoaxial ($< 10^\circ$) oder durch laterale Anordnung der Sensoren gekennzeichnet ist, definiert. Anzustreben sind die on-axis Lösungen, da dabei im Vergleich zu den anderen Anordnungen die geringsten Störkonturen am Bearbeitungskopf erzeugt werden. [Grim12]

Bisherige Arbeiten zur In-Prozessüberwachung und Prozessanalyse beim Laserstrahllöten zeigen verschiedene Ansätze. So wurde in [Hane96] ein mittels zweier Einfarbenpyrometer geregelter Laserlötprozess von unverzinkten Stahlblechen gezeigt. Allerdings erfolgte das Löten mithilfe einer von der Lotzuführung örtlich getrennten Bestrahlung der Werkstoffe (Zweistrahlanordnung) und damit über einer indirekte Erwärmung des Lotbades durch Wärmeleitung. Als Regelgröße diente dabei die Ist-Temperatur der beiden Fügepartner, welche bei einem Abweichen von einer vorgegebenen Solltemperatur über die Laserleistung des jeweiligen Teilstrahles nachgeregelt wurde. Ein Zusammenhang zu Nahtunregelmäßigkeiten wird nicht gegeben. Dasselbe Regelkonzept, d.h. ebenfalls vorlaufende Messung der Oberflächentemperatur allerdings basierend auf der Einstrahltechnik und an Nickel- und Kobaltbasislegierungen, wird in [Hafe95] geschildert. Die pyrometerbasierten Laserleistungsregelungen haben sich nach [Grim12] bisher in der Automobilindustrie nicht durchgesetzt. Dennoch liefern sie Erkenntnisse, die den Prozess des Laserstrahl lötens näher beschreiben. So finden sich in [Orli96] Temperaturmessungen mittels Pyrometer an fünf bis acht verschiedenen Positionen ± 2 mm um und auch direkt in der Prozesszone, welche für das eingesetzte Silberlot eine punktuell erfasste Temperaturverteilung quer und längs zur Naht liefern. Die Messungen zeigen dabei steile Temperaturgradienten (Änderungen bis zu 400°C innerhalb von ± 1 mm), sowie eine kleine Temperatureinflusszone mit kurzen Aufheiz- und Abkühlphasen. Für einen stabilen Prozess sind demnach eine

genaue Positionierung von Laser zu Draht und die Einhaltung der Prozessparameter zwingend erforderlich. Der Bezug von Sensorkonzepten zur Entstehung von Nahtfehlern wird in [Grim07, Grim12] erläutert. So konnte gezeigt werden, dass mittels pyrometrischen Messungen auch Rückschlüsse auf Nahtimperfectionen möglich sind. Darüber hinaus lieferten Thermografieaufnahmen erste Hinweise, dass auch ein asymmetrisches Temperaturfeld die Ursache von Nahtfehlern, wie bspw. einseitiger Benetzung, ist [Grim12]. Zusätzlich zeigt [Grim08], dass nicht nur die Laserleistung, sondern auch die Position von Laser und Fuge, anhand dieser Temperaturinformation geregelt werden kann. Weiterhin wurden mittels Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zyklische Benetzungsmechanismen, sowie die Entstehung von Oberflächenporen bei Störung dieses Vorganges entdeckt und mehrfach veröffentlicht [Grim08, Dons09, Unge10]. Auch wurden bildgebende Sensoren und zugehörige Algorithmen zur Regelung eines konstanten Verhältnisses von Draht- zu Vorschubgeschwindigkeit integriert und dadurch die Nahtqualität verbessert [Unge13]. Schließlich untersuchte [Grim12] ausführlich geeignete Sensorikmöglichkeiten (mittels räumlich integrierenden sowie bildgebenden Sensoren) für gezielte Prozessüberwachungen beim Laserstrahlhartlöten am geraden Bördelstoß. Industrietauglich umgesetzt wurde in dieser Arbeit eine Variante zur Prozessüberwachung mittels zweier fest an der Optik installierter Pyrometer. Diese sind zwar kostengünstiger als bildgebende Sensoren, allerdings müssen sie anfangs aufwendig positioniert bzw. integriert werden. Dies betrifft besonders die von [Grim12] empfohlenen kleinen Messfeldgrößen. Sie sollten aufgrund der örtlich begrenzten Wärmeeinbringung nicht zu weit vom Benetzungsort der Schmelzfront entfernt sein, um ausreichend Temperatursignal zu detektieren. Andererseits dürfen diese nicht zu nah an der Interaktionszone zwischen Lot und Grundwerkstoff positioniert sein, da Störungen durch die zyklischen Schmelzbadbewegungen zu erwarten sind. Die Signale lieferten weiterhin Abweichung vom Idealzustand bei erheblicher Leistungsveränderung ($> \pm 700 \text{ W}$), was ebenfalls zur Überwachung des Laserlötprozesses genutzt werden könnte. Letztlich wurde eine Ausregelung der lateralen Bahnabweichungen über Stellmotoren entwickelt.

2.4 Lötverfahren im Großserienumfeld des Karosseriebaus

In den letzten 10 bis 15 Jahren haben sich die Lötverfahren mit höheren Energiedichten gegenüber konventionellen Verfahren aufgrund ihrer erzielbaren Geschwindigkeiten (bis ca. 3 m/min) und sehr guten Oberflächenqualitäten in der Großserie vor allem im Außenhautbereich etabliert. Neben dem Laserstrahllöten hat sich im Karosseriebau das Plasmatronlöten, besonders aufgrund seiner relativ niedrigen Investitionskosten für einige Applikationen (bspw. Wasserkanal) durchgesetzt [Kall02]. Beim Plasmatron wird der Plasmalichtbogen im Vergleich zu den herkömmlichen Plasmavarianten ähnlich dem WIG-

Verfahren vor der Düse erzeugt, wodurch die thermische Belastung der Düse wesentlich geringer ist (siehe Abbildung 2.16).

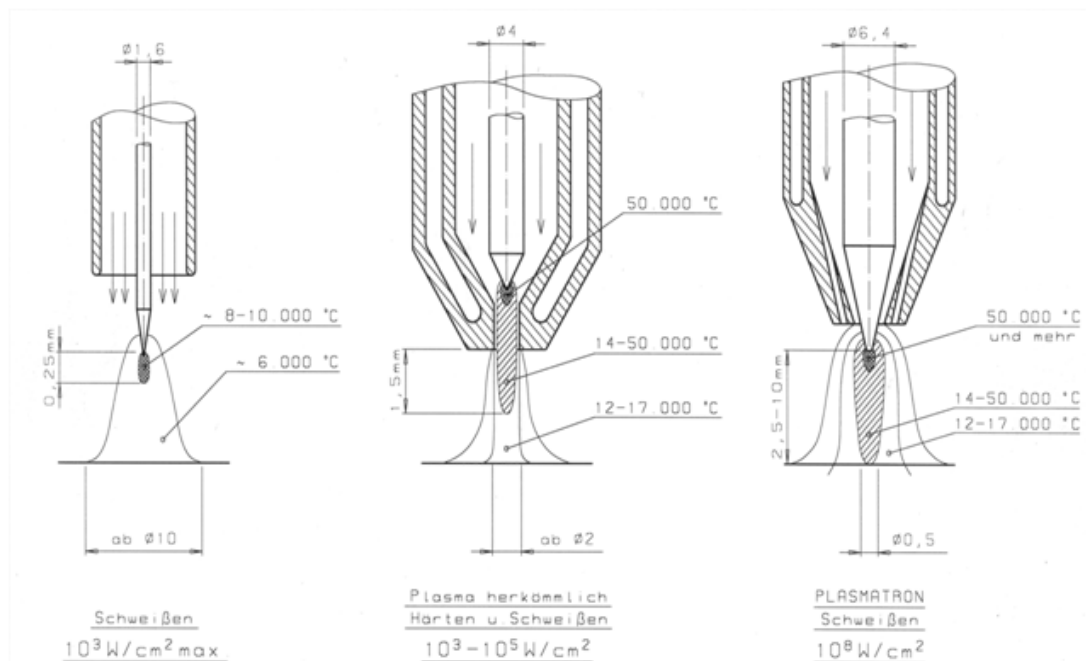


Abbildung 2.16 Prinzip WIG-Brenner (links), Plasma konventionell (Mitte) und Plasmatron (rechts)

Weiterhin ist die Leistungsdichte des Plasmasbogens signifikant höher gegenüber den konventionellen Prinzipien. Durch zusätzliche konische Bohrungen in der Düsen Spitze und die damit veränderte Gasführung im Brenner wird der Plasmasbogen „quasi eingeschnürt“ und der Wirkfokus-Durchmesser wesentlich kleiner ($\approx 0,5\ \text{mm}$). Diese charakteristischen Merkmale ermöglichen die Substitution der Laserverfahren an geeigneten Stellen im Karosseriebau. [Kall02] Weitere Entwicklungen zum Lichtbogen- bzw. Plasmalöten mit höheren Energiedichten basieren auf einer neuartigen Kühlung der Kathodenspitze [Rose08]. Dabei wird die Kathode so stark gekühlt, dass sich der Bereich der Elektronen-Thermoemission an die Kathodenspitze verschiebt und sich der Lichtbogenansatz selbst fokussiert [Schn10]. Durch die Kontraktion des Lichtbogens sind deutliche Steigerungen der Energiedichte und höhere Stabilitäten der Lichtbogensäule erreicht worden [Fuen07, Schn10]. Mit diesem Prinzip konnten gute Ergebnisse im Labor (Lötnähte mit Class-B-Qualität bis $7\ \text{m/min}$) am Kehlnahtstoß [Krin11], sowie erste vielversprechende Resultate an originalen PKW-Demonstrator-Bauteilen (Wasserablaufkanal) erzielt werden [Hueb10].

Im Allgemeinen zeichnen sich die Verfahren mit höheren Energiedichten gegenüber konventionellen Lötverfahren wie bspw. MIG- oder WIG-Löten besonders durch größere Bearbeitungsgeschwindigkeiten, durch höhere Automatisierbarkeit, geringere Energieeinbringung und damit weniger Verzug sowie durch höher erzielbare Nahtqualitäten aus. Daher sollen nachfolgend die beiden weitverbreiteten Verfahren Laserstrahllöten und Plasmalöten

(im speziellen Plasmatron) gegenübergestellt werden. Für die ausführliche Darstellung der allgemeinen Vorteile der hochenergetischen Lötverfahren (besonders des Laserstrahlhartlötens) sei an dieser Stelle auf das Kapitel 2.3 verwiesen.

Tabelle 2.4 Spezifische Nachteile der beiden Verfahren im direkten Vergleich

Laserstrahllöten	Plasmalöten
<ul style="list-style-type: none"> • aufwendige Laserschutzmaßnahmen • höhere Investitionskosten • geringere Abschmelzraten • stärkere Spaltanfälligkeit • geringere Verbindungsmaße • Anfälligkeit bei Verschmutzung der Optiken 	<ul style="list-style-type: none"> • höherer Energieeintrag • größerer Verzug • höhere Gefahr der Rissbildung • Spritzerbildung • festhaftender Schmauch • stärkere Porenanfälligkeit bei höheren Geschwindigkeiten • Kathoden- und Düsenverschleiß • Anfällig bei Magnetfeldern • Plasma- und Schutzgaskosten • hochfrequenter Wechselspannungsimpuls kann elektronische Bauteile stören

Die beiden Verfahren haben aufgrund der Art ihrer Energieerzeugung und -übertragung spezifische Eigenschaften, welche in unterschiedlichen Vor- und Nachteilen resultieren. Tabelle 2.4 zeigt die Nachteile der Verfahren gegenüber dem jeweilig anderen. Allen Laserverfahren ist gemein, dass ein hoher Aufwand für den Gesundheitsschutz (Lasersicherheit) besonders im nahen für das menschliche Auge sichtbaren Wellenlängenbereich (Nahes Infrarot $\approx 1 \mu\text{m}$) sowie bei immer stärker verbesserten Strahlqualitäten der Laser betrieben werden muss. Zusätzlich sind hohe Investitionskosten für den Laser, die Optiken und die Strahlführung zu tätigen. Gegenüber dem Plasmalöten zeichnet sich dieses Fügeverfahren jedoch durch den nochmals verringerten konzentrierten Energieeintrag aus, welcher ohne Strömungs- und Magnetfeldeinflüsse der Prozesszone zugeführt wird und weniger Verzug im Bauteil hervorruft. Weiterhin ist die erreichbare Nahtqualität besonders hinsichtlich glatter Oberflächen, Porenaufkommen, Rissen sowie Spritzerbildung erhöht, was damit zu geringeren Nacharbeitsaufwendungen und weniger Kosten über Laufzeit führt. Auch die Kosten für Verschleißteile (bspw. Schutzgläser der Optiken beim Laserstrahllöten) oder bei den Plasmaverfahren der Kathodenverschleiß und die Prozessgaskosten müssen genauestens über die Laufzeit betrachtet werden. Die optischen Anforderungen an die Füge-naht sowie die konstruktiven Gegebenheiten am Gesamtfahrzeug stellen weitere Einschränkungen dar, sodass unter Einhaltung der jeweiligen Qualitätsansprüche und Wirtschaftlichkeit die beiden Verfahren im Karosseriebau an unterschiedlichen Stellen zum Einsatz kommen. Das Laserstrahllöten hat sich bei der Dachnahtfuge und der zweigeteilten

Heckklappe durchgesetzt, das Plasmatron-Verfahren hingegen beim Wasserablauf bzw. Wasserkanal.

Bei Geschwindigkeiten bis 3 m/min können beide Verfahren am Bördelstoß der Dachnullfuge im Großserienbetrieb eingesetzt werden, wobei jedes Verfahren seine spezifischen Vorteile hinsichtlich der Nahtqualität besitzt. So können mit dem Laserstrahllöten beispielsweise sehr glatte Nähte ohne Randkerben erreicht werden, wohingegen beim Plasmatron höhere Anbindungslängen mit größeren minimalen Verbindungsbreiten entstehen. Besonders bei der Eckumlötung können mit dem Plasmatron-Verfahren beide Flanken der Fügepartner auch bei größeren Spalten erwärmt werden, wodurch allerdings aufgrund des höheren Energieeintrags die Gefahr von Verzug und Rissanfälligkeit gegenüber der konzentrierten Energieeinbringung des Laserstrahllöten steigen.

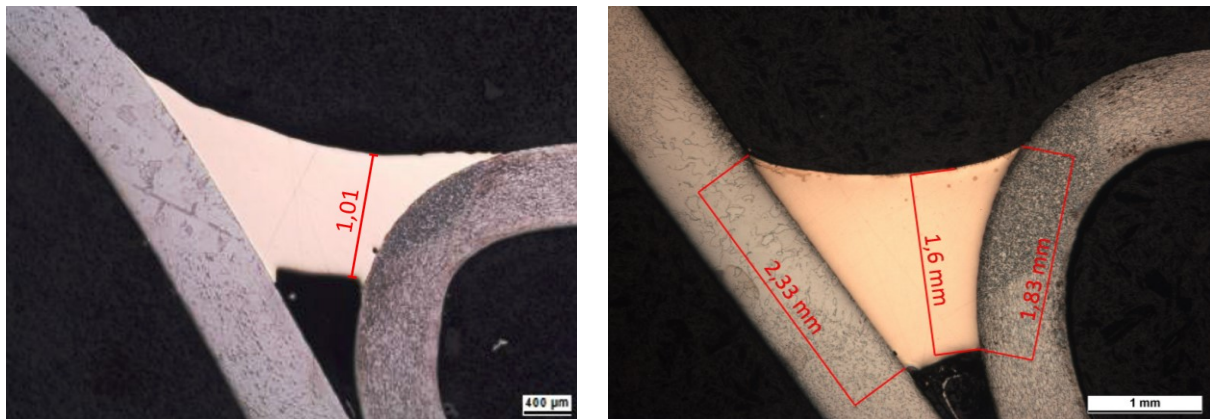


Abbildung 2.17 Vergleich Nahtqualität von Laserstrahllöten (links) gegenüber Plasmatron (rechts) am Bördelstoß im Querschliff (Verfahrensgeschwindigkeit 3 m/min)

Abbildung 2.17 zeigt exemplarisch die erreichbaren Nahtqualitäten der beiden Verfahren im Querschliff. Daraus ist ersichtlich, dass beim Laserstrahllöten der Grundwerkstoff wesentlich weniger beeinflusst wird (Grobkornzone im GW). Dies ist sehr positiv zu bewerten, da dadurch die Rissanfälligkeit sinkt (siehe Abschnitt 2.6.3). Da die aus dem Fügeprozess entstehende Lötverbindung allerdings sämtliche Einflussfaktoren der vor- sowie nachgelagerten Prozesse (bspw. Schleifprozesse) „unbeschadet“ überstehen muss, wird ein möglichst großer tragender Querschnitt (gegeben durch die minimale Verbindungsbreite) von > 1 mm angestrebt. Da der Anbindungsquerschnitt mit zunehmendem Energieeintrag erhöht werden kann [Kreu97], stellt die Forderung nach einem maximalen Anbindungsquerschnitt gegenüber einer minimalen Wärmeeinflusszone zum Vermeiden der Rissanfälligkeit einen Widerspruch dar. Des Weiteren sollen zukünftig auch schnellere Vorschubgeschwindigkeiten (> 3 m/min) im Großserienumfeld unter Beachtung der höchsten Nahtqualitäten realisierbar sein. Diese Anforderungen werden in dieser Arbeit mittels eines neuartigen Ansatzes des Laserstrahllöten für den Bördelstoß der Dachnullfuge, welcher die Vorteile der beiden

obengenannten Verfahren miteinander kombinieren soll, an verzinkten Stahlblechen untersucht.

2.5 Qualitätsanforderungen bzw. Kriterien an die Fügetechnik

2.5.1 Allgemeine Anforderungen nach Normen und Prüfvorschriften

Beim Laserstrahlhartlöten, vor allem bei Verbindungen im Sichtbereich des Kunden, sind die höchsten Qualitätskriterien im Karosseriebau zu erfüllen. Einige Unregelmäßigkeiten bzw. sogenannte Nahtimperfectionen können je nach Anwendungsfall die Funktionalität und das äußere Erscheinungsbild der Fügeverbindung stark beeinträchtigen. In diesem Fall erfordern sie einen erhöhten (oftmals manuellen) Nacharbeitsaufwand, welcher wiederum mit hohen Kosten verbunden ist. Daher sind Unregelmäßigkeiten möglichst zu vermeiden. Eine genaue Kenntnis und Klassifizierung dieser Unregelmäßigkeiten ist notwendig, um sowohl die Diskussion ihrer Entstehung als auch die Analyse möglicher Gegenmaßnahmen zu vereinfachen. Nach [DIN EN ISO 18279] können die Nahtimperfectionen hartgelöteter Verbindungen in sechs Gruppen eingeteilt werden: Risse, Hohlräume, feste Einschlüsse, Bindefehler, Form- und Maßabweichungen sowie sonstige Unregelmäßigkeiten. Die in den einzelnen Gruppen enthaltenen Unregelmäßigkeiten werden nach dieser Norm weiterhin in äußere und innere Unregelmäßigkeiten untergliedert (siehe Tabelle 2.5).

Tabelle 2.5 Innere und äußere Unregelmäßigkeiten in hartgelöteten Fügeverbindungen [DIN EN ISO 18279]

Äußere Unregelmäßigkeiten	Innere Unregelmäßigkeiten
<ul style="list-style-type: none"> • Eingefallene Lötnaht • Risse • Offene Porosität • Unzureichende Hohlkehle • Lötgutüberlauf • Lokales Anschmelzen des GW • Raue Lötnahtoberfläche • Ausblühungen • Verfärbungen • Spritzer • Flussmittelreste • Erosion in der Oberfläche des GW 	<ul style="list-style-type: none"> • Risse • Füllfehler • Feststoffeinschlüsse • Gaseinschluss • Flussmitteleinschluss • Bindefehler • Übermäßige Anlösung des Lotes und des GW (teilweise als Erosion bezeichnet)

Die einzelnen Unregelmäßigkeiten sind für die jeweilige Applikation zu priorisieren. Außerdem sind nicht nur aufgrund der möglichen Größe und Lage der einzelnen Nahtimperfectionen (vor allem der Poren und Risse), sondern auch aufgrund der Beanspruchungsart der gefügten Baugruppe im späteren Betrieb die zulässigen Toleranzen für den jeweiligen Anwendungsfall möglichst genau zu definieren.

In der Literatur [Grim12, Unge10, Kimu06] werden vor allem die äußeren Nahtmerkmale (bspw. Schuppigkeit und Oberflächenporen) beurteilt. So werden hohe Geschwindigkeiten publiziert, die allerdings keinen direkten Aufschluss auf die Qualität im Nahtinneren zulassen. In diesem Bereich können allerdings Unregelmäßigkeiten wie Poren, welche mit zusätzlichem Aufwand beseitigt werden müssen, sowie irreparable Schäden der Naht (Risse) auftreten. Diese sind daher im Nachfolgenden auch hinsichtlich Ihrer bisher bekannten Entstehungstheorien genauer erläutert.

2.5.2 Poren

Für das Auftreten von Poren beim Laserstrahlhartlöten verzinkter Stahlbleche am Bördelstoß gibt es im Wesentlichen zwei bekannte Entstehungsursachen, zum einen durch in der Naht verbleibende Zinkausgasungen und Gaseinschlüsse [Kais09, Kimu06, Hane96, Dons09] sowie zum anderen durch Schmelzbadturbulenzen aufgrund von unstabiler Benetzung [Unge10; Dons09; Grim09, Kimu06, Feng08, EQOS11].

Die Ausgasungen der elektrolytisch aufgetragenen Verzinkung der Stahlbleche sind auf die hohen Temperaturen ($> 900^{\circ}\text{C}$) beim Laserstrahllöten in der Fügezone zurückzuführen. Diese Temperaturen werden benötigt, um den Kupferbasiszusatzwerkstoff aufzuschmelzen. Der Schmelzbereich vom aktuell eingesetzten Draht CuSi28L liegt dabei mit $910 - 1025^{\circ}\text{C}$ über der Verdampfungstemperatur von Zink (906°C) [Kimu06]. Die entstehenden Ausgasungen des Zinkdampfes können durch das sehr schnelle Erstarren des Lotes, vor allem bei hohen Bearbeitungsgeschwindigkeiten, nicht vollständig aus der Fügezone entweichen und werden im Lötgut eingeschlossen [Kimu06; Feng08]. Dies wurde anhand von Zinkrückständen an einer Pore in [Kais09] und auch an Fehlstellen in den Untersuchungen von [Kimu06] mittels EDX-Analyse nachgewiesen. Zusätzlich wird vermutet, dass Verschmutzungen und Umgebungsluft ins Lötgut gelangen und verbleiben können.

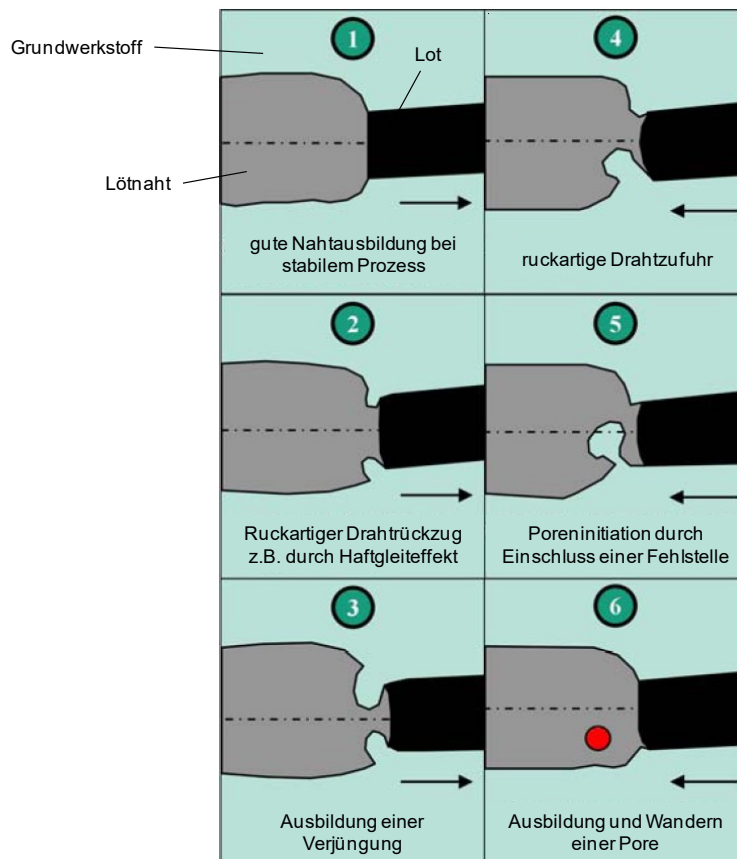


Abbildung 2.18 Porenentstehung (schematisch) durch Ausbildung einer Verjüngung infolge diskontinuierlicher Drahtzuführung [Dons09]

Ein weiterer Mechanismus zur Porenentstehung basiert nach [Unge10; Dons09; Grim09, Kimu06] auf einer Ausbildung einer Verjüngung bzw. Einschnürung aufgrund von einer un stetigen Drahtzufuhr. In [Dons09] wird diese Form der Porenbildung in 6 Stadien unterteilt (siehe Abbildung 2.18). Teilbild 1 zeigt einen stabilen Laserstrahlötprozess. Wird der Draht bspw. durch den Slip-Stick-Effekt abgebremst oder un stetig gefördert, zieht dieser sich aufgrund der konstanten Relativgeschwindigkeit gegenüber dem Grundwerkstoff aus dem Schmelzbad zurück. Durch das fehlende aufgeschmolzene Zusatzmaterial entsteht eine Einschnürung und dies bewirkt eine kurzzeitige Unterbrechung des Benetzungsvorganges (Teilbild 2 und 3). Eine anschließende Erhöhung der Drahtzufuhr kann diese Einschnürung unter Umständen beseitigen und nicht benetzte Bereiche wieder auffüllen (Teilbild 4), jedoch besteht die Möglichkeit, dass sich aufgrund der Oberflächenspannung an der Benetzungsfehlstelle eine Oberflächenpore ausbildet (Teilbild 5 und 6). Diese Oberflächenpore durchdringt als eine Art Schlauchpore oft den gesamten Nahtquerschnitt. Infolge des Temperaturgradienten innerhalb der Lötnaht, welcher vom „kalten“ Grundwerkstoff zur „heißen“ Schmelzbadmitte besteht, nimmt die Oberflächenspannung zur Nahtmitte hin ab. Die entstandene Pore folgt daher diesem Gradienten, driftet in Richtung Nahtmitte und erstarrt mit der Lötnaht. Die Poren können einzeln, als Porennest sowie als parallel angeordnete Doppelpore auftreten [EQOS11]. Nach [Unge10; Dons09] kann der

Benetzungsvorgang mit der Erhöhung der Drahtfördergeschwindigkeit sowie einer verbesserten Positionierung von Laserstrahl zu Draht und Fuge stabilisiert werden. Somit ist es möglich diesen Entstehungsmechanismus weitgehend zu unterbinden. Dennoch können Poren und andere Nahtimperfectionen aufgrund von äußeren Einflüssen sporadisch und unvorhergesehen auftreten. Die Haupteinflussfaktoren sind nach [Unge10]:

- unstetes Verhältnis von Drahtzufuhr- zu Prozessgeschwindigkeit
- Fehlerhafte Ausrichtung von Draht, Laserspot und Lötfläche in lateraler und/oder vertikaler Richtung
- niedrige Drahtzuführgeschwindigkeiten (kleiner als Lötgeschwindigkeit)
- instabile Drahtbewegung in lateraler und/oder vertikaler Richtung, bspw. aufgrund eines zu großen Drahtdüsendurchmessers

Die in der Literatur beschriebenen Phänomene beschreiben hauptsächlich die relativ einfach detektierbaren Oberflächenporen. Wesentlich schwieriger ist das Erkennen von Poren oder anderen Nahtimperfectionen, welche sich unterhalb der Oberfläche im Nahtinneren befinden und im weiteren Fertigungsverlauf erhebliche Nacharbeit verursachen können. So werden bspw. dicht unter der Oberfläche liegende Poren direkt im Anschluss an die Lötung beim automatisierten oder manuellen Schleifen aufgedeckt und müssen nachgearbeitet werden. Weiter tiefer liegende oder zugeschmierte sowie nicht detektierte Poren können in den Lackierereiföfen durch expandierende eingeschlossene Gase aufplatzen und verursachen schwere bzw. aufwendige und damit sehr teure Nacharbeit.

Des Weiteren sind die Entstehungsursachen dieser Poren im Nahtinneren, sowie das Verhalten bei höheren Geschwindigkeiten ($> 3 \text{ m/min}$) und den speziellen geometrischen Verhältnissen der Dachnaht weitestgehend ungeklärt. Diese Geschwindigkeiten werden allerdings für eine wirtschaftliche Automobilfertigung immer häufiger angestrebt. Zudem sind die meisten Untersuchungen ohne die Betrachtung der für die Nahtqualität bestimmenden Maße (Anbindungslänge und Lötnahtdicke, siehe Kapitel 2.6.1) durchgeführt wurden, was wiederum für die Fertigung im Premiumsegment des Automobilbaus nicht akzeptabel ist.

2.5.3 Risse bzw. Lötbrüchigkeit

An dieser Stelle sollen nicht die bekannten Heiß- und Kaltrisse, wie sie beim Schweißen vieler Werkstoffe eine Rolle spielen, sondern lötspezifische Phänomene erläutert werden. Beim Löten von kaltverformten Stahlbauteilen mit kupfer- und zinkhaltigen Lotwerkstoffen ist bekannt, dass bei Temperaturen oberhalb von 900°C die gefährliche Lötrissigkeit oder Lötbrüchigkeit, welche zum vollständigen Versagen der Lötverbindung führt, auftreten kann. [Barg08, SLV07, Kru97, Frit10]

Nach [VDI 3822] ist diese Lotbrüchigkeit einer interkristallinen Spannungsrissskorrosion in Elektrolytlösungen sehr ähnlich. Abbildung 2.19 zeigt die lötrissfördernden Faktoren. [Ehm08]

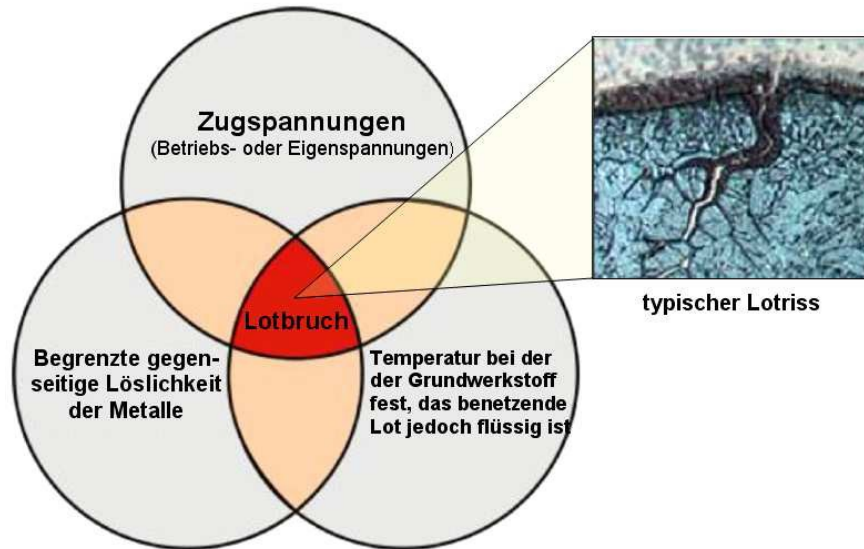


Abbildung 2.19 Lötrissfördernde Faktoren [Ehm08]

Eine Grundvoraussetzung für die Lötbrüchigkeit ist die begrenzte gegenseitige Löslichkeit der Metalle, sodass das Lot bevorzugt über Korngrenzen interkristallin eindringt (siehe Kapitel 2.2.2.3, Korngrenzendiffusion). Des Weiteren begünstigen höhere Temperaturen, bei denen der Grundwerkstoff noch fest, das benetzende Lot jedoch dünnflüssig ist, die Diffusionsgeschwindigkeiten. Treten zudem Zugspannungen (Betriebs-/Eigenspannungen) im Fügebereich auf, kann es zur Rissbildung kommen. Die erforderliche Mindestspannung zur Auslösung der Loteindringung beträgt 150– 180 N/mm² [Kreu97]. Im Allgemeinen lassen sich bei thermischen Fügeprozessen diese Spannungen nicht vermeiden. Speziell die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der beteiligten Werkstoffe beim Löten von verzinkten Stahlblechen mit Kupferbasisloten führen zu Spannungsfeldern, welche nach [Math10] zusätzlich die Gefahr der Bildung von Querrissen erhöhen. Tendenziell steigt mit zunehmender Härte des Stahles und durch stark umgeformte Bereiche die Tendenz zur Loteindringung in verzinkten Stahlblechen [Ehm08]. Weiterhin lässt sich ein Zusammenhang zwischen zu- bzw. abgeführter Wärmemenge und der Ausbildung von Lötrissen erkennen. So bilden sich nach [Ebbi98] bei größerer Wärmeableitung und/oder geringerer Energieeinbringung signifikant kleinere bzw. gar keine Risse aus. Spezielle Zusätze im Lot, z.B. Nickel, können ebenfalls die Lötbrüchigkeit reduzieren, andere wie vor allem Kupfer und Zink wirken verstärkend. Mikroanalytisch lassen sich bspw. durch EDX-Analyse diese Bestandteile bei Loteindringung im Riss nachweisen. In [SLV07] veröffentlichte Untersuchungen zum WIG-Löten an verzinkten Stahlblechen mit Kupferbasislot zeigen

Loteindringungen mit einer Zusammensetzung von ca. 1/3 Zink und 2/3 Kupfer (siehe Abbildung 2.20).

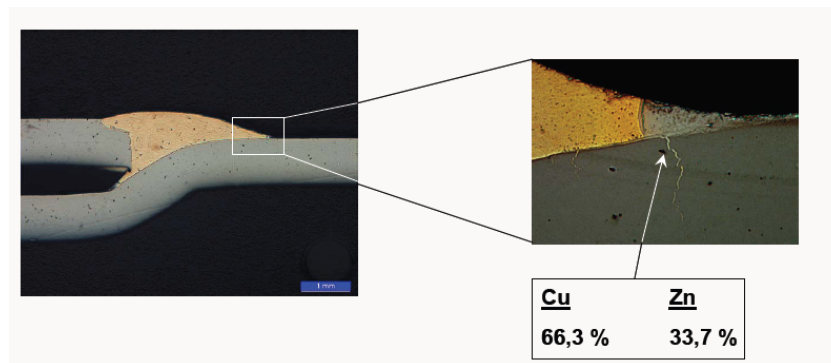


Abbildung 2.20 EDX-Analyse eines zugelaufenen Risses an einer WIG-Lötung [SLV07]

Weiterhin werden in [SLV07] die Risse in verschiedene Ausprägungsformen unterteilt:

- Loteindringungen / gefüllte Risse
- Ungefüllte Risse
- Verzweigte und unverzweigte Loteindringungen

Die Loteindringungen (gefüllte Risse) befinden sich bei allen Lichtbogenlötverfahren und unabhängig vom Lötwerkstoff häufig unterhalb der Naht und sind von außen nicht detektierbar. Einzelne Loteindringungen wurden, in einem von Lot nicht bedecktem Bereich, direkt neben der Naht gefunden. Gänzlich ungefüllte Risse, welche im Vergleich mit gefüllten Rissen oft deutlich breiter sind, treten ausschließlich außerhalb der Naht auf. An den Rissflächen konnten zudem Lotbestandteile nachgewiesen werden, was darauf hindeutet, dass diese Risse ebenfalls durch Loteindringungen verursacht werden. Als Vermutung wird die Zinkverdampfung mit zunehmender Erwärmung (ab etwa 900°C) aufgeführt, welche einen ungefüllten Riss entstehen lässt. Der Nachweis von Zinkrückständen an den Bruchflächen wurde allerdings nicht erbracht. Eine Unterscheidung zwischen Loteindringung (mit Lot gefüllte Korngrenzentrennung) und Riss (ungefüllte Trennungen) wird empfohlen und soll auch in dieser Arbeit weiterhin so gebraucht werden. Des Weiteren lassen sich die Loteindringungen in stark verzweigte und relativ gerade verlaufende Ausprägungen unterscheiden. Häufig liegt die Ausprägungsrichtung der „Hauptloteindringung“ unter 45° schräg zur Löttrichtung und die meisten Risse sowie Loteindringungen wurden bei Bördelnähten im oberen (zur Wärmeeintragsseite gerichteten) Bereich der Radien detektiert. Aus der Art der Beschichtung (Verzinkungsart) konnten dagegen keine Rückschlüsse auf die Rissausbildung gefunden werden. Daher wird als Vermeidungsstrategie zu der Verwendung von Loten mit niedriger Arbeitstemperatur geraten [Barg08, Frit10, SLV07, Kreu97], worauf auch einige Entwicklungen abzielen [Dilt00]. Dies ist allerdings beim Löten von verzinkten Stahlblechen unter bestimmten Festigkeitsanforderungen bisher nicht umsetzbar (siehe

Kapitel 2.7.3). Sind die Haupteinflussfaktoren (Werkstoffkombination, Arbeitstemperaturen, Spannungen) unumgänglich, sollten eine geringe Überschreitung der Löttemperatur, kurze Lötzeiten und ein Abbau der inneren Spannungen in den zu fügenden Bauteilen angestrebt werden [Kreu97]. In der Literatur lassen sich bis auf [Kreu97] allerdings keine Hinweise auf Rissbildung und Loteindringung beim Laserstrahlhartlöten finden. Dieses Verfahren bietet aufgrund seiner kurzen Strahl-Stoff-Wechselwirkungszeiten generell den Vorteil diese Phänomene zu unterdrücken, was sich allerdings bei Veränderung des Energieeintrages bspw. durch Strahlformung gegebenenfalls ändern kann.

2.5.4 Oberflächenfehler

Neben den schwer detektierbaren Poren und Rissen im Inneren der Naht, lässt sich die Laserlötnahtqualität an der Oberfläche durch Sichtprüfung relativ einfach bestimmen. Nachfolgend sind in Abbildung 2.21 die wichtigsten an der Nahtoberfläche sichtbaren Fehler am Bördelstoß aufgeführt.



Abbildung 2.21 Art und Ausprägung unterschiedlicher Imperfectionen am Bördelstoß [EQOS11]

Auf die Oberflächenporen und Benetzungsfehler wurde im Kapitel 2.5.2 näher eingegangen, daher sollen sie an dieser Stelle nicht näher erläutert werden. Zusätzlich können Fehler, wie ausgeprägte Groschuppig- und/oder Randkerbigkeit, wellige Nahtoberflächen und nicht aufgeschmolzene Drahtstücke auftreten. Der Haupteinflussfaktor für diese Oberflächenfehler ist nach [EQOS11] die Laserleistung, welche je nach Absorptionsbedingungen der Prozesszone zugeführt wird. Ist die Energiemenge zu gering, werden die Grundwerkstoffe nicht ausreichend vorgewärmt und der Zusatzwerkstoff nicht genügend abgeschmolzen bzw. nicht

niedrigviskos genug, um gut zu benetzen und glatte Oberflächen auszubilden. Die sich unter Umständen bildenden Ablagerungen und Oxide an der Nahtoberfläche sind weniger kritisch, da sie nach dem Überlackieren nicht mehr sichtbar sind oder gegebenenfalls durch an den Lötprozess anschließende Schleifbearbeitungen ohnehin entfernt werden. Oxide, welche sich von vornherein auf dem Draht befinden können allerdings die Absorptionsbedingungen der Laserstrahlung und damit den Lötprozess beeinflussen [Bran03]. Ein übermäßiges Anschmelzen des Grundwerkstoffs sowie Auswürfe bzw. Spritzerbildung sind generell zu vermeiden.

2.6 Werkstoffeinfluss

2.6.1 Grundwerkstoff

Im Karosseriebau kommen bei Sichtteilen oftmals Tiefziehstähle zum Einsatz. Diese bieten aufgrund ihrer hervorragenden duktilen Eigenschaften die Möglichkeit, Bauteile mit höchster Umformkomplexität herzustellen. Zusätzlich ermöglichen vor allem die kaltgewalzten Tiefziehgüten, durch ihre gezielt einstellbaren Oberflächenstrukturen, große Designfreiheiten beim Einsatz im Außenhautbereich des Automobilbaus, bspw. für Kotflügel, Türbleche, Seitenwandrahmen und Dach. [Thys13, Ruge07] Die extrem niedriggekohlten Stähle (DC06 und DC07) mit einem Kohlenstoffgehalt von $< 0,02\%$, zeigen keinerlei Fließfiguren beim Umformen, da die Elemente Kohlenstoff und Stickstoff vollständig durch Titan und Niob abgebunden sind [Barg08]. Um diese sehr geringen Kohlenstoffgehalte für höchste Umformbarkeit herstellen zu können, wurden neben modernsten und hochreinen Stahlerschmelzungsmethoden eine Reihe von Sekundärmaßnahmen (bspw. Zugabe der speziellen Elemente über Vakuumanlagen) entwickelt. Die erzeugten Tiefziehstähle zeigen dabei je nach Tiefziehgüte ein rein ferritisches Gefüge oder bestehen aus einer ferritischen Matrix, in die vereinzelt feinkörnige Karbide eingelagert sind. Zusätzlich sind diese Stähle mit hochwertigen Oberflächenveredelungen bzw. Beschichtungen sowie einer Beölung als Korrosionsschutz lieferbar. Zu beachten ist, dass diese Stahlsorten eine niedrige Betriebsfestigkeit aufweisen und sich bei starken Dehnungsüberhöhungen (Crash) unsensitiv verhalten. Daher sind sie durch energieabsorbierende Werkstoffe bzw. Bauteile in den Unterstrukturen zu ergänzen. [Thys13]

2.6.2 Beschichtung

Für die Herstellung eines verzinkten Stahlfeinbleches haben sich für Karosseriebauanwendungen folgende Verfahren etabliert:

- Feuerverzinken (Z) und

- Elektrolytisches Verzinken (ZE).

Feuerverzinkte Bleche werden dabei auf kontinuierlich arbeitenden Bandverzinkungsanlagen hergestellt. Das Grundwerkstoffblech wird zunächst in einem Durchlaufofen gereinigt, gegläht und anschließend gezielt abgekühlt. Zuletzt kommt es in das 400 – 450°C heiße Zinkbad, wo die eigentliche Schichtbildung aufgrund von Legierungsbildung stattfindet. Für die Schmelztauchüberzüge ist charakteristisch, dass sie als Gussstruktur erstarren und damit die entstehenden Zinkschichtdicken (7 – 20 µm) von Coil zu Coil im Bereich von mehreren Mikrometern variieren können. Auch die ausgebildete Oberflächenqualität kann Unterschiede aufweisen (hinsichtlich Ebenheit, Zinkrosen usw.). [Merk110]

Das Elektrolytische Verzinken basiert hingegen auf Absonderung von Metallen aus Lösungen ionisierter Metallsalze auf leitfähigen Untergründen. Bei dieser sogenannten Elektrolyse wird das gelöste Zink auf der Bandoberfläche abgeschieden. Die gewünschten Schichtdicken können dabei in Abhängigkeit von der Bandgeschwindigkeit und der Stromdichte zwischen 2,5 und 15 µm sehr gleichmäßig eingestellt werden. Da die Elektrolyse bei relativ geringen Temperaturen abläuft (< 80°C), wird die Gefügestruktur des Grundwerkstoffs im Gegensatz zum Feuerverzinken nicht beeinflusst. Zudem weisen elektrolytisch verzinkten Stahlbleche eine feinkristalline und hochreine Struktur auf (siehe Abbildung 2.22). [Ehm08, Thys13]

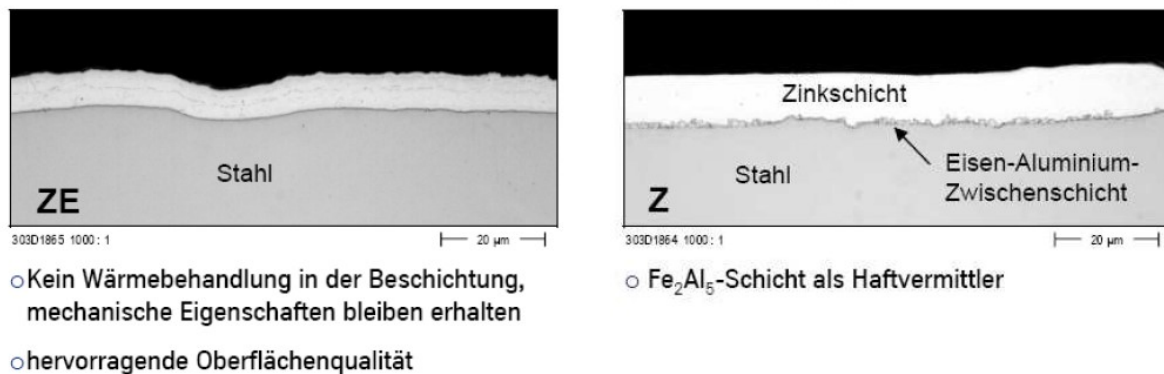


Abbildung 2.22 Elektrolytisch (ZE, links) und feuerverzinktes Feinblech (Z, rechts) [Ehm08]

In Abhängigkeit vom Einsatzbereich der Bauteile und von den Anforderungen hinsichtlich Korrosionsschutz, Lackierbarkeit und Umformvermögen wird eines der beiden Verfahren eingesetzt. Im Außenhautbereich haben sich aufgrund der zuvor erläuterten Vorteile die elektrolytisch verzinkten Stahlbleche durchgesetzt.

2.6.3 Zusatzwerkstoff

Die Schmelztemperatur des Lotes liegt unterhalb der Schmelztemperaturen der Grundwerkstoffe, für die Auswahl der Lotwerkstoffe sind daher nach [Dorn07] folgende Kriterien bestimmend:

- Art und Behandlungszustand der Grundwerkstoffe
- Abmessung und Herstelltoleranzen der Werkstücke
- die zur Durchführung der Lötarbeiten verfügbaren Betriebseinrichtungen
- die an den Verbindungsstellen auftretenden Belastungen
- Betriebstemperatur
- die an den Lötverbindungen angreifenden Medien
- Weiterverarbeitung der Werkstücke
- Arbeitssicherheit
- wirtschaftliche Fertigung

Zusammenfassend lässt sich sagen, die Auswahl des Lotwerkstoffes richtet sich nach dem angewendeten Fügeverfahren, den späteren Einsatzbedingungen des gelöteten Bauteiles und auch nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten [Kreu97]. Bei Loten kann es sich um Metalle oder Mehrstofflegierungen handeln, welche häufig aus Schwermetallen (Kupfer, Zink, Silber usw.) bestehen. Zum Einsatz kommen meistens eutektische oder naheutektische Legierungen, da diese niedrige Erstarrungstemperaturen bzw. kleine Erstarrungsintervalle haben. Wegen ihres schnellen Aufschmelzens und Erstarrens ermöglichen diese Lote kurze Lötzeiten und werden oftmals beim maschinellen Löten bevorzugt. Weitere Vorteile eutektischer Lote sind die hohe Festigkeit des feinkörnigen eutektischen Gefüges sowie der niedrigere Schmelzpunkt gegenüber reinen Metallkomponenten. [Barg08; Dorn07]

Abbildung 2.23 zeigt die wichtigsten Lotgruppen für das Weich-, Hart- und Hochtemperaturlöten. Daraus ist ersichtlich, dass, wenn eine gewisse Festigkeit für die Verbindung benötigt und damit im Hartlötbereich gearbeitet wird, nur Silber- und Kupferbasislote infrage kommen. Silberlote sind allerdings teuer und erfordern Flussmitteleinsatz, welches nach dem Löten gründlich entfernt werden muss, da es sonst die Lackhaftung negativ beeinflusst. Für den Karosseriebau haben sich aufgrund ihrer relativ hohen Festigkeit und relativ guten Löslichkeit mit Eisen und Zink (verzinkte Stahlfeinbleche) Kupferbasislote mit geringem Siliziumanteil etabliert. Diese können gegenüber den meisten anderen Loten ohne Flussmittel und auch ohne Schutzgas eingesetzt werden, was zudem wirtschaftliche Vorteile mit sich bringt [Hill98]. Kupferlote mit Phosphorzusätzen, mit denen die Arbeitstemperatur im Hinblick auf eine geringere Grundwerkstoffbeeinflussung weiter abgesenkt werden könnte, eignen sich dagegen nicht für die Stahlbearbeitung, da eine extrem spröde, zusammenhängende Eisenphosphidschicht entsteht, welche sehr stoß- und rissanfällig ist [Frit10, Barg08].

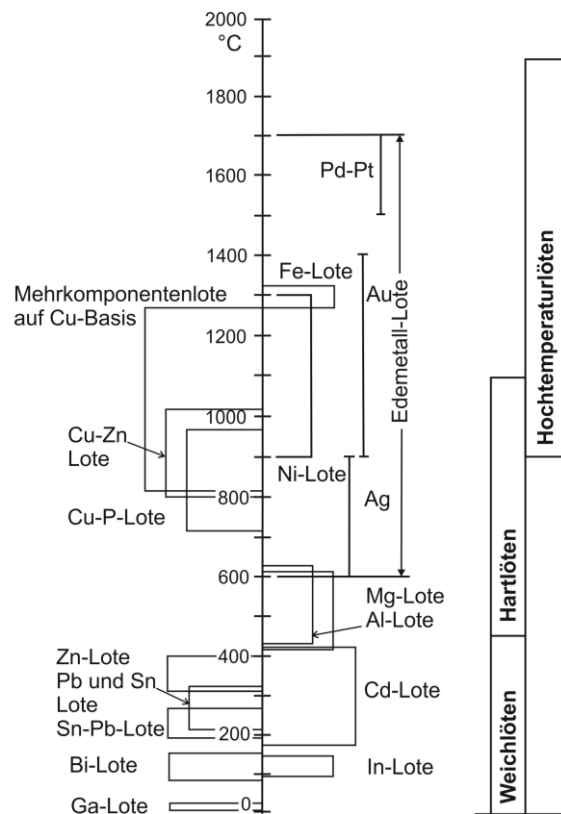


Abbildung 2.23 Wichtige Lotgruppen und deren Einsatztemperaturen [Dorn07]

An den Lotwerkstoff werden nach [Kreu97] im Hinblick auf den Laserstrahlhartlötprozess spezifische Anforderungen gestellt („laserstrahlgerechte Lotlegierungen“):

- ausreichende Duktilität zur einfachen Handhabung der Legierungen
- ausreichendes Fließvermögen um hohe Spaltfüllgrade zu erzielen
- Verwendung von Legierungsbestandteilen mit niedrigem Dampfdruck um die Abdampfungserscheinungen zu vermeiden
- geringes zeitliches Schmelzintervall, um sicheres Aufschmelzen der Lote bei kurzen Strahl-Stoff-Wechselwirkungszeiten zu erzielen
- niedrige Lottemperaturen, um Anschmelzen des Grundwerkstoffs zu vermeiden

Für den Laserstrahlhartlötprozess der Dachnulfuge bieten die Kupferbasiswerkstoffe nicht nur ausreichend hohe Festigkeiten und wirtschaftliche Vorteile (Schutzgas, Flussmittel), sondern auch durch die gute Löslichkeit und stoffschlüssige Verbindung einen hohen Korrosionsschutz der Verbindung [Merk235]. Ein Nachteil ist die relativ hohe Arbeitstemperatur (bspw. gegenüber Silberloten), da diese zu verstärkten Spannungen im Bauteil und zu verstärkter Korngrenzendiffusion führen kann [Kreu97].

3 Konkretisierung der Aufgabenstellung

Beim Laserstrahlhartlöten können Nahtimperfectionen entstehen (siehe Kapitel 2.5). Diese treten in der Großserienfertigung meist sporadisch auf und verursachen einen erhöhten und kostenintensiven Nacharbeitsaufwand, um die geforderte Oberflächenqualität zu realisieren. Zusätzlich geht von diesen Nahtimperfectionen oft auch ein erhöhtes Korrosionsrisiko aus. Zielstellung der Arbeit ist, durch Untersuchungen zur Entstehung von Nahtimperfectionen sowie zum Laserstrahlscanlöten die Prozessstabilität und die Nahtqualität zu steigern und damit Nacharbeitsaufwände zu reduzieren bzw. gänzlich zu vermeiden.

Im ersten Teil der Arbeit sollen daher die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Ausbildung der Nahtimperfectionen mit aktuellem Serienequipment am speziellen Anwendungsfall der Dachnaht unter Beachtung der höchsten Qualitätsanforderungen identifiziert werden. Die in der Literatur bekannten Entstehungsursachen für die Ausbildung der Nahtunregelmäßigkeiten werden dabei ebenfalls mitbewertet. Durch das gesteigerte Prozessverständnis beim Laserstrahlhartlöten am schrägen Bördelstoß sollen konkrete Ansätze zur Vermeidung von Nahtimperfectionen abgeleitet werden. Dadurch wird wiederum die Prozessstabilität bzw. Prozessqualität erhöht und der Nacharbeitsaufwand reduziert. Den Schwerpunkt der Arbeit stellen die Untersuchungen zum neuartigen Ansatz des Laserstrahlscanlötens für die Dachnaht dar. Dabei soll untersucht werden, ob durch das Scannen des Laserstrahls in Vorschubrichtung eine größere Vorwärmung der Grundwerkstoffe für eine bessere Benetzung sorgt. Zusätzlich soll durch eine gesteigerte Nachwärmung der Prozesszone eine höhere Oberflächenqualität (glattere Oberfläche) erzielt werden.

Die zentrale Fragestellung lautet somit, inwieweit sich der Laserstrahlhartlötprozess über die Variation des Energieeintrags mittels verschiedener Scanparameter positiv beeinflussen lässt. Dies gilt besonders für die Reduzierung der Nahtimperfectionen und bei höheren Vorschubgeschwindigkeiten ($> 3 \text{ m/min}$) unter Erhalt der Nahtanbindungen bzw. der Verbindungsbreiten. Alle experimentellen Untersuchungen erfolgen an verzinkten Stahlfeinblechen (DC06 ZE75/75) am schrägen Bördelstoß der Dachnaht. Die Nahtqualität wird dabei durch zerstörungsfreie sowie zerstörende Untersuchungsmethoden analysiert und bewertet.

Parallel zu den Untersuchungen zum Laserstrahlscanlöten sollen mögliche Stellgrößen über die in der Scanoptik implementierte Online-Thermografiekamera (inklusive Laserleistungsregelung) für eine reproduzierbare Lötnahtqualität evaluiert werden. Dazu sind zunächst die Möglichkeiten der Prozessbeobachtung bzw. im weiteren Vorgehen auch der Prozessüberwachung zu prüfen. Die vorhandene Systemtechnik ist dabei für die spezielle Applikation der Dachnaht weiterzuentwickeln. Nach Bestätigung der „Prinzip-tauglichkeit“ des Laserstrahlscanlötens soll die dem Scannen übergeordnete Regelung genutzt werden, um bei typischen Anwendungsfällen (bspw. Geschwindigkeitsvariation) die Nahtqualität zu steigern.

4 Untersuchungen zur Nahtqualität sowie zur Entstehung von Nahtimperfectionen

4.1 Einflussfaktoren beim Laserstrahlhartlöten

Beim Laserstrahlhartlöten von verzinkten Stahlblechen im Bereich der Dachnulfuge existieren die höchsten Anforderungen an die Nahtqualität (Class-A). Aus der Literatur sind Einflussfaktoren für das Laserstrahlhartlöten an der Geometrie des geraden Bördelstoßes bekannt [u.a. Grim12, Hane96, Kreu97]. Diese Faktoren und die eigenen Serienerfahrungen beim Laserstrahlhärten der Dachnulfuge sind in dem Ishikawa-Diagramm (Abbildung 4.1) zusammenfassend dargestellt.

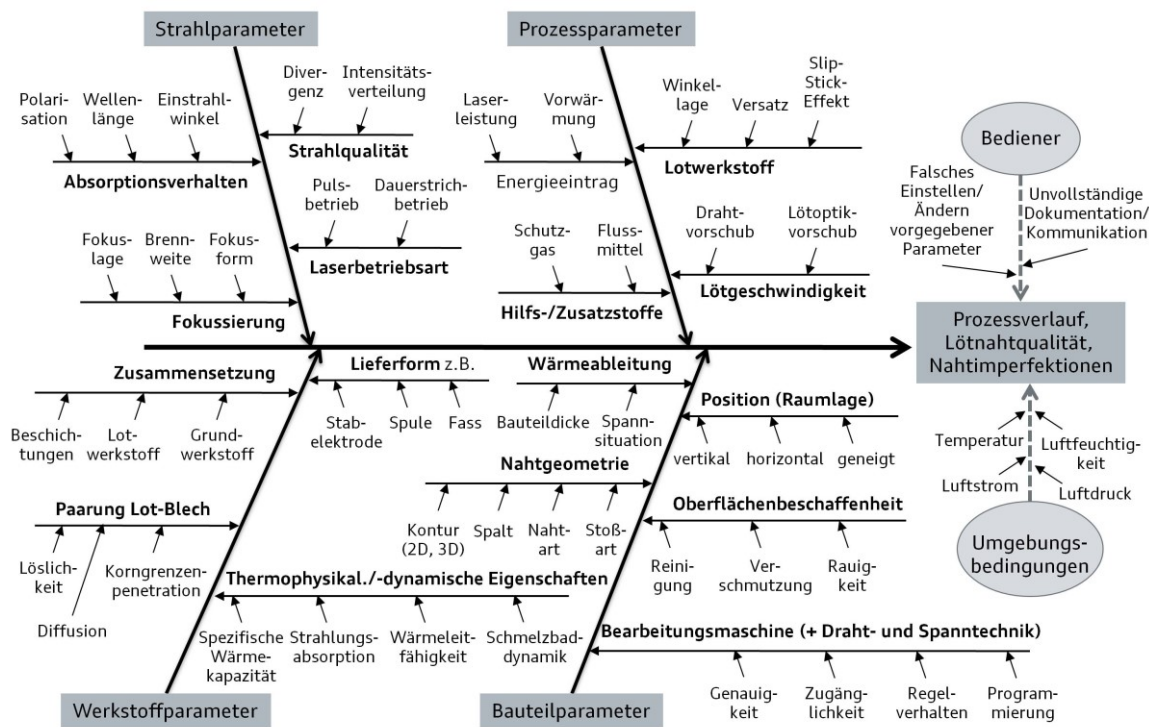


Abbildung 4.1 Hauptinflussfaktoren auf die Ergebnisqualität beim Laserstrahlhartlöten

Die Einflussfaktoren sind dabei in die Hauptstränge Strahl-, Prozess-, Werkstoff- und Bauteilparameter gegliedert. Die Hauptstränge besitzen einzelne Unterstränge, welche teilweise noch weiter untergliedert werden können. Als Beispiel seien an dieser Stelle die Winkellagen im Bereich (Prozessparameter und Lotwerkstoff) genannt, welche nochmals in Lateral-, Schlepp- und Verdrehwinkel sowie Drahtzuführwinkel unterteilt werden könnten. Generell ist der Darstellung zu entnehmen, dass dieser Prozess sehr viele Einflussfaktoren besitzt und dadurch ein komplexes System aufspannt. Somit können kleine Änderungen durch Abhängigkeiten der einzelnen Faktoren untereinander zu einer stärkeren Veränderung der gesamten Nahtqualität führen. Zusätzlich kommen schwierig zu bewertende Einflüsse

durch Bediener und Umgebungsbedingungen hinzu. Da der eigentliche Serienprozess einer der letzten Schritte im Karosseriebau ist, müssen neben den direkten vor- und nachgelagerten Prozessketteneinflüssen auch weitere Punkte bezüglich Lagerung und Logistik bewertet werden.

4.2 Versuchsaufbau mit Standardequipment

4.2.1 Laserstrahlquelle

Einen grundlegenden Bestandteil des Versuchsaufbaus stellt die Laserstrahlquelle dar. Zum Einsatz kam bei diesen Untersuchungen ein fasergekoppelter Diodenlaser der Firma Laserline. Dieser besitzt eine maximale Ausgangsleistung von 5,5 kW, welche aus acht Diodenstacks mit vier unterschiedlichen Wellenlängen über Polarisations- und Frequenzkopplung gewonnen wird (siehe Abschnitt 2.3.2). Die wichtigsten technischen Daten der Strahlquelle sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Tabelle 4.1 Technische Daten LDF-5000-30 [Lase14]

Hersteller	Laserline GmbH
Modell	LDF 5000-30
Max. Leistungsaufnahme	15 kW
Max. Ausgangsleistung	5500 W
Steckdosenwirkungsgrad	bis zu 45%
Verfügbarkeit	typisch > 99,5%
Wellenlängenbereich	940, 980, 1030 und 1064 nm
Strahlabgänge (Varianten)	30 und 40 mm*mrad
Durchmesser des LLK	600 µm

Durch die Verwendung von Wellenlängen im nahen Infrarotbereich kann der Laserstrahl vom Diodenlaser zur Bearbeitungsoptik über flexible Glasfasern bzw. Lichtleitkabel (LLK) geführt werden. Eingesetzt wurde in diesem Fall ein LLK mit einem Durchmesser von 600 µm. Die durch die Einkopplung an den jeweiligen Faserenden entstehende Abwärme, wird ebenso wie die thermische Verlustleistung des Lasers, über eine integrierte Wasserkühlung abgeführt. Zusätzlich kann die möglichst genaue Positionierung und Ausrichtung der Bearbeitungsoptik mithilfe eines Pilotlasers, der im sichtbaren Spektralbereich emittiert, erfolgen.

In Abbildung 4.2 sind die mittels Powermonitor gemessenen Laserleistungen des LDF-5000-30 (40 mm*mrاد Abgang) nach der Bearbeitungsoptik bei verschiedenen vorgegebenen Laserleistungen am Laseraggregat dargestellt. Da im Ausgangszustand höhere Laserleistungen als die eigentliche Vorgabe vom Laser emittiert werden und jede Optik unterschiedliche Verluste aufweist, ist es möglich über einen Korrekturfaktor die Laserleistungskennlinie anzupassen. Die sich aus drei Messwerten ergebenden Mittelwerte zeigen dabei eine sehr gute Übereinstimmung mit der Vorgabe. Nachfolgend können daher die angegebenen Laserleistungen als die am Bearbeitungsort vorliegenden Leistungen angesehen werden.

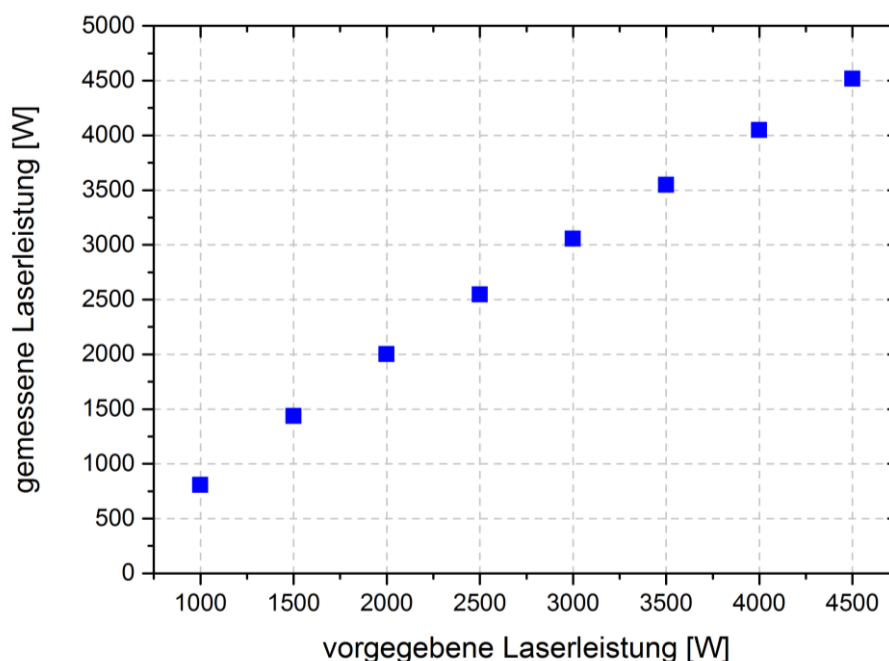


Abbildung 4.2 Gemessene Laserleistung nach der Löt Optik (ALO3) mit Leistungskorrektur

4.2.2 Bearbeitungsoptik

Für die Strahlformung und Nahtführung wurde eine adaptive Laserbearbeitungsoptik (ALO3) der Firma Scansonic IPT GmbH eingesetzt. Sie beinhaltet die Kollimations- und Fokussierbrennweite und liefert somit die gewünschte Abbildung für den Laserstrahlhartlötprozess. Den prinzipiellen Aufbau zeigt Abbildung 4.3.

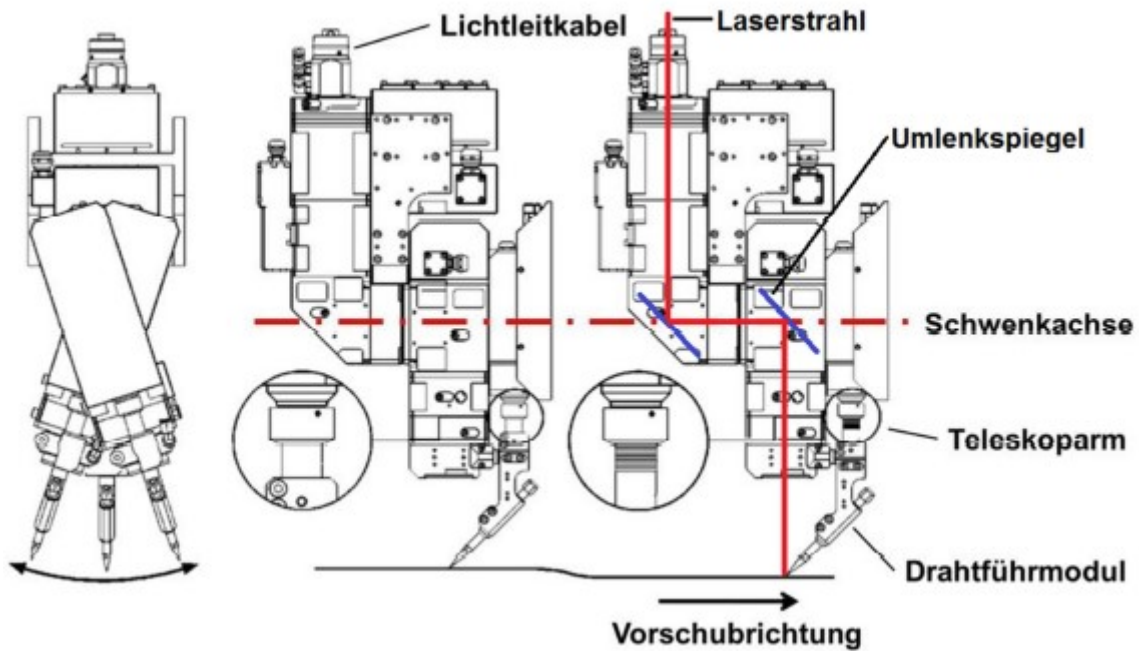


Abbildung 4.3 Aufbau der Bearbeitungsoptik [Scan14]

Die zweifache Strahlumlenkung über Umlenkspiegel ermöglicht den Einsatz einer Schwenkachse und damit in Verbindung mit dem Teleskoparm die taktile Nahtführung. Die Schwenkachse gleicht den lateralen Versatz und der Teleskoparm die Höhenunterschiede bei Bauteilchwankungen aus. Zusätzlich können zur Verbesserung der Nahtführung im Raum mittels eines Elektromotors Seitenkräfte aufgebracht werden, um die wirkenden Gewichtskräfte auszugleichen. Die Möglichkeit zur Feststellung sowie der Lageüberwachung der beiden Ausgleichselemente erlaubt zudem eine stabilere Prozessführung (bspw. bei der Eckumlötung) sowie eine Prozessüberwachung. [Scan14]

Darüber hinaus ist an der ALO3 ein bewegliches Drahtführmodul angebracht, welches das definierte Zuführen des Zusatzdrahtes an die Bearbeitungsstelle ermöglicht (siehe Abbildung 4.4). Das gesamte Modul kann manuell um die Achse des Teleskoparms geschwenkt und der Endrohrhalter in Vorschubrichtung verschoben werden. So lässt sich zudem die freie Drahtlänge, der sogenannte „Stickout“, einstellen. Der Teleskoparm kann während des Prozesses wahlweise fixiert oder über eine vordefinierte Andruckkraft gesteuert werden, wodurch sich wiederum Nahtanfang und –ende besser modellieren lassen. Des Weiteren besitzt die Bearbeitungsoptik zusätzliche Module zum Schutz der optischen Bauteile vor Verschmutzungen. So verhindert ein direkt nach der Fokussierlinse eingesetztes Schutzglas im Prozess das Eindringen von Gasen und Spritzern. Noch bevor sie das Schutzglas erreichen, können diese Verschmutzungen durch einen zusätzlichen starken Luftstrom des Cross-Jet-Modules größtenteils aus dem Strahlengang entfernt werden. [Scan14]

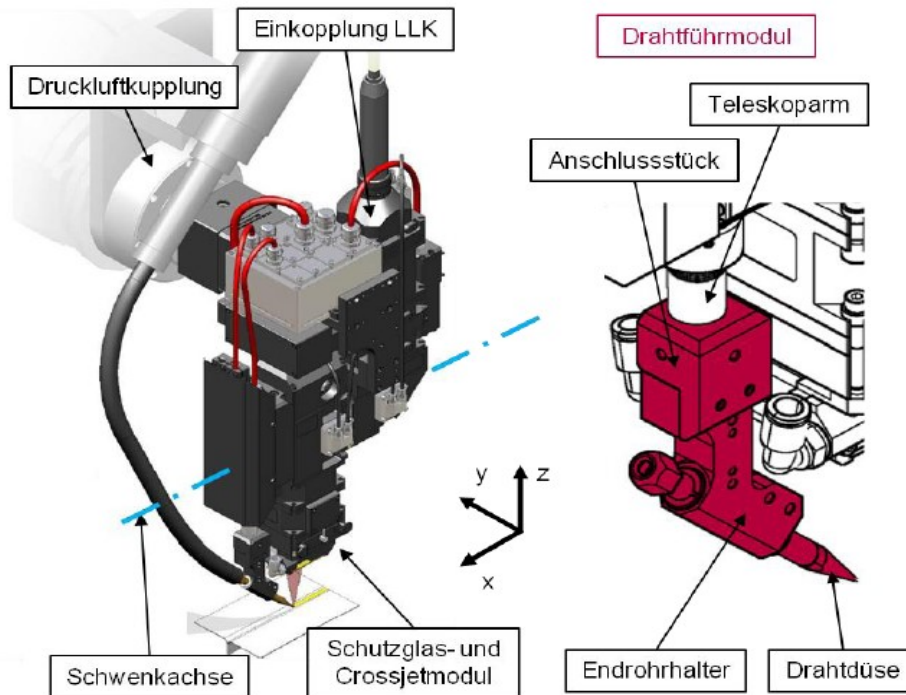


Abbildung 4.4 Ergänzende Angaben zum Aufbau der Bearbeitungsoptik [Scan14]

Die Literatur [Hoff04a] empfiehlt einen doppelt so großen Strahldurchmesser im Vergleich zum Drahtdurchmesser, um die Grundwerkstoffe bei schleppender Drahtzuführung ausreichend vorzuwärmen. Die in dieser Arbeit verwendete Bearbeitungsoptik mit ihrer Abbildung (5:3, $f_{Fok} = 215 \text{ mm}$, $f_{Koll} = 40 \text{ mm}$) wurde für die spezielle Applikation der schrägen Dachnulfuge ausgelegt. Damit ist nach Gleichung 5 ein ausreichend großer Strahldurchmesser am Bearbeitungspunkt für die Verwendung des Lötdrahtes ($\varnothing = 1,6 \text{ mm}$) und des Lichtleitkabels von $600 \text{ }\mu\text{m}$ gegeben.

$$2 * \omega_0 = \frac{d_{fas} * f_{Fok}}{f_{Koll}} \quad \text{Gleichung 5}$$

Der rechnerische Strahldurchmesser beträgt ca. $3,2 \text{ mm}$. Da die Bearbeitungsoptik allerdings mit einer verstellbaren Kollimationslinse und auf die Festkörperlaserstrahlung von 1064 nm ausgelegt ist, können die geometrischen Verhältnisse am Bearbeitungspunkt bei Verwendung des Diodenlasers mit seinen vier Wellenlängen vom idealen Rechenbeispiel abweichen. Ebenfalls sind neben den Einflüssen der verbauten optischen Linsen im Strahlengang auch die thermische Belastungen bei Dauerstrichbetrieb und damit ein möglicher Fokusschift zu erwarten. Für die genaue Beschreibung des Laserstrahls im Bearbeitungsbereich wurden Kautikmessungen mittels Fokusmonitor bei verschiedenen Laserleistungen durchgeführt. Die Kautik für den $40 \text{ mm} * \text{mrad}$ -Abgang des Diodenlasers ist für 2 kW in Abbildung 4.5 dargestellt.

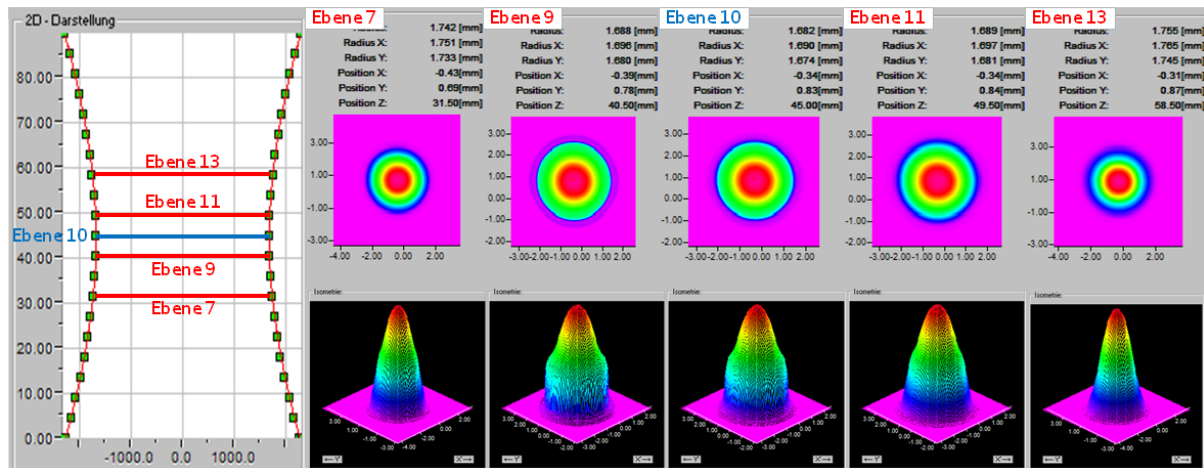


Abbildung 4.5 Gemessene Strahlkaustik für den 40 mm*mrad-Abgang des Diodenlasers bei $P_L = 2 \text{ kW}$ nach Optik (ALO3)

Auffällig ist die leicht konische Strahlform mit einer Intensitätsspitze im Zentrum im Fokusbereich (Ebene 10). Dieses Profil bildet keinen eindeutigen „Tophat“ aus, bei dem die Intensität nahezu konstant über die gesamte Fokusfläche ist. Der ermittelte reale Strahldurchmesser am Bearbeitungsort beträgt nach der 2. Moment-Methode bei einer Laserleistung von 2 kW ca. 3,4 mm und ist damit geringfügig größer als der errechnete. Die Bauteilvorwärmung direkt neben dem Draht, welcher die Fuge abschattet, sollte bei einem Drahtdurchmesser von 1,6 mm gewährleistet sein. Die wichtigsten gemessenen Kenngrößen zeigt zusammengefasst Tabelle 4.2.

Tabelle 4.2 Gemessene Kenngrößen der Strahlkaustik nach der Optik (ALO3 mit Abbildung 5,3; 600 μm Faser und $P_L = 2 \text{ kW}$)

Strahldurchmesser $d_f(2*\omega_0)$	3,4 mm
Divergenzwinkel θ	68,8 mrad
Strahlparameterprodukt SPP	58 mm*mrad
Rayleighlänge z_R	49 mm

Abschließend sollen an dieser Stelle die Winkelstellungen der Optik für die weiteren Untersuchungen definiert werden. Die Winkeländerungen während des Prozesses können bewusst geschehen, bspw. durch ein programmiertes Ausschwenken der Optik aufgrund von Spanntechnik, welche sich direkt neben der Naht befindet, oder unbewusst aufgrund von Bahnabweichungen beim Führen der Bearbeitungsoptik mittels Industrieroboter sowie den Geometrieabweichungen selbst. Dies ist besonders bei dreidimensionalen Bauteilgeometrien und mit zunehmenden Bearbeitungsgeschwindigkeiten zu beachten. Die unterschiedlichen Winkel der Optik und die Vorzeichen bezüglich ihrer Lage gegenüber der Fuge sind in Abbildung 4.6 dargestellt. Der Lateralwinkel (α) beschreibt dabei die seitliche Neigung um

den Bearbeitungspunkt senkrecht zur Vorschubrichtung. Der Schleppwinkel (β) entspricht der Änderung des Winkels der Laserstrahlachse in oder gegen die Vorschubrichtung im Vergleich zur senkrechten Einstrahlung (Nulllage). Zusätzlich kann der Zusatzwerkstoff in Form des Drahtes stechend oder schleppend der Fuge zugeführt werden. In dieser Arbeit wurde ausgehend von der taktilen Nahtführung und der späteren Gewährleistung der Vergleichbarkeit zu den gescannten Versuchen ausschließlich die schleppende Variante angewendet. Der zugehörige Drahtzuführwinkel wird mit (τ) bezeichnet, und kann bei dieser Optik durch einen Wechsel des Drahtzuführmoduls bezüglich seiner Lage zur Laserstrahlachse verändert werden. Weiterhin definiert der Verdrehwinkel (γ), schleppende oder stechende Drahtzuführung vorausgesetzt, den Winkel der Drahtzuführung gegenüber der Vorschubrichtung.

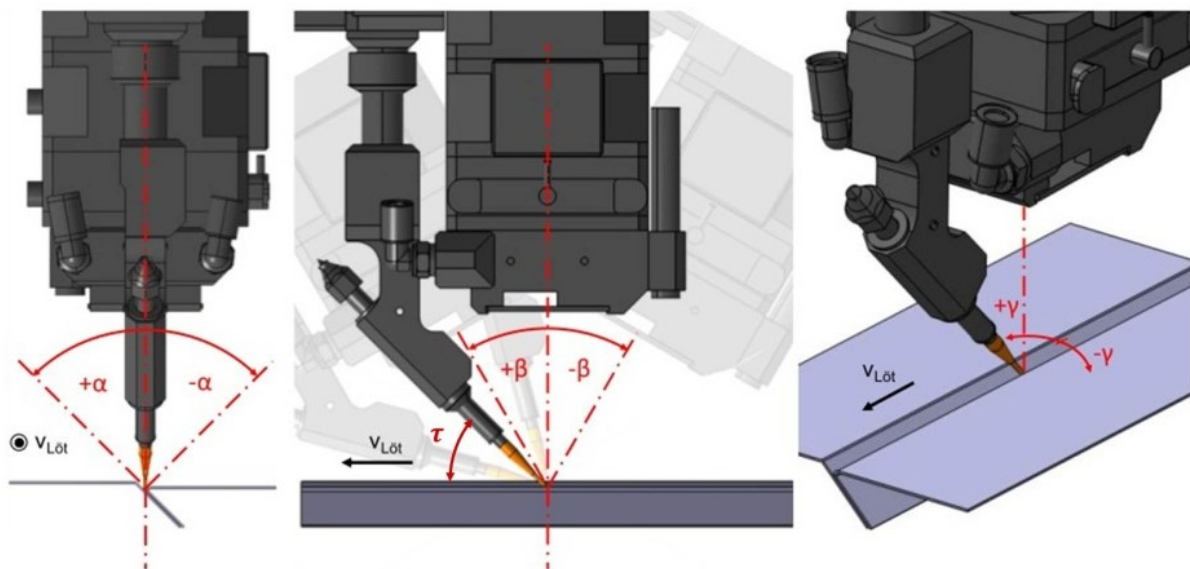


Abbildung 4.6 Winkelstellungen der Optik beim Laserstrahlhartlöten

4.2.3 Roboter

Als Handlingsgerät für den Bearbeitungskopf wurde auf bestehendes Equipment zurückgegriffen und somit ein 6-Achs-Knickarmroboter mit der Bezeichnung R-2000iB/125L der FANUC Robotics Deutschland GmbH verwendet (siehe Abbildung 4.7). Dabei handelt es sich um eine Langarmversion mit einer Reichweite von bis zu 3 m und einer maximalen Traglast an der sechsten Achse von 125 kg. Alle sechs Achsen können je nach Koordinatensystem separat oder gleichzeitig angesteuert werden, sodass sich laut Hersteller im Tool Center Point (TCP) eine absolute Positioniergenauigkeit von $\pm 0,2$ mm erreichen lässt. [Fanu14] Für geradlinige Bewegungen zwischen zwei Punkten ist dies auch aufgrund der nochmals genaueren Wiederholgenauigkeit (± 0.2 mm) mit anderen Robotern vergleichbar und damit das System für das Laserstrahlhärten der Testbleche in dieser Arbeit geeignet.

Der Roboter übernimmt zudem das Handling der Drahtfördereinheit sowie das Führen des Schlauchpaketes, welches alle Versorgungsleitungen (Medien, Spannung usw.) für den Bearbeitungskopf beinhaltet. Darüber hinaus steuert der Roboter die Kommunikation mit allen Prozessteilnehmern, d.h. er sendet die relevanten Ausgangssignale an den jeweiligen programmierten Bahnschaltpunkten der Lötnaht.

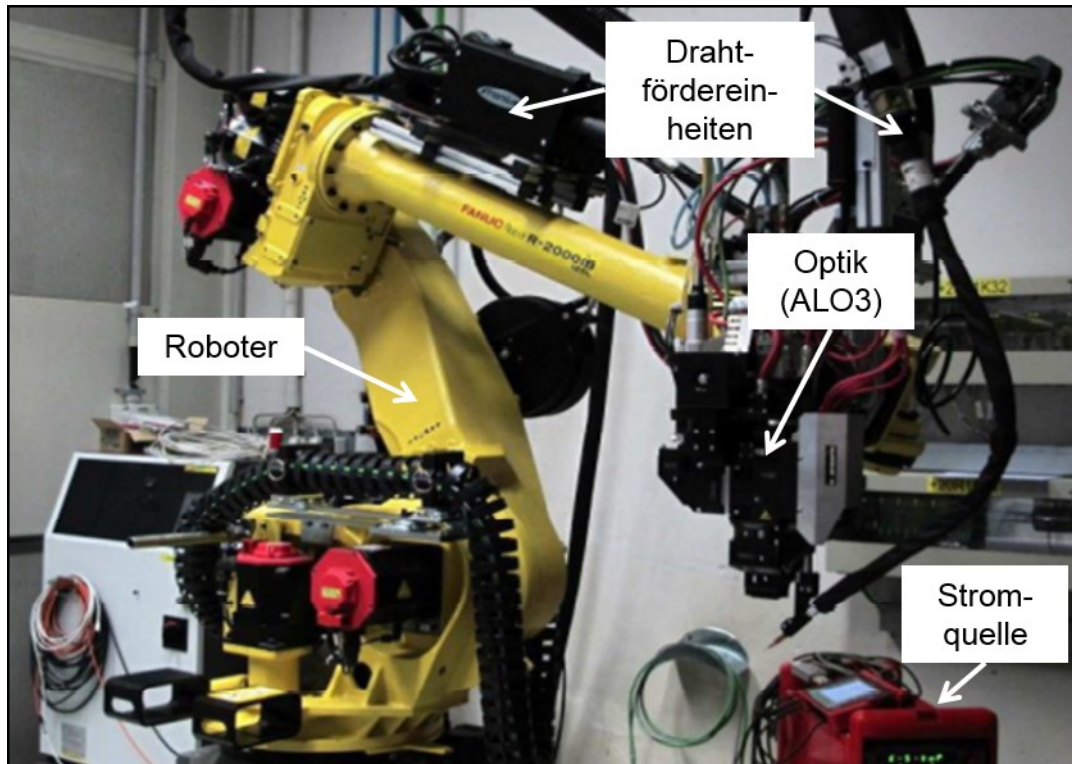


Abbildung 4.7 Systemaufbau mit Roboter, Bearbeitungsoptik und Drahtfördergerät

4.2.4 Drahtzuführgerät

Für die Zufuhr des Lotdrahtes in die Bearbeitungszone wird das Schweißgerät TransPuls Synergic (TPS) 4000 eingesetzt, das neben der Steuerung der Drahtförderung auch das Vorwärmen des Lötdrahtes (bei Heißdrahtversuchen) übernimmt. Letzteres erfolgt durch einen Stromfluss zwischen Drahtdüse und Werkstück, welches über die Spannvorrichtung zum Schweißgerät geerdet ist. Dadurch kann dem Lotwerkstoff auf effiziente Weise durch Widerstandserwärmung zusätzliche Energie zugeführt werden, sodass die Erwärmung des Drahtes nicht ausschließlich von der absorbierten Laserstrahlung abhängt. Allerdings ist die Vorwärmenergie so zu wählen, dass es nicht zu einem der Prozesszone vorgelagertem Abschmelzen des Zusatzwerkstoffes kommt und damit die taktile Nahtführung sowie die Nahtqualität beeinträchtigt wird. Die im Gerät integrierte Konstantstrom-Regelung gleicht über die Spannungsregelung die Schwankungen des Vorwärmstroms, etwa in Folge sich ändernder Übergangswiderstände zwischen

Drahtspitze und Bauteil, aus. Zusätzlich besitzt das TPS 4000 eine digitale integrierte Prozesssteuerung und kann über einstellbare Programme, sogenannte „Jobs“, direkt vom Roboter angesteuert werden. [Fron14]

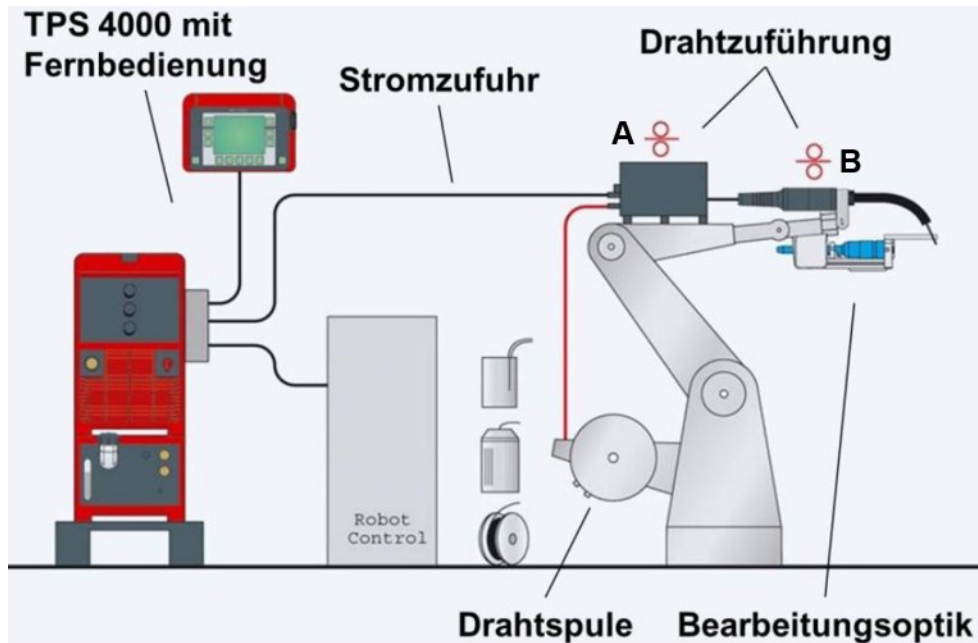


Abbildung 4.8 Systemaufbau Fronius TPS 4000 mit Lotdrahtzuführung (heißdrahtfähig) [Fron14]

Die Drahtförderung erfolgt über das Push-Pull-Prinzip, wobei 2 separate Fördereinheiten (A = Push, B = Pull) mit Rollenantrieben verwendet werden (siehe Abbildung 4.8). Die erste Drahtvorschubeinheit wickelt den Draht von einer Spule oder einem Fass ab und fördert diesen in die Drahtseele (Push-Prinzip). Dadurch entsteht ein kleiner Überschuss an Zusatzwerkstoff im Schlauchpaket, welcher eine reibungsarme Drahtförderung gewährleisten soll. Der zweiten Fördereinheit ist es damit möglich, ohne Auftreten von Slip-Stick-Effekten eine konstante Drahtfördergeschwindigkeit zu erreichen (Pull-Prinzip). Geführt wird der Draht nach dem 2. Antrieb innerhalb eines weiteren Schlauchpaketes in einer Messing- oder Kunststoffseele bis zur Stromkontaktdüse kurz vor der eigentlichen Bearbeitungsstelle. [Fron14]

Für eine Erfassung der jeweils eingestellten Prozessparameter Vorwärmstrom und Drahtfördergeschwindigkeit wurde ein WeldQAS (Quality Assurance System) der Firma HKS-Prozesstechnik GmbH installiert. Dieses System kann zusätzlich die Laserleistung erfassen und kommt auch zur automatischen Qualitätsüberwachung sowie Dokumentation in der Großserienfertigung zum Einsatz. [HKS14]

4.2.5 Fügegeometrie

Die Dachnahtfuge ist die Verbindung von Dach und Seitenwandrahmen (siehe Abschnitt 2.1). Diese Fügegeometrie wird als schräger Bördelstoß ausgeführt, um Bauteiltoleranzen des Daches in y-Richtung (siehe Abbildung 4.9) auszugleichen.



Abbildung 4.9 Fahrzeugkoordinatensystem am Beispiel des Audi TT2

Für die Prozessführung ist dabei zu beachten, dass durch das Abgleiten des Daches auf dem Seitenwandrahmen in jedem Falle eine Stufe (von bis zu 4 mm) entsteht. Um den Serienprozess möglichst genau nachbilden zu können, werden für die Versuche Winkel von 53° am Dachprobeblech bzw. 127° am Seitenwandrahmenblech verwendet (Abbildung 4.10).

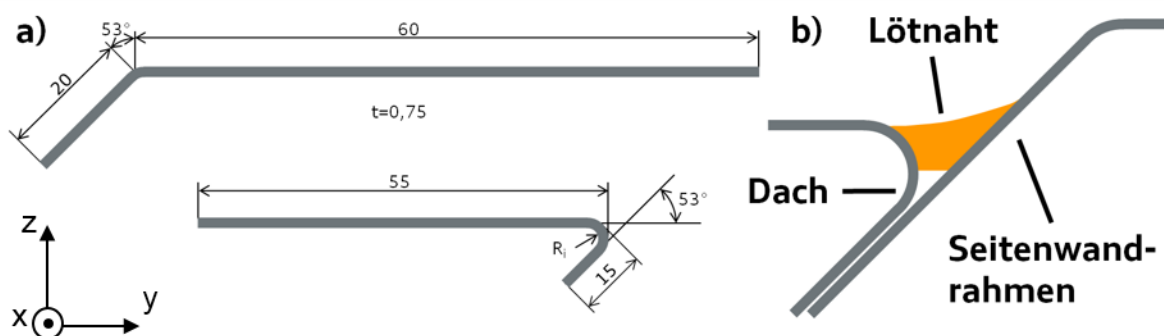


Abbildung 4.10 a) Geometrie Probebleche, b) Seitenansicht Bördelstoßgeometrie gelötete Dachnahtfuge

Als Werkstoff wird der in Kapitel 2.6.1 beschriebene DC06 + ZE75/75 mit einer Blechstärke von $t = 0,75$ mm verwendet. Um für die Probenentnahme ausreichend lange Lötnahte von mindestens 200 mm erhalten zu können, wurde eine Blechlänge von jeweils 260 mm gewählt.

4.2.6 Spanntechnik

Zur Sicherstellung einer konstanten Spannsituation zwischen den Probeblechen und damit Nullspalt wurde eine Spanntechnik mit einer definierten Spannsituation verwendet (siehe Abbildung 4.11). Die bei den Untersuchungen eingesetzten Spannbacken besitzen dieselbe Kontur wie die Probebleche und jeweils einen Niederhalter, der die Bleche fixiert. Im Unterschied zum Serienprozess könnte die flächige Anlage der Bleche auf den massiven metallischen Spannbacken allerdings zu veränderten Wärmeableitungsbedingungen führen. Darüber hinaus ist eine Phase auf der Dachseite angebracht, welche das Einstellen unterschiedlicher Dachradien für gezielte Untersuchungen ermöglicht.

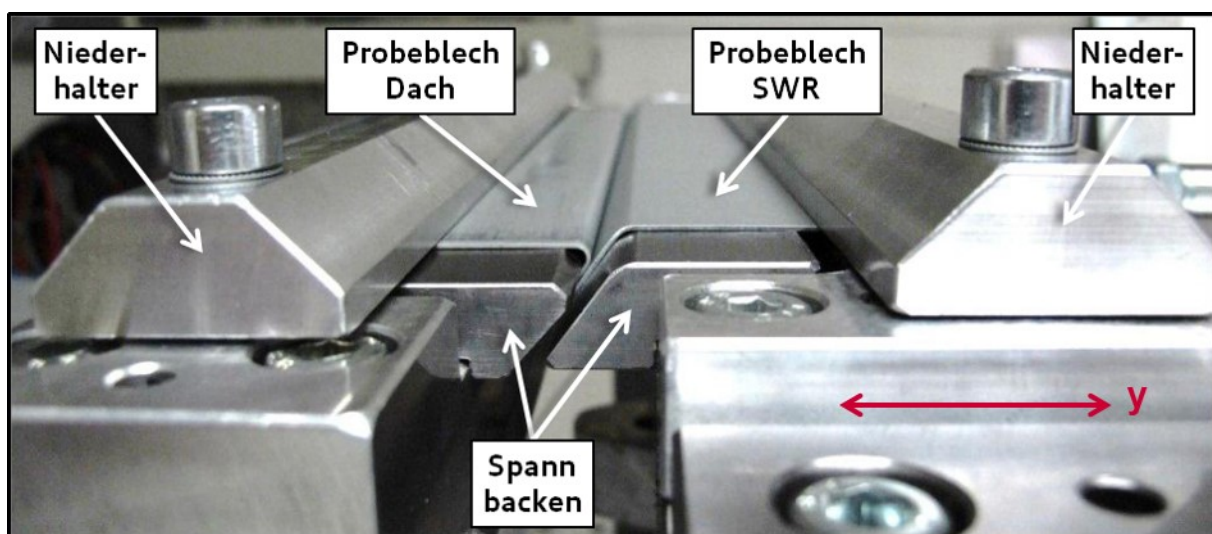


Abbildung 4.11 Spannvorrichtung für Probebleche mit eingespannten Blechen

Durch einen Versatz in Höhenrichtung zwischen den beiden Spannbacken wird die in Abschnitt 4.1.5 beschriebene Stufe zwischen Dach- und Seitenwandrahmenblech (SWR) nachgestellt. Im Gegensatz zur feststehenden Spannseite der Dachkontur, ist die Spannbacke für das Seitenwandrahmenblech mit einer Gleitführung in y -Richtung ausgestattet und kann über einen Kniehebelspanner für den Bauteilwechsel geöffnet werden. Die Verbindung zwischen dem Hebel und der Spannbacke erfolgt mittels Gewindestange und ermöglicht somit ein stufenloses Einstellen der Vorspannkraft, welche für die Versuchsdurchführungen konstant gehalten wurde.

4.2.7 Prüfvorgaben und -methoden

Wie in Kapitel 2.5.1 beschrieben, können nach der DIN EN ISO 18279 generelle Einteilungen von Nahtunregelmäßigkeiten erfolgen. Die unterschiedlichen Ausprägungen der Nahtimperfectionen treten sowohl innerhalb als auch außerhalb der Lötnaht auf und müssen für den jeweiligen spezifischen Anwendungsfall unterschieden werden. Zudem sind in der

Norm keine quantitativen Bewertungskriterien definiert, da diese für die möglichen Anwendungsfälle (bspw. aufgrund der Belastungsrichtung) von unterschiedlicher Bedeutung wären. Somit benötigt jede applikationsspezifische Laserstrahlhartlötverbindung eine eigene Prüfvorschrift, welche die mögliche Nahtimperfectionen einteilt und Grenzwerte festlegt. Für laserstrahlgelötete Karosseriebaugruppen innerhalb des Konzerns ist dies durch die Prüfvorschrift 1602 [PV1602] beschrieben. Diese legt für jede Nahtart die zu erfüllenden Kriterien, die Prüfmethode und die Häufigkeit der Bewertung fest. So werden bspw. für die Schliffprüfung an laserstrahlgelöteten Dachnullfugenabschnitten die Schnittlage und die einzuhaltenden Verbindungsmaße (z.B. für die Festigkeit) im Schliff selbst definiert (siehe Abschnitt 4.2.7.2).

Da sich die Lötverbindung im direkten Sichtbereich des Kunden befindet und damit die höchsten Qualitätsanforderungen im Karosseriebau erfüllt werden müssen, sind die Vermeidung von Oberflächendefekten (Poren, Risse, Randkerben) und eine optisch gute Anmutung (glatte Nahtoberfläche) von entscheidender Bedeutung. Um diese hohen Qualitätsanforderungen zu untersuchen, wurden in dieser Arbeit an den Versuchsproben Sichtprüfungen, Schliff- sowie Durchstrahlungsprüfungen mittels Computer-Tomografie (CT) durchgeführt. Weiterhin wären nach [PV1602] für eine Überprüfung der Anbindungsängen auch Biegeprüfungen (mittels Meißel) möglich, welche aber aufgrund der umfangreichen metallografischen Untersuchungen der Diffusionszonen nicht zusätzlich durchgeführt wurden.

4.2.7.1 Sichtprüfung

Der zerstörungsfreien Prüfung von Hartlötverbindungen liegt die [DIN EN 12799] zugrunde. Darin wird die Sichtprüfung als rein visuelle Untersuchung der Hartlötverbindung und der umliegenden Grundwerkstoffe definiert. Somit können mit bloßem Auge die äußere Beschaffenheit, die Länge und die Lage der Lötnaht sowie Anschmelzungen an den Grundwerkstoffblechen direkt nach dem Laserstrahlhartlötprozess beurteilt werden. Zudem lassen sich Merkmale wie bspw. verstärkte Schmauchbildung erkennen und für die Parameteroptimierung möglicher Folgeversuchsreihen nutzen. Zur Dokumentation wurden alle Nähte unter konstanten Umgebungsbedingungen fotografiert. Gleiche Belichtungsverhältnisse, Perspektiven sowie Abstände zur Kamera ermöglichen einen direkten visuellen Vergleich der Nähte untereinander. Die Oberfläche sollte glatt, unterwölbt (tangente Übergänge zum GW) und über die gesamte Länge gleichmäßig ausgebildet sein. Das Vorhandensein von Oberflächenporen, Oberflächenrissen, Unterbrechungen in der Benetzung oder Lotspritzern ist nach [PV1602] im Sichtbereich nicht zulässig. Bis auf die Oberflächenrisse, können diese Nahtimperfectionen im Großserienbetrieb nachgearbeitet werden. Allerdings sind diese Nacharbeiten mit erheblichen Aufwänden verbunden und damit

möglichst zu vermeiden. Weitere nicht zulässige Nahtimperfectionen sind Unstetigkeiten im Übergang zum Grundwerkstoff (sogenannte Randkerbigkeit), da sie nach der Lackierung verstärkt zum Vorschein kommen würden und somit ebenfalls gänzlich durch Nacharbeit beseitigt werden müssen. In dieser Arbeit wurde die Oberflächenbeschaffenheit durch Sichtprüfung bewertet und in zwei Kategorien unterteilt (Abbildung 4.12). Dies ermöglicht eine Vorauswahl geeigneter Versuchsproben und minimiert damit den Probenaufwand zur Erstellung von Schliiffproben für die metallografische Analyse.



✓ i.o.

- ▶ Glatte Oberfläche
- ▶ Gleichmäßige Anbindung



✓ n.i.o.

- ▶ Ungleichmäßige Anbindung
- ▶ Unvollständige Abschmelzungen
- ▶ Offenliegende Poren
- ▶ Starke Randkerben
- ▶ Raue Oberfläche

Abbildung 4.12 Einteilung der Oberflächen durch Sichtprüfung

4.2.7.2 Metallografische Untersuchungen

Zerstörende Prüfverfahren sind nach der [DIN EN 12797] genormt. Diese Prüfungen dienen der metallografischen Analyse als makro- und mikroskopische Bewertung der inneren Qualität von Hartlötverbindungen. Mit Hilfe der metallografischen Analyse kann die Nahtqualität hinsichtlich der Nahtgeometrie (Benetzungswinkel, Nahtbreite und – höhe), der Anbindung des Lotes am Grundwerkstoff (Diffusionszone, Anschmelzungen) sowie hinsichtlich des Auftretens von Poren und Rissen mittels Quer- und Längsschliffen näher untersucht werden. Im Gegensatz zu den Vorgaben der [PV1602] werden in dieser Arbeit die Schliffe an den nicht nachbearbeiteten bzw. ungeschliffenen Löt Nähten durchgeführt und damit durch das Eliminieren einer möglichen Fehlerquelle (bspw. zugeschmierte Poren durch den Schleifvorgang), Rückschlüsse auf den Prozess erleichtert. Die Grenzwerte für die minimale Verbindungsbreite bzw. das „A-Maß“ aus der [PV1602] sind daher mit einer Bearbeitungszugabe von +0,2 mm beaufschlagt worden. Den Schnittplan für die Entnahme der Untersuchungsproben für die metallografische Analyse zeigt Abbildung 4.13.

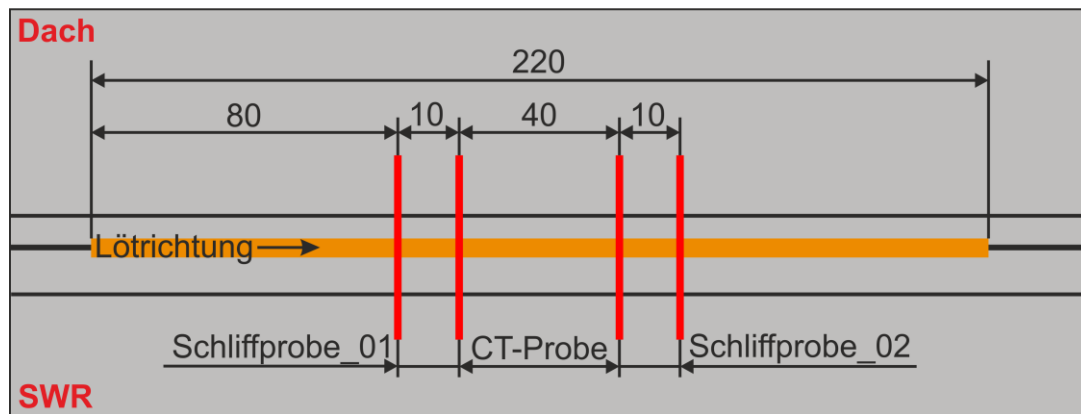


Abbildung 4.13 Schnittplan der Proben für die Analyse des inneren Befundes der Lötnahte (Draufsicht auf Probablech mit Bördelstoßgeometrie)

Der Schnittplan gibt Aufschluss über die Bereiche der Probenentnahme aus der Lötnaht. Im mittleren Bereich der Naht kann von konstanten Prozessbedingungen ausgegangen werden. Aus jeder Naht wurden mindestens zwei Schliifproben entnommen. Aufgrund der Länge der gesamten Lötnaht können bei Präparationsfehlern oder nicht eindeutigen Schliifergebnissen, bspw. hinsichtlich Anbindungslänge, zusätzlich noch weitere Proben für die Schliifanalyse und/oder für die Biegeprüfung herausgetrennt werden. Die im Y-Schnitt entnommenen Proben, werden zur besseren Verarbeitung in Kunststoff eingebettet und anschließend geschliiften sowie poliert. Für die Dokumentation wird ein Auflichtmikroskop mit verschiedenen Vergrößerungen und einer integrierten Kamera verwendet. Die Bilder können mit Hilfe einer Software am Computer direkt vermessen und ausgewertet werden. Die wichtigsten Bemaßungen sind in Abbildung 4.14 dargestellt.

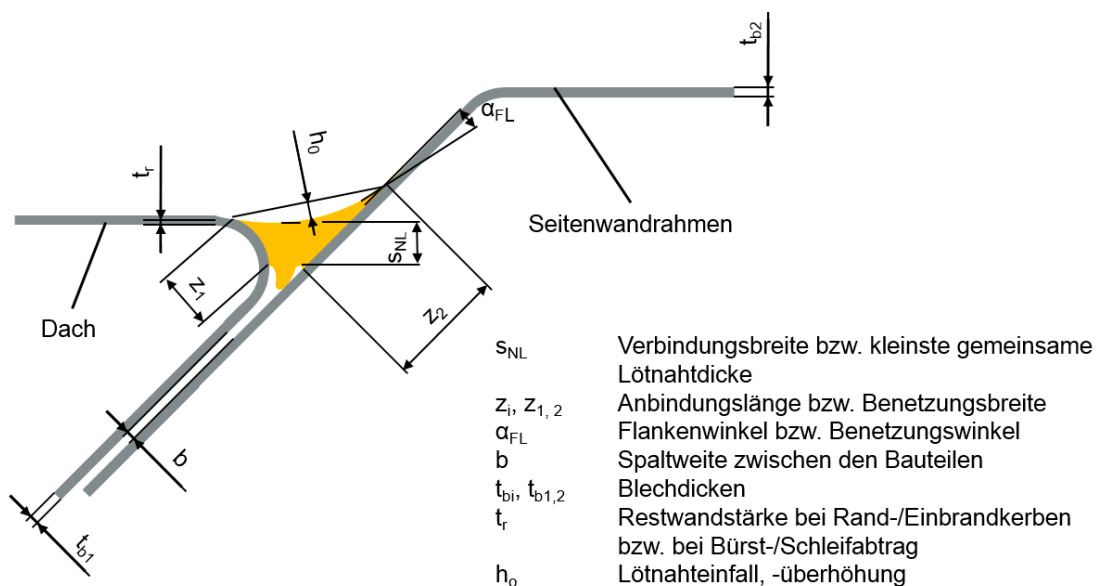


Abbildung 4.14 Maße und Bezeichnungen am Y-Schliff einer Dachnullfuge [PV1602]

Das relevante Maß für die Festigkeit der Lötnaht ist die Verbindungsbreite bzw. Lötnahtdicke (s_{NL}), welche den kleinsten tragenden Nahtquerschnitt beschreibt. Der minimal zulässige Grenzwert für den umgangssprachlich auch als „A-Maß“ bezeichneten Wert beträgt 80% der kleinsten Blechdicke im Endzustand (Gleichung 6).

$$s_{NL} \geq 0,8 * t_{min}$$

Gleichung 6

Das Mindestmaß, das unter Festigkeitsanforderungen an die Verbindung gestellt wird, hängt demnach von der minimalen Blechdicke t_{min} ab. Mit der in dieser Arbeit verwendeten Blechdicke von 0,75 mm ergibt sich ein Grenzwert von 0,6 mm. Zuzüglich der Bearbeitungszugabe (für den nicht durchgeführten Schleifvorgang) von 0,2 mm resultiert ein gefordertes Mindestmaß von 0,8 mm für die minimale Verbindungsbreite. Weiterhin lassen sich Anbindungsängen (z_1, z_2) und Benetzungswinkel (α_{FL}) zwischen Lot und Grundwerkstoff bestimmen. Diese spielen gegenüber der minimalen Verbindungsbreite eine untergeordnete Rolle, können aber bei wissenschaftlichen Analysen zu Aussagen über die Ausbildung der Nahtqualität (bspw. Nahtsymmetrie) herangezogen werden. Gleiches gilt für die angestrebte Nahtunterwölbung, für die es keine quantifizierte Vorgabe in der Prüfvorschrift gibt. Die Spaltweite b sollte 0,2 mm nicht überschreiten.

Zu beachten ist, dass die verwendeten Schliifproben lediglich einen begrenzten lokalen Ausschnitt aus einem Lötnahtvolumen und damit eine „Momentaufnahme“ anhand der Schliifebene darstellen. Alle Bewertungskriterien können aus diesem Grund über die gesamte Nahtlänge schwanken. Zudem werden die Schliife auf Risse, Feststoffeinschlüsse sowie Benetzungs- und Füllfehler untersucht. Aus dem oben genannten Grund, ist es nicht möglich, Rückschlüsse auf deren Auftreten in benachbarten Bereichen zu ziehen. Eine Volumenanalyse soll darüber verstärkt Aufschluss geben (siehe Abschnitt 4.2.7.3). Weiterhin können zur Untersuchung der Übergangs- bzw. Diffusionszonen zwischen Lot und GW Rasterelektronenmikroskop- (REM) und Energiedispersive Röntgenmikroanalysen (EDX) am Schliif durchgeführt werden. Diese ermöglichen höhere Auflösungen als Lichtmikroskope (LM) sowie eine Analyse der spezifischen Elementspektren, wodurch sich Rückschlüsse auf die Zusammensetzung der vorliegenden Gefüge ableiten lassen.

4.2.7.3 CT-Untersuchungen

Für Volumenaussagen werden CT-Aufnahmen erstellt. In dieser Arbeit wurden 40 mm lange Abschnitte aus der Nahtmitte untersucht. Die Probenentnahme ist Abbildung 4.13 zu entnehmen. Die Computer-Tomografie ist wie die Sichtprüfung eine zerstörungsfreie Prüfmethode und wird in der [DIN EN 12799] beschrieben. Dieses Verfahren basiert auf der Durchstrahlungsprüfung. Dabei wird die durch eine Röntgenröhre erzeugte elektromag-

netische Strahlung in einem zu untersuchenden Objekt je nach Dichte und Länge der durchstrahlten Strecke abgeschwächt. Unstetigkeiten, wie bspw. Nahtimperfectionen, führen zu unterschiedlichen Strahlungsabsorptionen in der zu untersuchenden Probe. So liefert ein Hohlraum, etwa in Form einer Pore, bedingt durch fehlendes Material eine geringere Abschwächung und damit eine höhere Intensität der mittels des Detektors gemessenen Strahlung. Allerdings trifft dies gleichermaßen auf konstruktiv bedingte Hohlräume und Bauteildickenänderungen zu. Um die Artefakte zu verringern, ist das zu durchstrahlende Materialvolumen neben der Naht möglichst gering zu halten (kurze Flanschlängen).

Die Detektorfläche zur Aufnahme eines 2D-Schnittbildes befindet sich hinter der jeweiligen Probe und gegenüber der Strahlenquelle. Durch Drehen der Probe um 360° in kleinen Winkelschritten ($< 1^\circ$) wird eine Vielzahl von Schnittbildern generiert. Mithilfe eines Computers werden die Schnittbilder zu einem 3D-Volumenmodell verrechnet. [Brun09]

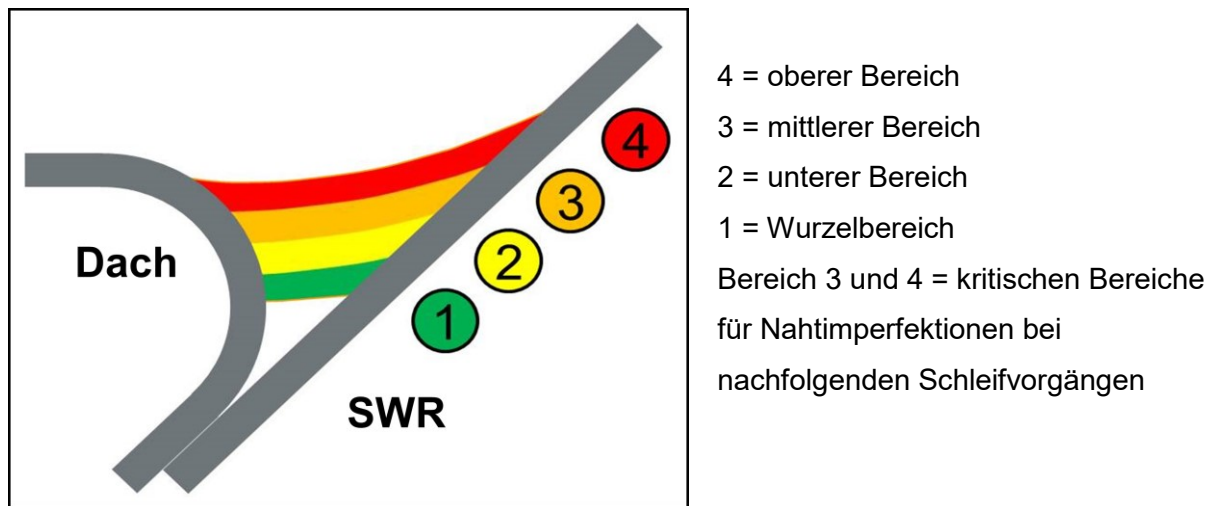


Abbildung 4.15 Einteilung der Bereiche für CT-Analyse

Für die gezielte Auswertung der zu untersuchenden Proben wurde die Lötnaht in 4 Bereiche untergliedert (siehe Abbildung 4.15). Die Einteilung der Bereiche 4 bis 2 erfolgte dabei ausgehend von der Nahtoberfläche in jeweils 0,2 mm Abschnitte. Dem Bereich 1 wurde die restliche Lötnahtdicke inklusive der gesamten Nahtwurzel zugeteilt. Der Bereich 4 wird in jedem Falle durch die nachfolgenden automatisierten und manuellen Schleifvorgänge bearbeitet. Je nach Stärke und Häufigkeit (bspw. aufgrund von Randkerben) kann auch der Bereich 3 von der Schleifbearbeitung betroffen sein. Dadurch könnten bspw. Poren freigelegt oder zugeschmiert werden. Alternativ kommt es zu einer Verringerung der Restwandstärke zwischen Pore und Nahtoberfläche, was in den Lackierereiföfen aufgrund der Expansion der Gase zu einem Aufplatzen führen kann. Durch die erforderliche Nacharbeit ist daher das Auftreten von Nahtimperfectionen in den Bereichen 3 und 4 als äußerst kritisch einzustufen und im besten Falle zu vermeiden. Unregelmäßigkeiten in den Bereichen 1 und 2 sind nicht ersichtlich und haben geringere Auswirkungen auf nachfolgende Prozesse, können aber

über eine größere Nahtlänge zu einer Schwächung der gesamten Verbindung führen. In kleiner Anzahl und Größe sind Poren in diesen Bereichen zulässig.

4.3 Analyse Energieeintrag

4.3.1 Einfluss Energieeintrag auf Nahtqualität

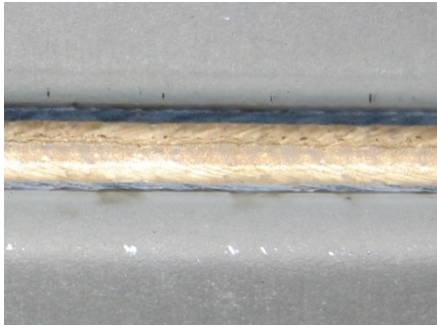
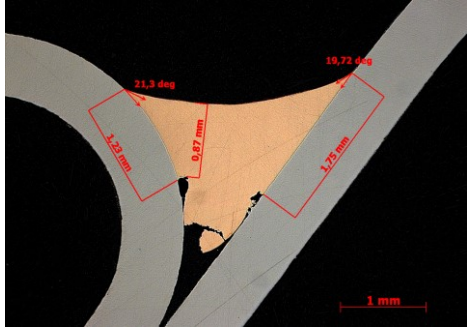

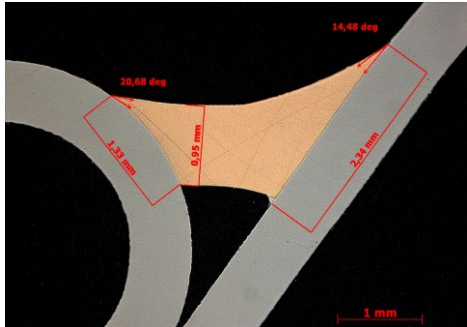
Im gesamten Konzern kommen zwei Prinzipien (Heiß- und Kaltdraht) zum Einsatz, wodurch es in Voruntersuchungen einer Abprüfung beider Versionen bedarf. Kaltdraht meint dabei die Variante, bei der der Zusatzwerkstoff allein durch die am Bearbeitungsort vorliegende Laserleistung aufgeschmolzen wird. Bei Heißdraht wird der Zusatzdraht vorgewärmt, was in dieser Arbeit konduktiv über Widerstandserwärmung erfolgt (siehe Abschnitt 2.3.3) und einen zusätzlichen Energieeintrag (P_{Vor}) in die Prozesszone ermöglicht. In Tabelle 4.3 sind die Vorwärmleistungen errechnet, welche sich aus den voreingestellten Strömen ergeben und nachfolgend für die Untersuchungen verwendet werden.

Tabelle 4.3 Gewählte Vorwärmströme und sich ergebende Vorwärmleistungen

Gewählter Vorwärmstrom	Gemessene Spannung	Errechnete Vorwärmleistung ($P_{Vor} = U \cdot I$)
30 A	0,5 V	15 W
50 A	0,8 V	40 W
70 A	1,1 V	77 W
90 A	1,3 V	117 W
110 A	1,5 V	165 W
130 A	1,8 V	234 W
150 A	2,1 V	315 W

Beim Evaluieren der Referenzparameter konnten zum Teil deutliche Unterschiede in der Nahtausbildung festgestellt werden. Dies betrifft vor allem die Nahtlage in der Fuge und die Geometrie der Naht, besonders im Wurzelbereich. Dieser Sachverhalt ist exemplarisch in Tabelle 4.4 verdeutlicht.

Tabelle 4.4 Vergleich der Nahtausbildungen für Heiß- und Kaltdrahtverfahren am schrägen Bördelstoß ($v_R = 3$ m/min; $v_{Dr} = 3,2$ m/min)

Parameter	Oberfläche	Querschliff
Heißdraht: $P_L = 3,0$ kW, $P_{Vor} = 165$ W		
Kaltdraht: $P_L = 3,6$ kW, $P_{Vor} = 0$ W		

Während sich bei Kaltdraht das erstarrte Lot wie eine Brücke zwischen den beiden Fügepartnern ausbildet, dringt die Naht bei der Verwendung von Heißdraht wesentlich weiter in die Fuge ein. Dies müsste bei gleichen geometrischen Verhältnissen (Radien und Spalt) sowie konstantem Drahtvolumen zu einer Erhöhung der minimalen Verbindungsbreite und der Anbindungsängen führen. Allerdings erfolgt die Benetzung nur in Bereichen der direkten Vorwärmung durch den Laser [Hoff04a, Grim10] und auch die Schliffe bestätigen, dass der schmelzflüssige Draht nicht in der Lage ist, die Grundwerkstoffe in der Tiefe der Fuge zu benetzen. Es kommt zur Ausbildung einer nicht angebundenen Lötnahtwurzel, dem sogenannten „Lötsack“. Dadurch kommt es bei der Heißdrahtvariante zu erheblichen Schwankungen der Verbindungsbreite. Im Gegensatz dazu bildet sich bei der Verwendung von Kaltdraht eine deutlich gleichmäßigere Nahtwurzel aus.

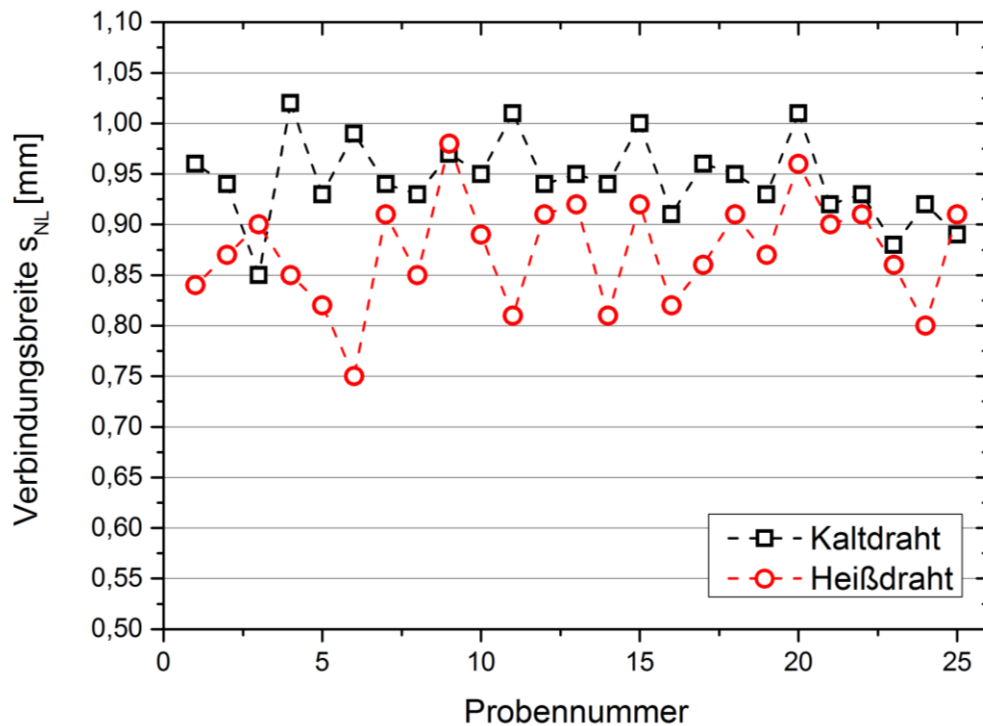


Abbildung 4.16 Minimale Verbindungsbreite (s_{NL}) bei Heiß- ($P_L = 3,0$ kW, $P_{Vor} = 165$ W) und Kaltdrahtprozessen ($P_L = 3,6$ kW, $P_{Vor} = 0$ W); weitere Parameter: $v_R = 3$ m/min; $v_{Dr} = 3,2$ m/min

Die Abbildung 4.16 zeigt die von 25 Schliffproben aus verschiedenen Versuchsreihen (mit gleichen Parametern) vermessenen minimalen Verbindungsbreiten. Daraus ist ersichtlich, dass bei beiden Varianten die geforderte Lötnahtdicke von mindestens 0,8 mm (vgl. Abschnitt 4.2.7.2) größtenteils erreicht wird. Da die Nähte allerdings mit nahezu identischen Eingangsgrößen im Technikumsumfeld erzeugt wurden, ist die Streuung der Heißdrahtvariante (von 0,75 bis 0,98 mm) als zu groß einzustufen. Diese Streuung wird in einem Großserienumfeld mit allen Einflussgrößen entlang der Prozesskette zunehmen und könnte noch deutlicher zur Unterschreitung der geforderten Mindestgröße von 0,8 mm führen. Der Kaltdrahtprozess ist aufgrund der glatteren Nahtwurzel und der Benetzung in den direkt vom Laserspot bestrahlten Bereichen bezüglich des „A-Maßes“ stabiler. Die Schwankungen befinden sich innerhalb von 0,88 bis 1,01 mm und sind damit gegenüber Heißdraht deutlich über der geforderten Grenze von 0,8 mm. Allerdings sind auch beim Kaltdrahtprozess Nahtimperfectionen im Wurzelbereich detektierbar. So kommt es bspw. zur Ausbildung einer Fehlstelle im erstarrten Lot zum Dachradius hin, welche sich zum einen geschlossen (als Pore) und zum anderen geöffnet (als nicht vollständig benetzte Lötnahtwurzel) ausbilden kann. Ist die Fehlstelle offen, kann es ebenfalls zu einem Herabsetzen der Lötnahtdicke kommen. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 4.17 dargestellt.

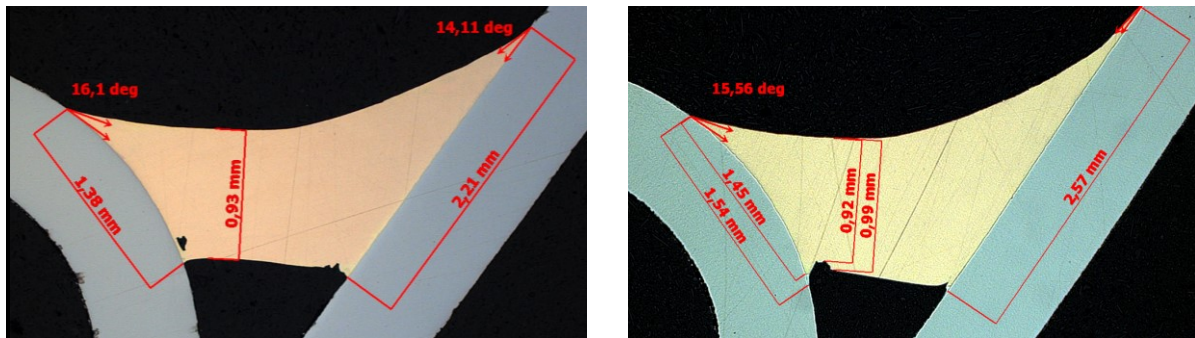


Abbildung 4.17 Fehlstellen bei Kaltdrahtproben (Referenzparameter $P_L = 3,6 \text{ kW}$, $P_{Vor} = 0 \text{ W}$; $v_R = 3 \text{ m/min}$; $v_{Dr} = 3,2 \text{ m/min}$; $\alpha = 5^\circ$)

Die auftretenden Unterschiede im Nahtquerschnitt sowie die Lage in der Fuge resultieren zudem in verschiedenen Anbindungsängen von Heiß- und Kaltdraht. Bei Kaltdraht liegt die Naht höher in der Fuge, wobei nahezu der gesamte vom Laserstrahl erwärmte Bereich benetzt werden kann. Im Gegensatz dazu, ist in Abbildung 4.18 zu erkennen, dass bei der Verwendung von Heißdraht sowohl am Dach als auch am Seitenwandrahmen, geringere Anbindungsängen entstehen. Der Abstand zwischen den Anbindungsängen ist allerdings bei der Heißdrahtvariante geringer, was auf eine symmetrischere Nahtausbildung hinweist.

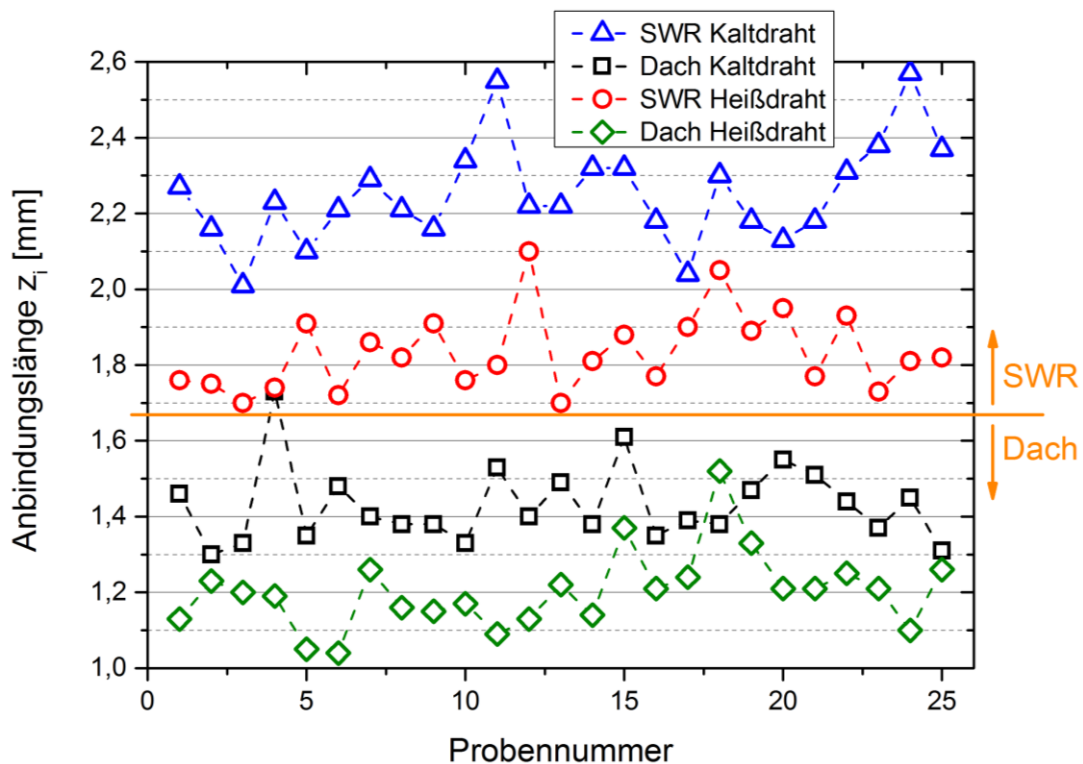


Abbildung 4.18 Anbindungsängen bei Heiß- ($P_L = 3,0 \text{ kW}$, $P_{Vor} = 165 \text{ W}$) und Kaltdrahtproben ($P_L = 3,6 \text{ kW}$, $P_{Vor} = 0 \text{ W}$); weitere Parameter: $v_R = 3 \text{ m/min}$; $v_{Dr} = 3,2 \text{ m/min}$; $\alpha = 5^\circ$

Als letztes maßliches Kriterium wurden die Benetzungswinkel untersucht (siehe Abbildung 4.19). Diese unterliegen sowohl bei Heiß- als auch bei Kaltdraht großen Schwankungen. Als Ursache sind dafür vor allem die Geometrieinflüsse und die zyklische Bewegung der

Benetzungsfront zu nennen, welche in Kapitel 2.3.1 und 2.5.2 näher beschrieben wurden. Wie in den Oberflächenaufnahmen (Tabelle 4.4) zu erkennen, verlaufen die Benetzungslinien (Übergang zwischen Lot zu Grundwerkstoff) an der Nahtoberseite gewellt. Dadurch kommt es auch zu Schwankungen in Abhängigkeit von der Position für die Entnahme der Schliffprobe. Die Ausprägung der Welligkeit der Benetzungslinie tritt bei den Kaltdrahtproben im Vergleich zum Heißdraht stärker auf. Dagegen ist bei letzterer Variante der Zinkabbrand auf dem Dachradius etwas größer, da die Naht insgesamt tiefer liegt. Ein Anschmelzen der Grundwerkstoffe sowie eine ausgeprägte Randkerbigkeit traten bei keiner Referenzprobe auf.

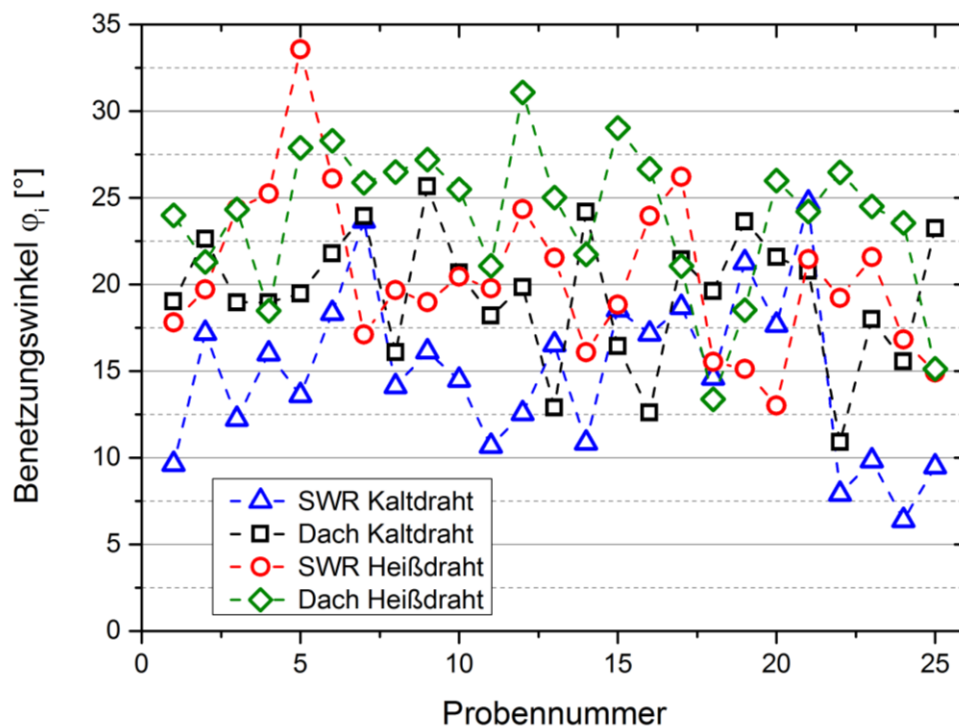


Abbildung 4.19 Benetzungswinkel bei Heiß- ($P_L = 3,0 \text{ kW}$, $P_{Vor} = 165 \text{ W}$) und Kaltdrahtproben ($P_L = 3,6 \text{ kW}$, $P_{Vor} = 0 \text{ W}$); weitere Parameter: $v_R = 3 \text{ m/min}$; $v_{Dr} = 3,2 \text{ m/min}$

Die Untersuchungen zeigen, dass ein direkter Zusammenhang zwischen den Anbindungs-längen und den Benetzungswinkeln besteht. Bei kleinen Benetzungswinkeln kann das Lot den Grundwerkstoff besser benetzen und zieht sich am Bauteil nach oben. So erreicht bspw. die Kaltdrahtprobe 24 mit dem kleinsten Benetzungswinkel am Seitenwandrahmen die größte Anbindungslänge. Folglich bewirken größere Unterschiede der Benetzungswinkel auch stärkere Schwankungen in den Anbindungs-längen. Zusätzlich wurde festgestellt, dass bei leichter Randkerbigkeit der Benetzungswinkel über die Nahtlänge einerseits nicht konstant ist, andererseits nicht über 30° steigt. Bei starker Randkerbigkeit wird dieser Winkel deutlich überschritten, was durch den fehlenden Zusatzwerkstoff oder die sehr tief liegende Naht ein Anschmelzen des Grundwerkstoffes bewirkt. Dies führt zu einer Legierungsbildung

in der Lötnaht und kann die Festigkeit im Übergang zum Grundwerkstoff sowie die Korrosionsbeständigkeit senken. Je nach Ausprägung können diese Unregelmäßigkeiten durch Nacharbeit beseitigt werden [PV1602]. Zusammenfassend können die arithmetischen Mittelwerte der Tabelle 4.5 inklusive der Standardabweichung entnommen werden. Sie bilden für die weiteren Untersuchungen in Kapitel 4 die Referenzwerte.

Tabelle 4.5 Mittelwerte und Standardabweichungen für die wichtigsten Kenngrößen der Referenznähte bei Heiß- ($P_L = 3,0 \text{ kW}$, $P_{Vor} = 165 \text{ W}$) und Kaltdrahtproben ($P_L = 3,6 \text{ kW}$, $P_{Vor} = 0 \text{ W}$); weitere Parameter: $v_R = 3 \text{ m/min}$; $v_{Dr} = 3,2 \text{ m/min}$

Bezeichnung	Kaltdraht		Heißdraht	
	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
Minimale Verbindungsbreite	0,94 mm	0,04 mm	0,87 mm	0,05 mm
Anbindungslänge Dach	1,43 mm	0,10 mm	1,20 mm	0,10 mm
Anbindungslänge Seitenwandrahmen	2,25 mm	0,13 mm	1,83 mm	0,10 mm
Benetzungswinkel Dach	19,45°	3,78°	23,87°	4,24°
Benetzungswinkel Seitenwandrahmen	14,89°	4,70°	20,46°	4,58°

Wird je nach Anmutungsanforderung eine tiefere Lage der Naht gefordert, zeigt sich ein deutlicher Vorteil beim Laserstrahllöten mit Heißdraht. Dies ist anhand einer direkten Gegenüberstellung von Heiß- und Kaltdraht im Querschliff (Abbildung 4.20) dargestellt. Die Naht der Kaltdrahtvariante liegt bezüglich des Dachradius wesentlich weiter oben. Der helle Bereich kennzeichnet dabei die Schnittmenge der beiden Varianten. Im unteren Teil der Darstellung ist die ausgeprägte „Lötnahtwurzel“ des Heißdrahtprozesses ersichtlich.

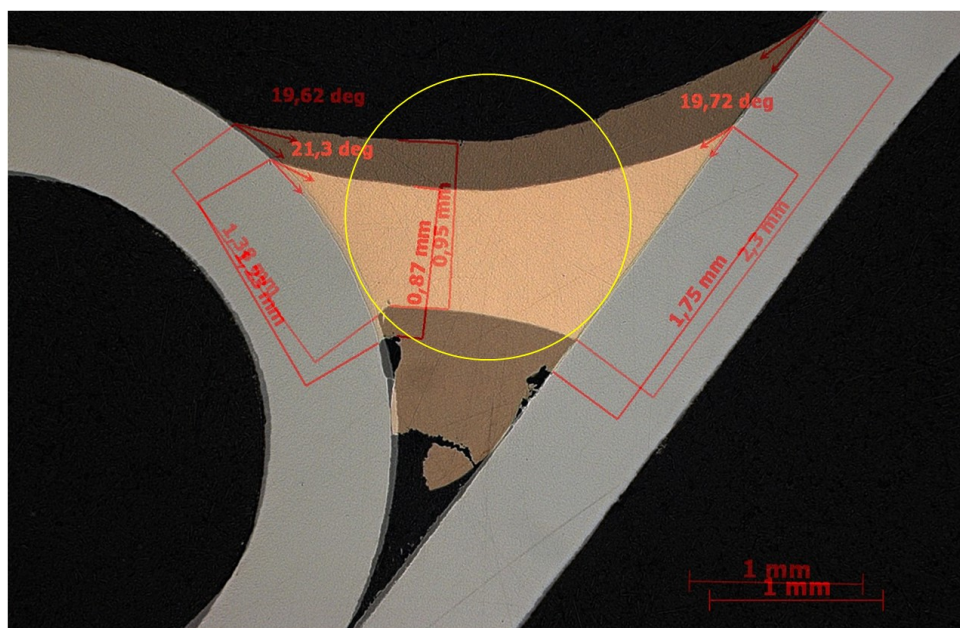


Abbildung 4.20 Direkter Vergleich Heiß- und Kaltdraht mit maßstäblichem Drahtdurchmesser (gelb)

Für die Bestimmung der inneren Merkmale (innenliegende Poren) über eine größere Nahtlänge wurden jeweils 6 Proben mit einer Länge von 40 mm ausgewählt und im CT untersucht. Die Ergebnisse für die Heißdrahtvariante in den einzelnen unter Punkt 4.2.7.3 definierten Bereichen zeigt Abbildung 4.21. Daraus wird ersichtlich, dass die Referenznähte sehr porenarm sind. Es treten lediglich einige Poren im unkritischen Wurzelbereich auf. Diese befinden sich auf der Seite des Seitenwandrahmens, bewirken aber keine Verringerung der minimalen Verbindungsbreite. Für weitere Vergleiche wird der arithmetische Mittelwert gebildet, der für die unteren Bereiche ca. zwei Poren ergibt.

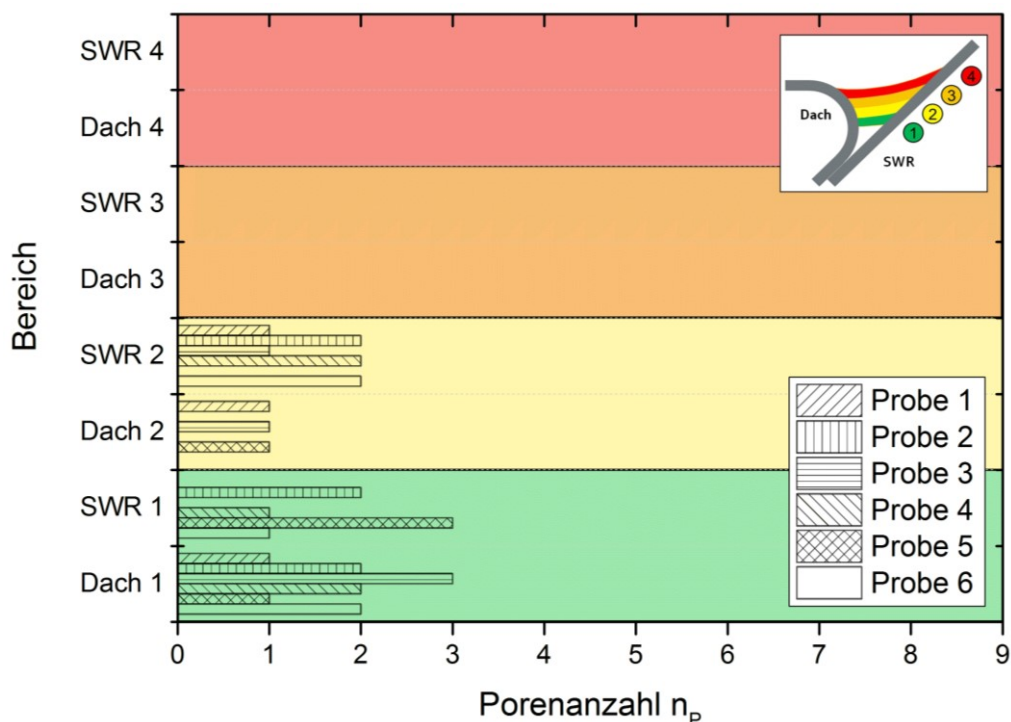


Abbildung 4.21 CT-Analyse der Porenanzahl der Referenznähte mit Heißdraht ($P_L = 3,0 \text{ kW}$, $P_{Vor} = 165 \text{ W}$; $v_R = 3 \text{ m/min}$; $v_{Dr} = 3,2 \text{ m/min}$)

Beim Laserstrahllöten mittels Kaltdraht befinden sich die Poren ebenfalls hauptsächlich in den unteren Bereichen. Allerdings finden sich insgesamt deutlich mehr Poren. Dies hängt mit der beschriebenen Fehlstelle am Radius des Dachbleches zusammen (vgl. Abbildung 4.22). Zudem sind im Vergleich zum Heißdraht vermehrt Poren im Bereich eins und zwei sowie eine Pore im Bereich 3 vorhanden. Dies ist auch nach der Mittelwertbildung für die Nahtqualität als kritischer zu betrachten.

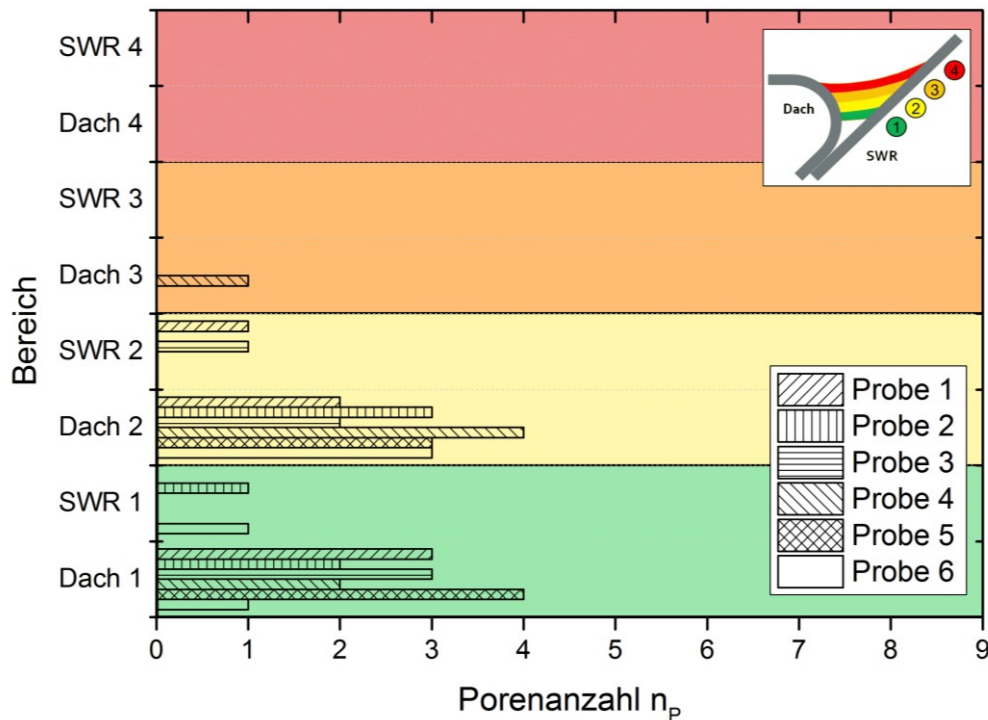


Abbildung 4.22 CT-Analyse der Porenanzahl der Referenznähte mit Kaltdraht ($P_L = 3,6 \text{ kW}$, $P_{Vor} = 0 \text{ W}$; $v_R = 3 \text{ m/min}$; $v_{Dr} = 3,2 \text{ m/min}$)

Die ermittelten geeignetsten Referenzparameterbereiche hinsichtlich Verbindungsbreite, Oberfläche und Porenanzahl sind für die Laserlötungen mit dem Standardequipment in Tabelle 4.6 noch einmal zur Übersicht zusammengefasst. Die Parameter wurden für die Heiß- sowie für die Kaltdrahtvariante ermittelt.

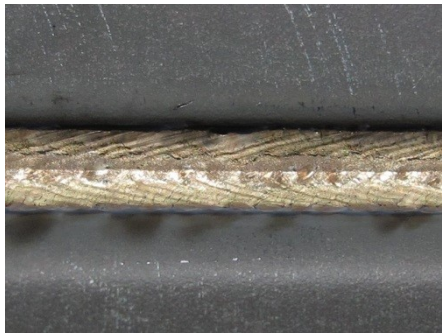
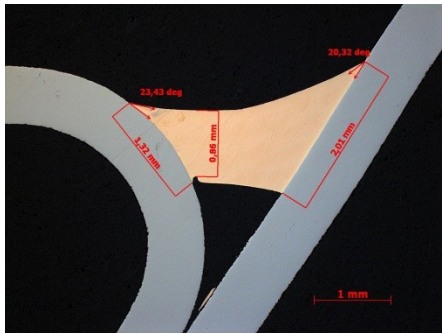

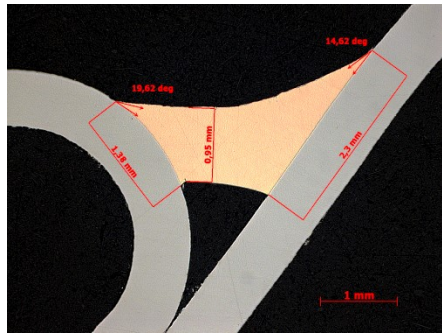
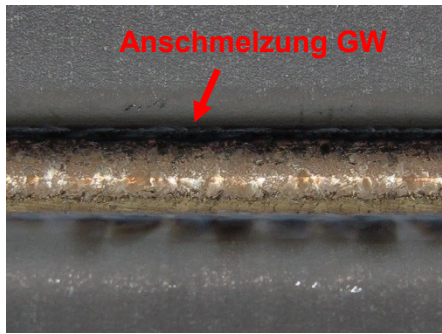
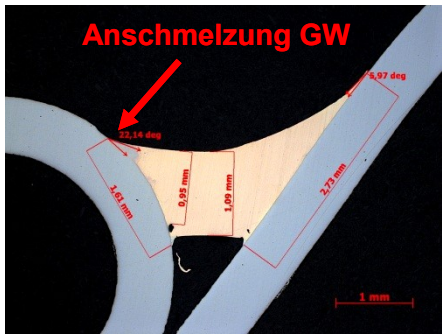
Tabelle 4.6 Ermittelte Referenzparameter für Heiß- und Kaltdraht mit Standardequipment

Parameter	Heißdraht	Kaltdraht
Energieeintrag		
Laserleistung P_L	3 kW	3,6 kW
Vorwärmleistung P_{Vor}	165 W	0 W
Winkellagen		
Lateralwinkel α	5°	
Schleppwinkel β	0°	
Verdrehwinkel γ	0°	
Drahtzuführwinkel τ	45°	
Geschwindigkeiten		
Robotergeschwindigkeit v_R	3 m/min	
Drahtgeschwindigkeit v_{Dr}	3,2 m/min	
Versatz		
Lateralversatz δ	0 mm	
Stickout-Länge l_s	8 mm	

4.3.1.1 Variation Laserleistung

Um den Einfluss des Vorwärmstromes untersuchen zu können, muss dieser von der Laserabsorption extrahiert werden. Dazu bieten sich Kaltdraht-Lötungen an. Dabei konnten ab einer Laserleistung von 3,0 kW gute Ergebnisse erreicht werden (vgl. Tabelle 4.7). Unterhalb dieser Grenze entstehen grobschuppige Nahtoberflächen mit einer leichten Randkerbigkeit. Dagegen kommt es ab einer Laserleistung von 3,8 kW zu einer Anschmelzung des Grundwerkstoffes, welcher sich mit dem Lötgut vermischt. Zusätzlich nimmt bei den hohen Leistungen die Oberflächenqualität aufgrund von zunehmender Randkerbigkeit im Übergang zum Grundwerkstoff (Anschmelzungen) ab. Der Leistungsbereich zwischen 3,4 und 3,6 kW kann als Arbeitsbereich mit guten Oberflächenqualitäten angesehen werden.

Tabelle 4.7 Einfluss der Laserleistung auf die Nahtausbildung bei Kaltdraht am schrägen Bördelstoß ($v_R = 3 \text{ m/min}$; $v_{Dr} = 3,2 \text{ m/min}$; $\alpha = 5^\circ$)

Parameter	Oberfläche	Querschliff
$P_L = 3,0 \text{ kW}$, $P_{Vor} = 0 \text{ W}$		
$P_L = 3,6 \text{ kW}$, $P_{Vor} = 0 \text{ W}$		
$P_L = 4,0 \text{ kW}$, $P_{Vor} = 0 \text{ W}$		

Des Weiteren wird bis zu einer Ausgangsleistung von 3 kW der Grenzwert der minimalen Verbindungsbreite konstant unterschritten (Abbildung 4.23). Aufgrund der nicht ausreichenden Vorwärmung des Grundwerkstoffes ist es dem Lot nicht möglich, die Oberfläche vor allem dachseitig ausreichend zu benetzen. Zudem können Anbindungsfehler und Nahtimperfectionen durch mangelnde Zinkbeseitigung in der Nahtwurzel entstehen, welche wiederum die minimale Lötnahtdicke ebenfalls herabsetzen. Mit steigenden Ausgangsleistung und dem damit verbundenem höheren absorbierenden Anteil der Laserleistung können die Grundwerkstoffe und das Lot intensiver erwärmt sowie die Zinkbeschichtung rückstandsloser beseitigt werden. Dadurch dringen die Lötnahte tiefer in den Bördelstoß ein und erfahren gleichzeitig eine Streckung aufgrund der sich verengenden Fuge zwischen den Fügepartnern. Der damit verbundene Anstieg der minimalen Verbindungsbreite kann ab einer Laserleistung von 3,0 kW festgestellt werden. Die Lötnahtdicke steigt kontinuierlich mit der Laserleistung, wobei allerdings die unzulässigen Anschmelzungen des Grundwerkstoffes bei 3,8 kW beginnen. Der aus der Oberflächenanalyse abgeleitete Arbeitsbereich zwischen 3,2 und 3,6 kW konnte damit bestätigt werden.

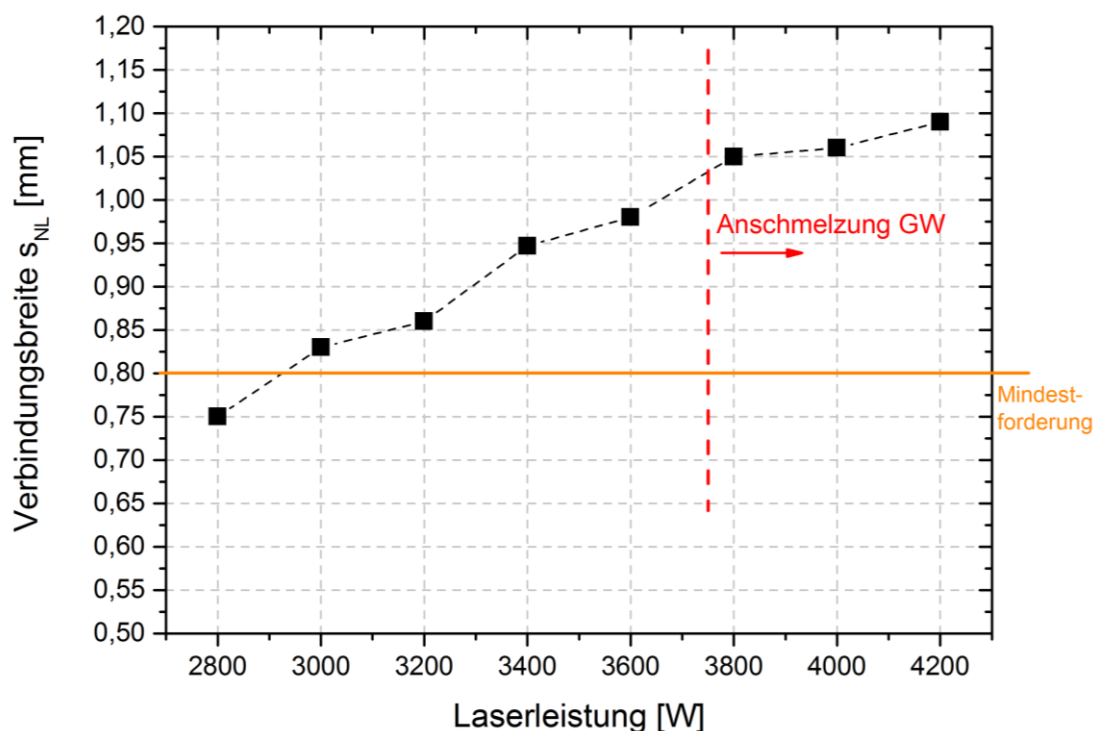


Abbildung 4.23 Minimale Verbindungsbreite in Abhängigkeit der Laserleistung (Kaltdraht: $P_{Vor} = 0$ W; $v_R = 3$ m/min; $v_{Dr} = 3,2$ m/min; $\alpha = 5^\circ$)

Die Anbindungsängen und Benetzungswinkel liegen in den bei Abschnitt 4.3.1 geschilderten Bereichen von unter 30° und sollen daher hier nicht näher erläutert werden. Interessant ist allerdings die Porenverteilung in Abhängigkeit von der Laserleistung. Diese wird in Abbildung 4.24 dargestellt.

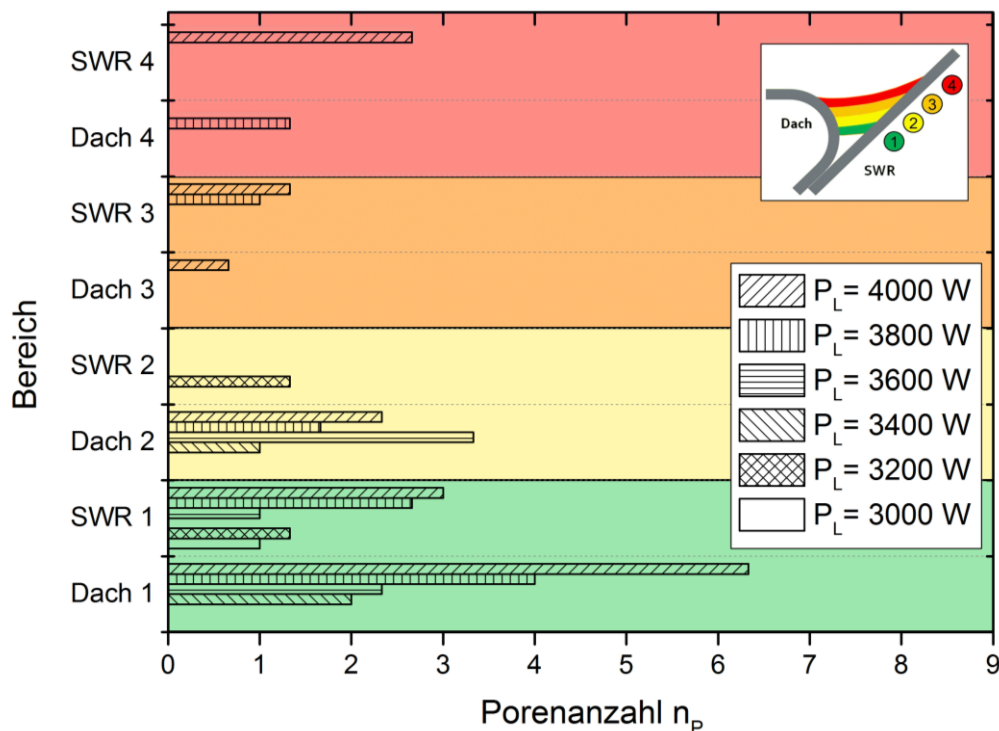


Abbildung 4.24 CT-Analyse der Porenanzahl bei Variation der Laserleistung (Kaltdraht: $P_{Vor} = 0$ W; $v_R = 3$ m/min; $v_{Dr} = 3,2$ m/min; $\alpha = 5^\circ$)


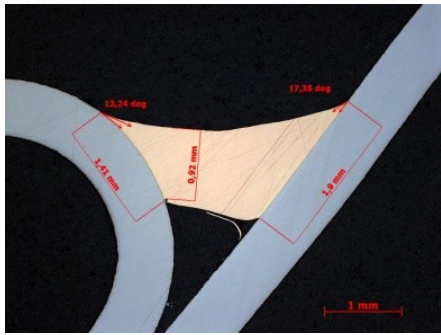

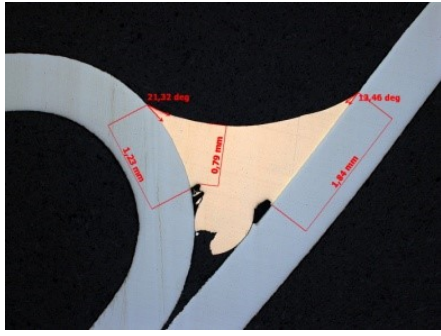


Daraus ist zu entnehmen, dass bei niedrigen Laserleistungen (3,0 und 3,2 kW) weniger bzw. keine Poren auftreten. Mit zunehmender Laserleistung steigt die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Poren in den unteren Bereichen sowohl dachseitig als auch am Seitenwandrahmen an. Dies hängt zum einen mit der unruhigeren Nahtwurzel und den sich bildenden Fehlstellen am Dach zusammen. Zum anderen wird durch die verstärkte Zinkverdampfung sowie Grundwerkstoffanschmelzungen ab 3,8 kW vor allem in den oberen Bereichen die Schmelzbadturbulenz erhöht. Somit treten Poren auch in den oberen Bereichen der Naht auf, was als äußerst kritisch zu bewerten ist. Allerdings bestätigen die Volumenanalysen mittels CT-Aufnahmen erneut den validierten Parameterbereich ($P_L = 3,2 - 3,6$ kW).

4.3.1.2 Variation konduktive Drahtvorwärmung

Ausgehend vom Standardparametersatz für die Verwendung von Heißdraht ($P_{Vor} = 165$ W) wurden die Vorwärmstromwerte am Drahtfördergerät in verschiedenen Abstufungen eingestellt. Anhand der Sichtprüfung konnten bereits bei Vorwärmleistungen von $P_{Vor} = 40$ W Veränderungen gegenüber Kaltdraht festgestellt werden. Die Schuppigkeit der Oberfläche ist vergleichbar, jedoch bewirkt der zusätzliche Energieeintrag über die konduktive Drahtvorwärmung eine welligere Benetzungslinie, welche zu leichter Randkerbigkeit am Dach-

bauteil führt (siehe $P_{Vor} = 77 \text{ W}$ in Tabelle 4.8). Im Bereich von 117 W bis 165 W (P_{Vor}) konnten gute Oberflächenqualitäten mit konstanten Benetzungslinien und starken Nahtunterwölbungen erzeugt werden. Höhere Stromstärken ($P_{Vor} = 234 \text{ W}$) bewirken ähnlich einer zu hohen Laserleistung eine verstärkte Anschmelzung des Grundwerkstoffes auf der Dachseite. Daher bilden sich raue Oberflächen ohne ausgeprägte Nahtunterwölbung aus. Zusätzlich entsteht eine rotbraun glänzende Oxidschicht auf der Nahtoberfläche ausgehend vom Dachradius.

Tabelle 4.8 Einfluss der Vorwärmenergie des Drahtes auf die Nahtausbildung bei konstanter Laserleistung am schrägen Bördelstoß (weitere Parameter: $v_R = 3 \text{ m/min}$; $v_{Dr} = 3,2 \text{ m/min}$; $\alpha = 5^\circ$)

Parameter	Oberfläche	Querschliff
$P_L = 3,0 \text{ kW}$, $P_{Vor} = 77 \text{ W}$		
$P_L = 3,0 \text{ kW}$, $P_{Vor} = 117 \text{ W}$		
$P_L = 3,0 \text{ kW}$, $P_{Vor} = 234 \text{ W}$		

Während bis zu 40 W keine Unterschiede im Nahtquerschnitt gegenüber Kaltdraht bei konstanter Laserleistung festgestellt werden konnten, bildet sich ab 77 W eine bauchigere Nahtwurzel mit einem Anstieg der minimalen Verbindungsbreite aus (Abbildung 4.25). Mit einem mittleren Wert aus 3 Schliffproben von 0,95 mm wird die mittlere Lötnahtdicke der Referenznaht für Kaltdraht (0,94 mm) erreicht.

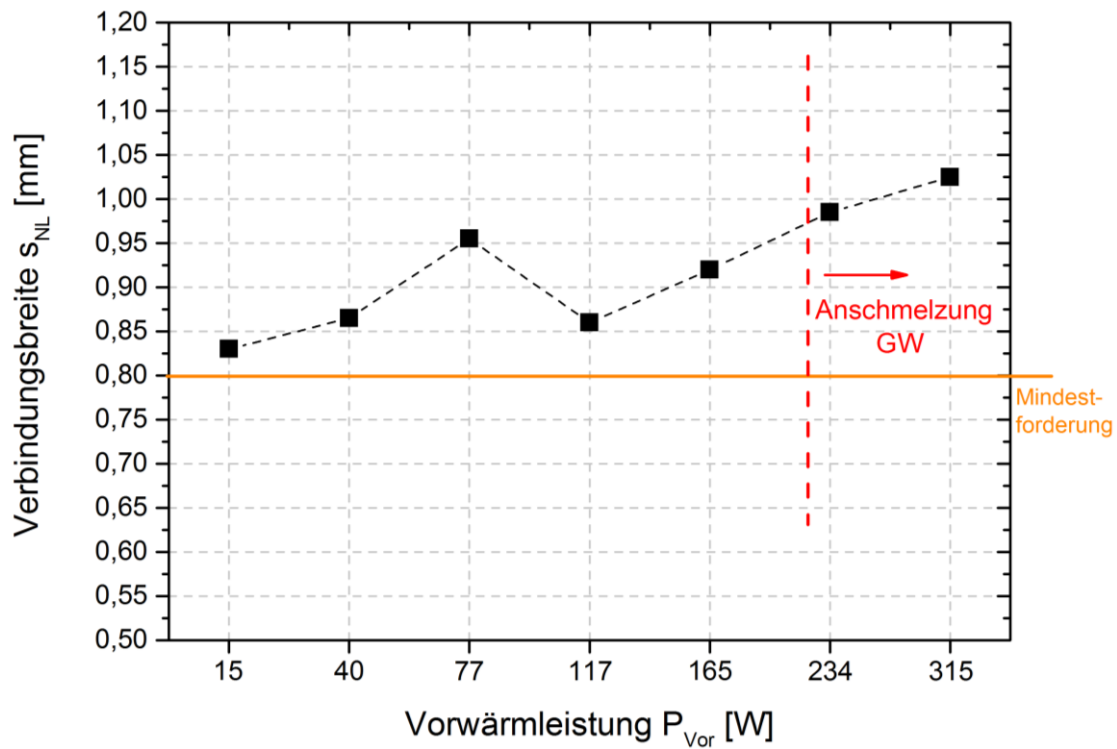


Abbildung 4.25 Minimale Verbindungsbreite in Abhängigkeit der Vorwärmleistung (Heißdraht: $P_L = 3$ kW; $v_R = 3$ m/min; $v_{Dr} = 3,2$ m/min; $\alpha = 5^\circ$)

Ab einer Stromstärke von 117 W kann die Ausbildung einer nicht angebondenen Nahtwurzel („Lötsack“) festgestellt werden. Dieses Phänomen verringert, durch die in Kapitel 4.3.1 beschriebene Einschnürung besonders im Bereich des Dachbleches die minimale Verbindungsbreite auf kritische Werte unterhalb des geforderten Grenzwertes von 0,8 mm. Bei weiterer Erhöhung des Energieeintrages mittels Drahtvorwärmung kann aufgrund der geringeren Viskosität der Kupferschmelze die Fuge besser gefüllt und die Einschnürung verkleinert werden, was zu einem kontinuierlichen Anstieg der minimalen Verbindungsbreite führt.

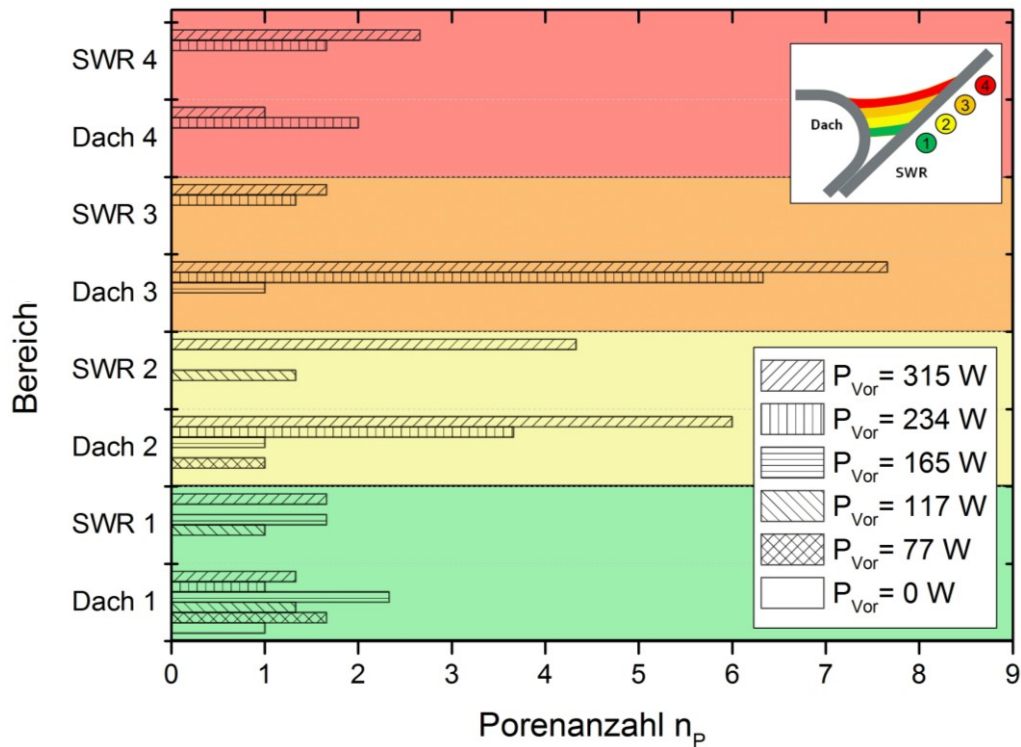


Abbildung 4.26 CT-Analyse der Porenanzahl bei Variation der Vorwärmleistung (Heißdraht: $P_L = 3 \text{ kW}$; $v_R = 3 \text{ m/min}$; $v_{Dr} = 3,2 \text{ m/min}$; $\alpha = 5^\circ$)

Vergleichbar mit der Porenanalyse in Kapitel 4.2.1.1, lässt sich auch mit zunehmendem Energieeintrag durch konduktive Drahtvorwärmung ein Anstieg der Porenanzahl feststellen (Abbildung 4.26). Da die Naht bis 77 W über die gesamte Nahtlänge keinen „Lötsack“ ausbildet, verhält sich die Löt-naht im Schliff ähnlich wie bei Kaltdraht („Lotbrücke“). Allerdings lässt sich in den CT-Videos eine unruhigere bzw. bauchigere Nahtwurzel erkennen. Diese kann in Teilbereichen zu Schwankungen der minimalen Verbindungsbreite führen, wobei der Grenzwert nicht unterschritten wird. Zwischen 77 und 165 W bilden sich trotz pulsierender Löt-nahtwurzel kaum Poren aus. Besonders verstärkt kommt es ab 234 W zur Porenbildung in den kritischen oberen Bereichen der Naht, was die Theorie der Porenentstehung durch erhöhte Schmelzbadturbulenzen aufgrund von Grundwerkstoffanschmelzung und verstärkter Zinkverdampfung bestätigt. Die verstärkte Dynamik lässt sich auch anhand von High-Speed-(HS)-Kameraaufnahmen detektieren, welche zusätzlich schlagartige Eruptionen im Schmelzbad verdeutlichen. Die schematische Kennzeichnung für die Deutung der HS-Aufnahmen zeigt Abbildung 4.27.

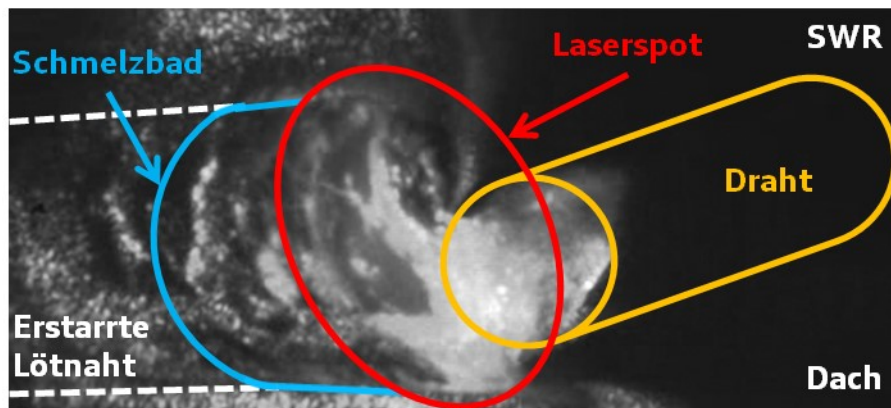


Abbildung 4.27 Kennzeichnung für HS-Sequenzen

Die Abbildung 4.28 zeigt die Einzelbilder einer HS-Videosequenz (560 fps), in der innerhalb weniger Millisekunden „Schmelzeauswürfe“ und damit verbunden Spritzer erkennbar sind. Nach ca. 9 ms stellt sich wieder ein stabiler Prozess ein. Diese Phänomene entstanden bei höherem Energieeintrag und teilweise bei höheren Vorschubgeschwindigkeiten.

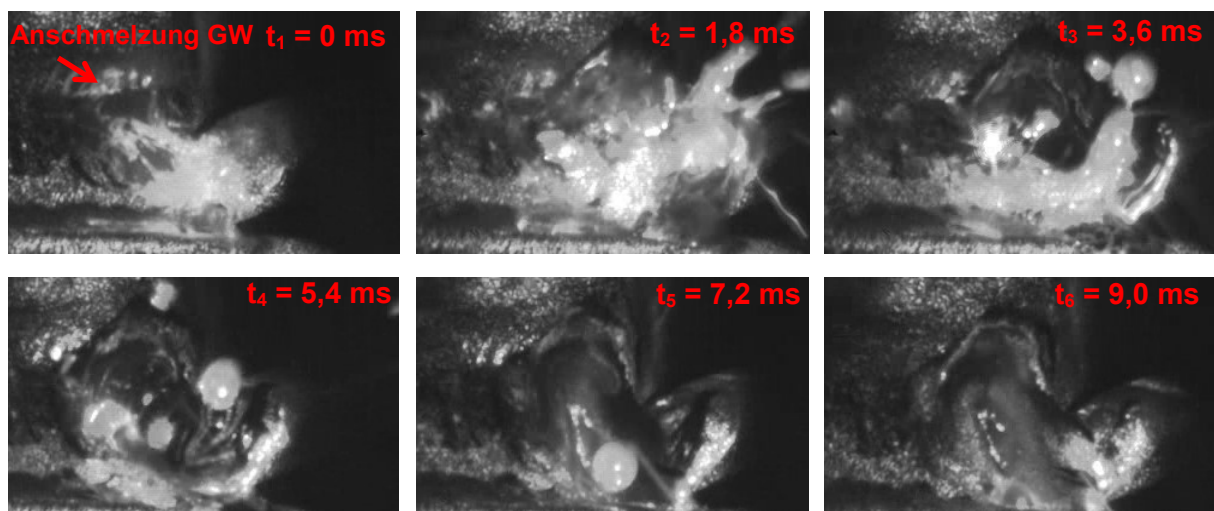


Abbildung 4.28 HS-Aufnahmen mit „schlagartigen“ Schmelzbaderuptionen ($P_L = 4,2 \text{ kW}$; $v_R = 3,5 \text{ m/min}$; $v_{Dr} = 3,7 \text{ m/min}$)

Zudem lassen sich mit der Methode der HS-Kameraaufnahmen auch die in Abschnitt 2.5.2 beschriebenen Einschnürungen an der Benetzungsfront aufgrund von diskontinuierlicher Drahtzufuhr und damit verbunden die Bildung von trichterförmigen Oberflächenporen nachweisen (Abbildung 4.29). Der Ausgangspunkt für die Porenentstehung ist dabei bei einer zentrierten Lage von Laserstrahl und Draht bezüglich der Fuge am schrägen Bördelstoß in den meisten Fällen eine un stetige Benetzung am spitzen Dachradius. Allerdings entstehen diese Unstetigkeiten in der Drahtzuführung („Drahtruckeln“) derartig schnell, dass der Slip-Stick-Effekt aufgrund einer Rollenführung ausgeschlossen werden kann. Vielmehr entstehen diese Effekte beim Abschmelzen des Drahtes. Wird demzufolge mehr Volumen der Fuge zugeführt als aufgeschmolzen werden kann, stößt der Draht bei

Nullspalt an das untere Ende der Fuge an und verzögert damit kurzzeitig den Benetzungsvorgang. Der Prozess stabilisiert sich wieder, sobald der Draht überwiegend aufgeschmolzen ist. Für diese Theorie spricht auch, dass der Effekt des „Drahtruckelns“ mit niedrigerer Energiezufuhr (bspw. verringerte Laserleistung verglichen zum Idealprozess) oder Erhöhung der Drahtgeschwindigkeit zunimmt.

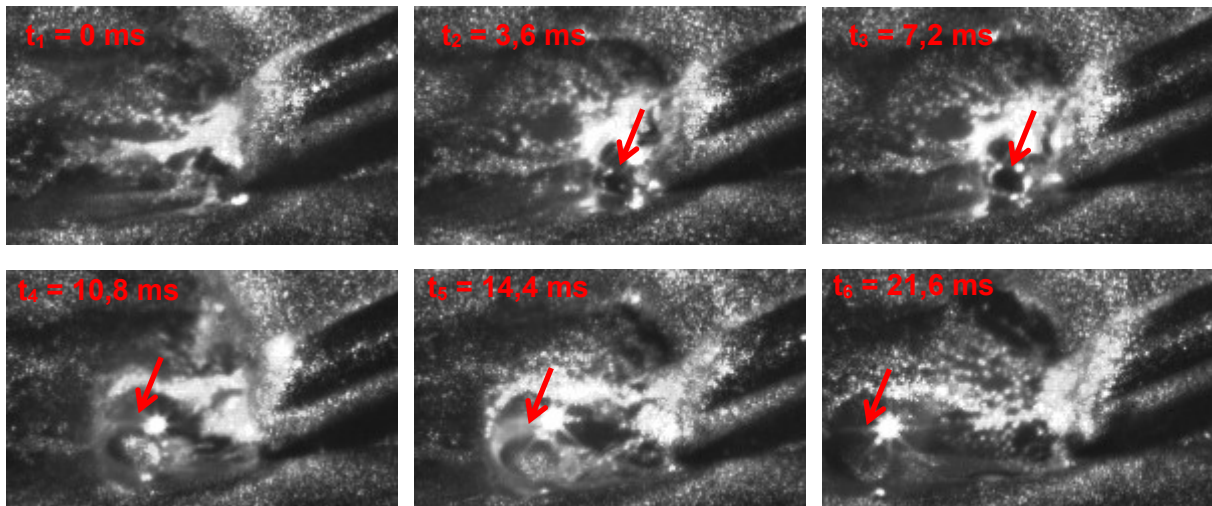


Abbildung 4.29 HS-Aufnahmen mit „schlagartiger“ Porenbildung ($P_L = 3,6 \text{ kW}$; $v_R = 3,0 \text{ m/min}$; $v_{Dr} = 3,7 \text{ m/min}$)

4.3.1.3 Variation Laserleistung und konduktive Drahtvorwärmung

Aufbauend auf den zuvor geschilderten Untersuchungen, welche eine Beeinflussung der Nahtqualität hinsichtlich Nahtlage und Verbindungsbreite („A-Maß“) durch die Variation des Energieeintrages zeigten, wurden in weiteren Versuchsreihen der Vorwärmstrom und die Laserleistung parallel variiert. Die Ergebnisse bezüglich der resultierenden „A-Maße“ für ausgewählte Vorwärmströme (Mittelwerte aus 6 Versuchsproben) zeigt das Diagramm in Abbildung 4.30. Die weiteren Parameter sind ebenfalls der Darstellung zu entnehmen.

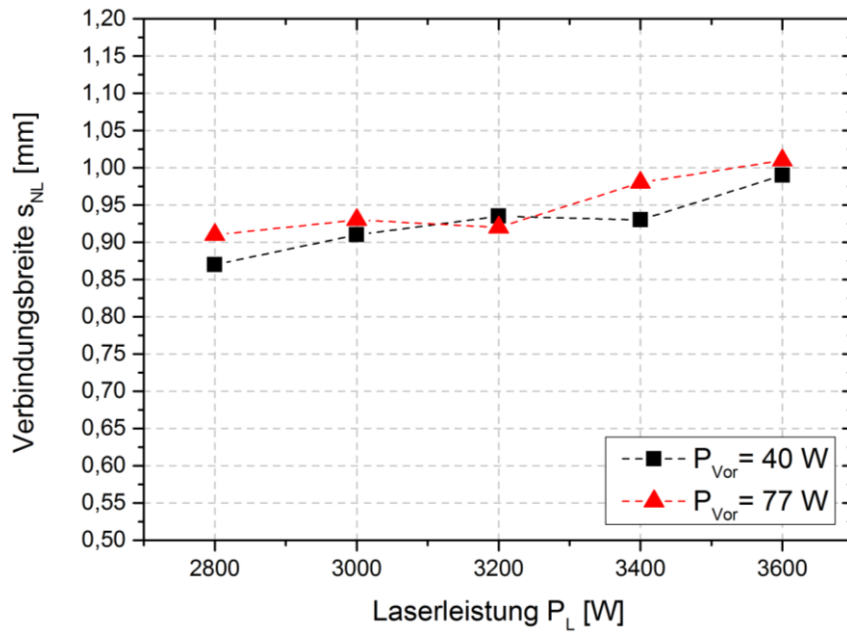


Abbildung 4.30 Verbindungsbreiten in Abhängigkeit der Laserleistung und des Vorwärmstromes ($v_R = 3$ m/min; $v_{Dr} = 3,2$ m/min)

Die Vorwärmleistungen (Werte für 40 und 117 W) zeigen tendenziell steigende Verbindungsbreiten mit zunehmendem Energieeintrag. Die besten Nähte bezüglich „A-Maß“ und ohne Anschmelzungen des Grundwerkstoffes wurden bei 3,6 kW erzielt. Dies ist den Schlißbildern in Tabelle 4.9 zu entnehmen. Somit konnte die Möglichkeit der Nahtmodellierung am schrägen Bördelstoß mit Hilfe eines moderaten Vorwärmstromes bzw. einer zusätzlich eingebrachten Energie über konduktive Drahtvorwärmung nachgewiesen werden.

Tabelle 4.9 Nahtausbildungen für ausgewählte Vorwärmleistungen ($v_R = 3$ m/min; $v_{Dr} = 3,2$ m/min)

Parameter	Oberfläche	Querschliff
$P_L = 3,6$ kW, $P_{Vor} = 40$ W		
$P_L = 3,6$ kW, $P_{Vor} = 77$ W		

Abschließend wurde ein Prozessfenster nach äußerlichen und innerlichen Befunden bzw. Kriterien für den Standardradius und bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 3 m/min in Abhängigkeit des Gesamtenergieeintrages (aufgeschlüsselt nach Laserleistung und Vorwärmleistung) generiert. Dies zeigt Abbildung 4.31. Dabei ist ersichtlich, dass erwartungsgemäß die Laserleistungen bei steigender konduktiver Vorwärmleistung für gute Nahtqualitäten (grüne Raute) reduziert werden müssen. Oberhalb des grünen Bereiches, d.h. bei höheren Laserleistungen, nehmen vor allem die Grundwerkstoffanschmelzungen und die Randkerbigkeit zu (Oberfläche n.i.O., rotes Quadrat). Unterhalb des guten Bereiches entstehen ebenfalls unruhige Benetzungslinien und damit Randkerben, sowie nicht zulässige Unterschreitungen der Verbindungsbreite (rote Kreuze). Damit wird der Arbeitsbereich nach unten begrenzt, sodass keine weitere Reduzierung der Laserleistung bspw. bis zu dem in Kapitel 2.5.4 geschilderten unvollständig aufgeschmolzenen Draht, abgeprüft wurde.

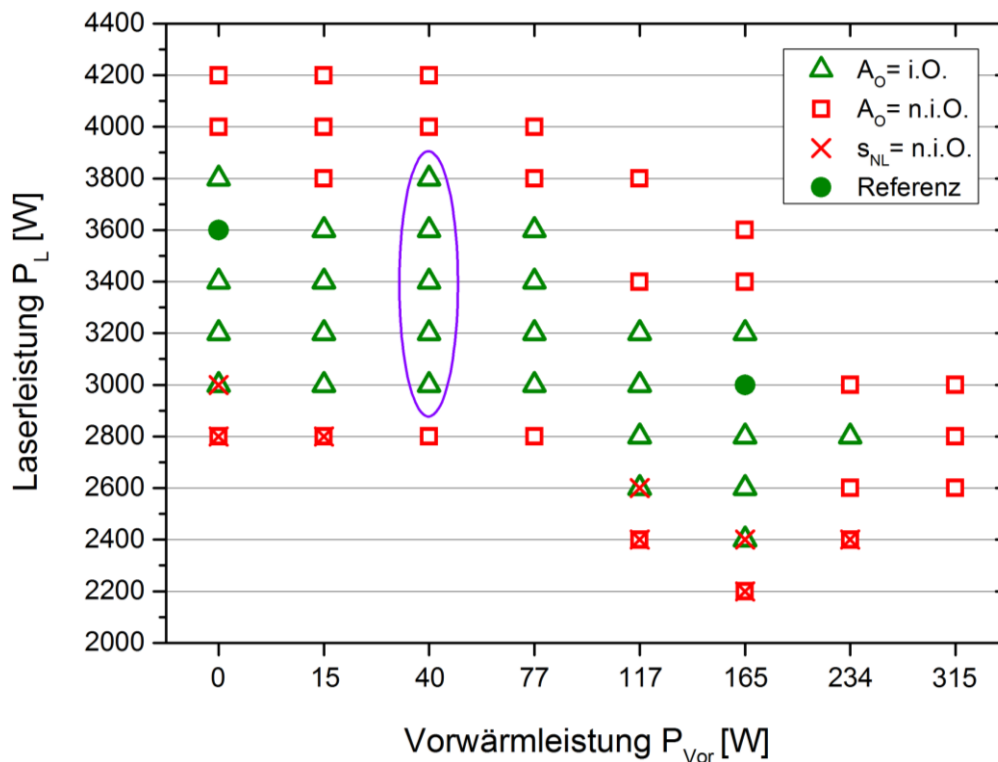


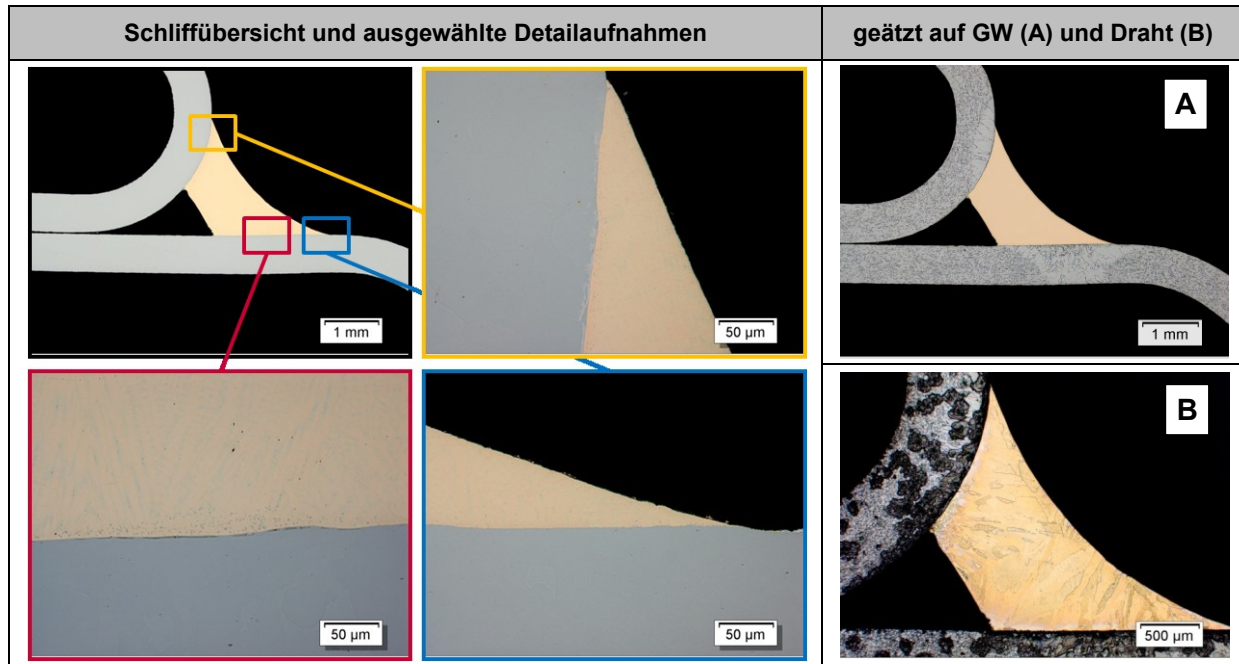
Abbildung 4.31 Prozessfenster für verschiedene Energieeinträge ($v_R = 3$ m/min; $v_{Dr} = 3,2$ m/min)

Das Prozessfenster für einen robusten Prozess mit guten Nahtqualitäten ist bei einer Vorwärmleistung von 40 W am größten. Wird nun für eine Großserie bei konstant gehaltenen Vorwärmleistungen (geregelt durch Stromquelle) von schwankenden Laserleistungen durch bspw. verschmutzende Schutzgläser der Bearbeitungsoptik ausgegangen, bieten sich die Bereiche mit moderaten Vorwärmströmen (40 – 77 W) für robuste Prozesse an. Bei diesen verschlechtert sich erst die Oberfläche und nicht gleichzeitig oder vorher die Verbindungsreite, wie bei den anderen Vorwärmleistungen.

4.3.1.4 Metallografische Analyse

Die metallografischen Analysen der Untersuchungen zum Energieeintrag zeigten zusätzlich unterschiedliche Ausprägungen der Diffusionszonen und in den auslaufenden Bereichen des benetzenden Lotwerkstoffes. Charakteristische Merkmale einer lasergelöteten Referenzprobe im Querschliff zeigt Tabelle 4.10.

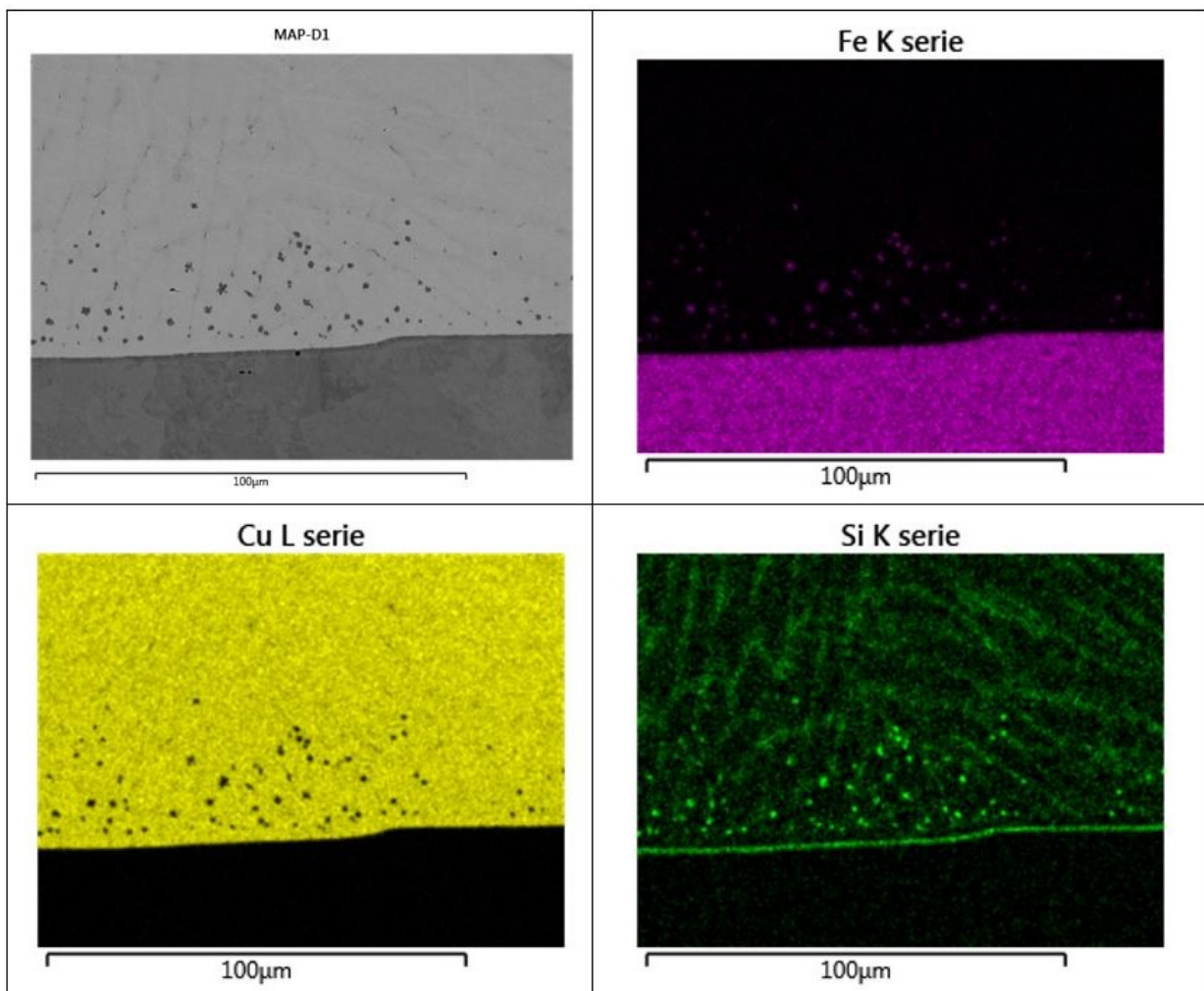
Tabelle 4.10 Metallografische Analyse der Referenzprobe ($P_L = 3,6 \text{ kW}$, $P_{Vor} = 0 \text{ W}$; $v_R = 3 \text{ m/min}$; $v_{Dr} = 3,2 \text{ m/min}$)



Aus den Abbildungen der metallografischen Analyse der Referenzprobe wird ersichtlich, dass die Naht an beiden Stahlblechen vollständig, d.h. bis zur Nahtwurzel angebunden hat. Es bilden sich im Übergang zum Grundwerkstoff keine Schmelztropfen mit Zink oder mit Anschmelzungen des Grundwerkstoffes aus (siehe Detailaufnahmen). Die Wärmeeinflusszone, in welcher sich Grobkorn ausbildet (Teilbild A), erstreckt sich beim Seitenwandrahmen über die gesamte Blechdicke und beim Dachblech über die halbe Blechdicke. Dies spricht für eine höhere Energieeinkopplung am Seitenwandrahmen, obwohl der Laser mittig zur Fuge des schrägen Bördelstoßes eingestellt war. Auffällig ist zudem, dass eine Anbindung des Lotwerkstoffes ausschließlich im Grobkornbereich stattfindet. Weiterhin wurde der Schliff abschließend auf den Drahtwerkstoff geätzt. Die grobkörnige Struktur, welche zur Mitte der entstanden Lotbrücke gerichtet ist, spricht für eine vollständige Aufschmelzung des Zusatzwerkstoffes im Referenzprozess. Die sich ausbildende Diffusionszone zwischen dem Lotwerkstoff und dem Grundwerkstoff mit einer Dicke von wenigen Mikrometern wird nachfolgend näher erläutert.

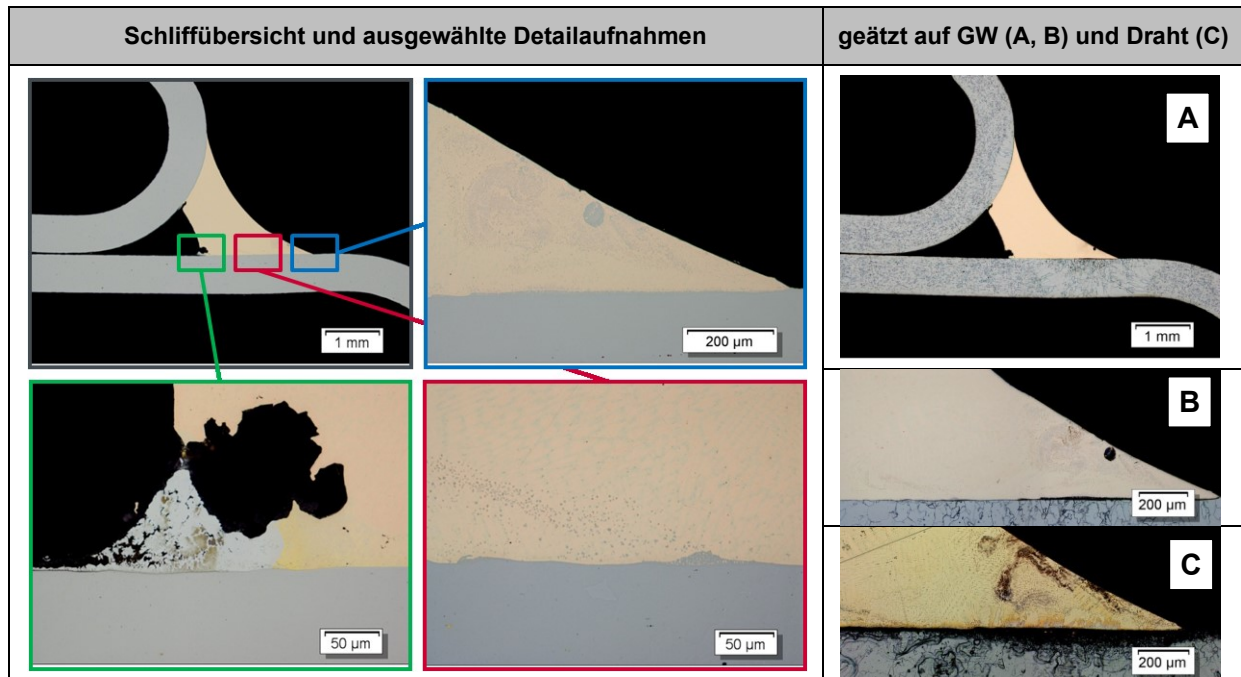
Anhand der Tabelle 4.11 lässt sich erkennen, dass sich bei dem gewählten Referenzparameter (Kaltdrahtvariante) eine sehr feine Eisen-Silizium-Schicht (1-2 μm) im direkten Übergang zwischen Lot und Grundwerkstoff ausbildet. Zudem finden sich nahe dieses Phasensaums kugelförmige Eisen-Silizium-Verbindungen im erstarrten Lötgut sowie „netzförmige“ Siliziumstrukturen, welche die gesamte Lötnaht durchziehen. Eine spektrale Punktanalyse der einzelnen Bereiche bestätigte diese Elementzusammensetzungen.

Tabelle 4.11 REM-Aufnahmen der Diffusionszone der Referenzprobe ($P_L = 3,6 \text{ kW}$, $P_{Vor} = 0 \text{ W}$; $v_R = 3 \text{ m/min}$; $v_{Dr} = 3,2 \text{ m/min}$)



Bei den Analysen der Lötproben mit höherem Energieeintrag zeigten sich hingegen stärkere Veränderungen hinsichtlich der Nahtqualität an der Oberfläche und im Querschliff. So traten ab einer Laserleistung von 3,8 kW erste Anschmelzungen des Grundwerkstoffbleches auf, welche sich ins Lötgut „einmischen“ (siehe Detailaufnahmen in Tabelle 4.12). Zudem „rutscht“ das Lötgut im Gegensatz zur Referenznaht weiter in die Tiefe der Fuge des Bördelstoßes und dies, ohne komplett im Wurzelbereich anzubinden. Es entstehen weiterhin Zinkschmelztropfen an der Lötnahtwurzel im Übergang zwischen Lot und Grundwerkstoff.

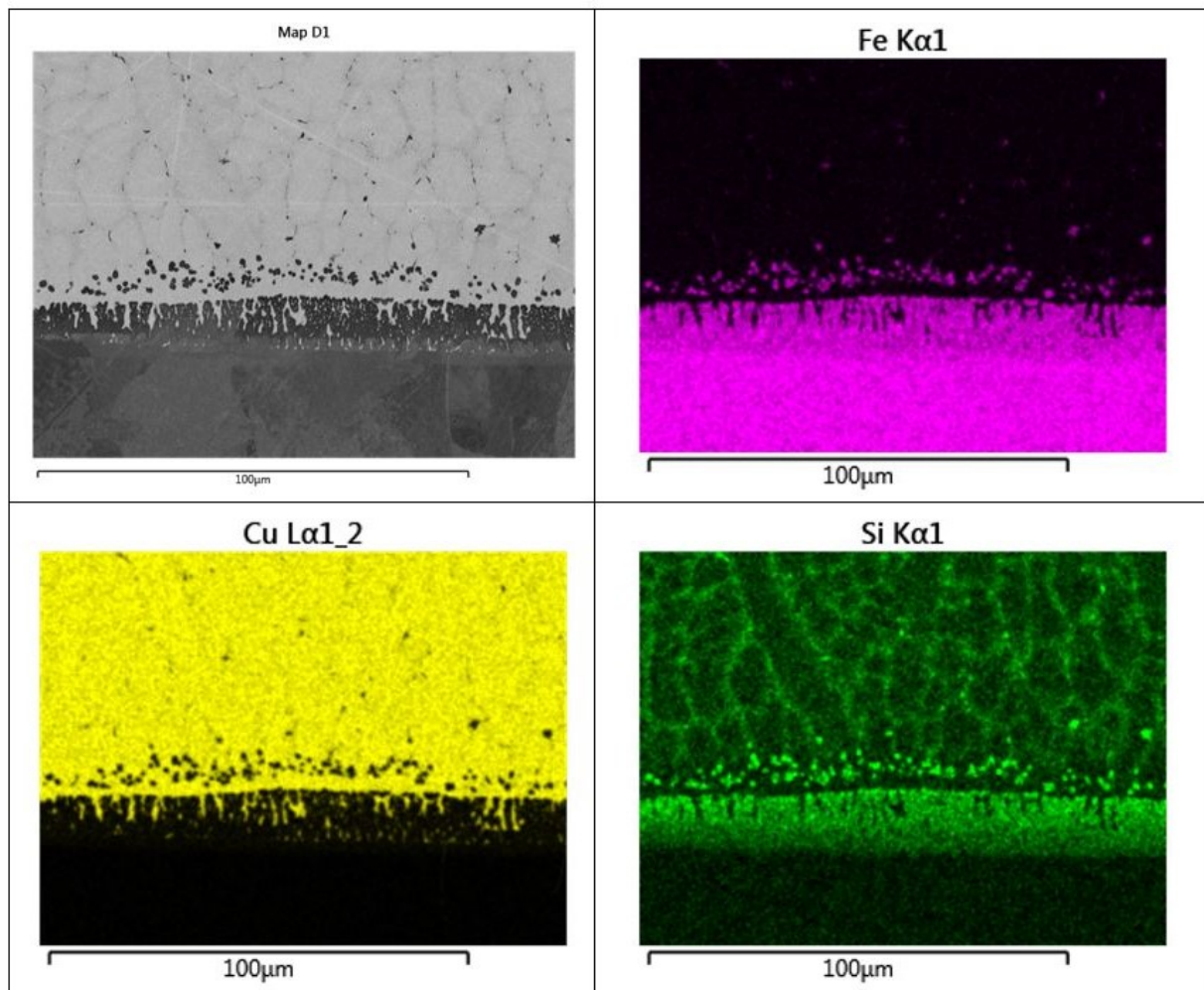
Tabelle 4.12 Metallografische Analyse der Laserlötnaht mit erhöhter Laserleistung ($P_L = 3,8 \text{ kW}$, $P_{Vor} = 0 \text{ W}$; $v_R = 3 \text{ m/min}$; $v_{Dr} = 3,2 \text{ m/min}$)



Die Anschmelzungen des Grundwerkstoffes reichen bis in den mittleren Benetzungsbereich am Seitenwandrahmen hinein (rote Detailaufnahme). Die Analyse der Diffusionszone mittels REM bestätigt dies (siehe Tabelle 4.13). Zum einen entsteht aufgrund des höheren Energieeintrages ein größerer Eisen-Silizium-Phasensaum. Zum anderen ist die ursprüngliche Phasengrenze sehr gut erkennbar, d.h. die Eisenelemente des Stahls „wachsen“ in die Kupferschmelze hinein.

Der erhöhte Energieeintrag fördert durch Einmischung der Elemente des Grundwerkstoffes im Lot nicht nur die Korrosionsanfälligkeit der Verbindung an der Oberfläche, sondern begünstigt zudem die Rissbildung bedingt durch die Temperaturerhöhung und den damit verbundenen größeren Diffusionsgeschwindigkeiten. Weiterhin erfolgt eine stärkere Zinkeinmischung und Zinkverdampfung im Nahtwurzelbereich, wodurch die Porenbildung steigt.

Tabelle 4.13 REM-Aufnahmen der Diffusionszone der Laserlötnaht mit erhöhter Laserleistung ($P_L = 3,8 \text{ kW}$, $P_{Vor} = 0 \text{ W}$; $v_R = 3 \text{ m/min}$; $v_{Dr} = 3,2 \text{ m/min}$)



Zusammenfassend lässt sich an dieser Stelle festhalten, dass ab einer bestimmten Gesamtenergie, welche der Prozesszone durch Laser- und Vorwärmleistung zugeführt wird, keine Verbesserung der Nahteigenschaften erzielt werden kann. Im Gegenteil meist verschlechtert sich die Nahtqualität deutlich. Dies gilt besonders hinsichtlich A-Maß bzw. Verbindungsbreite, Rishäufigkeit und Porenanzahl.

4.3.2 Winkelstellungen

4.3.2.1 Variation Lateralwinkel

Aufgrund von verschiedenen Spannsituationen, Roboterungenauigkeiten und Bauteilveränderungen kann es zu Winkelabweichungen zwischen Bearbeitungsoptik und Lage des Bördelstoßes kommen. Vor allem der seitliche Winkel zur Vorschubrichtung, der sogenannte Lateralwinkel (siehe Abbildung 4.32) muss dahingehend für jede Applikation und ihre spezifische Geometrie genauer untersucht werden.

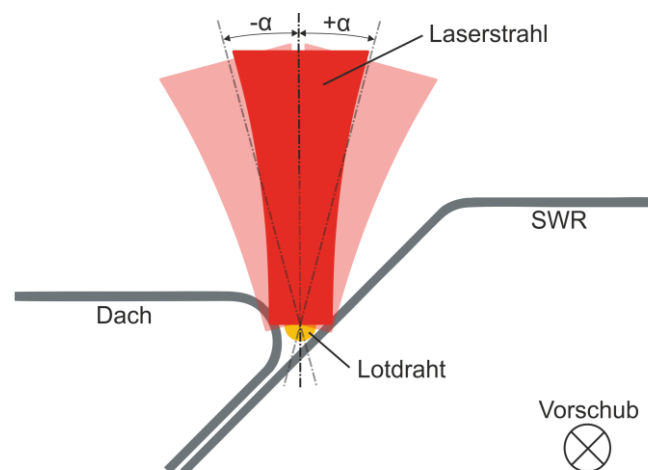

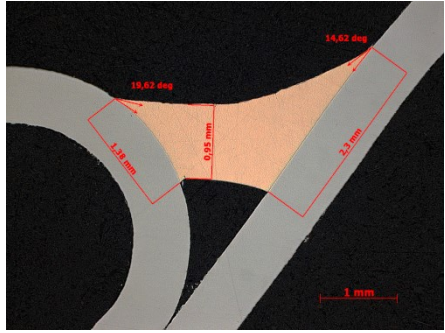

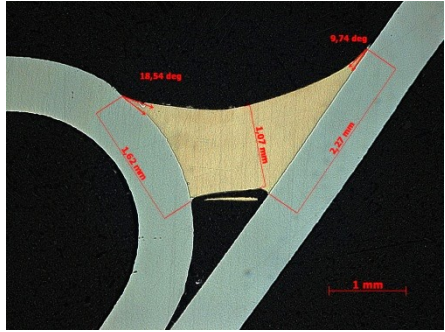

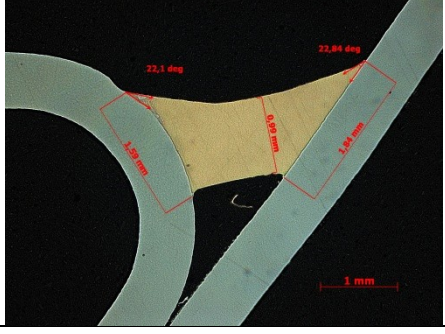


Abbildung 4.32 Definition der Vorzeichen bei Variation des Lateralwinkels

Bei Kaltdraht ist eine Beeinflussung durch den Lateralwinkel festzustellen (Tabelle 4.14). Die Oberfläche zeigt bei negativen Winkeln (Bearbeitungsoptik zum Dach geneigt) Oxidfärbungen durch das Anschmelzen des Grundwerkstoffes. Der Hauptteil der flüssigen Schmelze bewegt sich zur Dachseite hin (siehe Schliffbilder). Gleiches gilt für die Seitenwandrahmenseite bei größer werdenden positiven Lateralwinkeln ab $+7^\circ$. In beiden Fällen entstehen eher keilförmige Nähte. Zudem führt der übermäßige Energieeintrag aufgrund der Winkelstellung auf der jeweiligen Seite zu unruhigen Benetzungslinien sowie Randkerbigkeit.

Tabelle 4.14 Einfluss des Lateralwinkels auf die Nahtausbildung bei Kaltdraht am schrägen Bördelstoß ($P_L = 3,6 \text{ kW}$, $P_{Vor} = 0 \text{ W}$; $v_R = 3 \text{ m/min}$; $v_{Dr} = 3,2 \text{ m/min}$)

Parameter	Oberfläche	Querschliff
$\alpha = +5^\circ$		
$\alpha = 0^\circ$		
$\alpha = -5^\circ$		

Die besten Ergebnisse wurden mit Winkellagen von 0 bis $+5^\circ$ erzielt. Bei negativen Winkeln kommt es zwar zu einer leichten Steigerung der Verbindungsbreite (siehe Abbildung 4.33), allerdings beginnt auch die verstärkte Anschmelzung des Grundwerkstoffes am Dachradius, welche wiederum aus Korrosionsschutzgründen nicht zulässig ist. Weiterhin ist ein negativer Winkel in der Serienfertigung aufgrund der Kollisionsgefahr der Bearbeitungsoptik mit der Spanntechnik (Dachglocke) ohnehin schwierig umzusetzen.

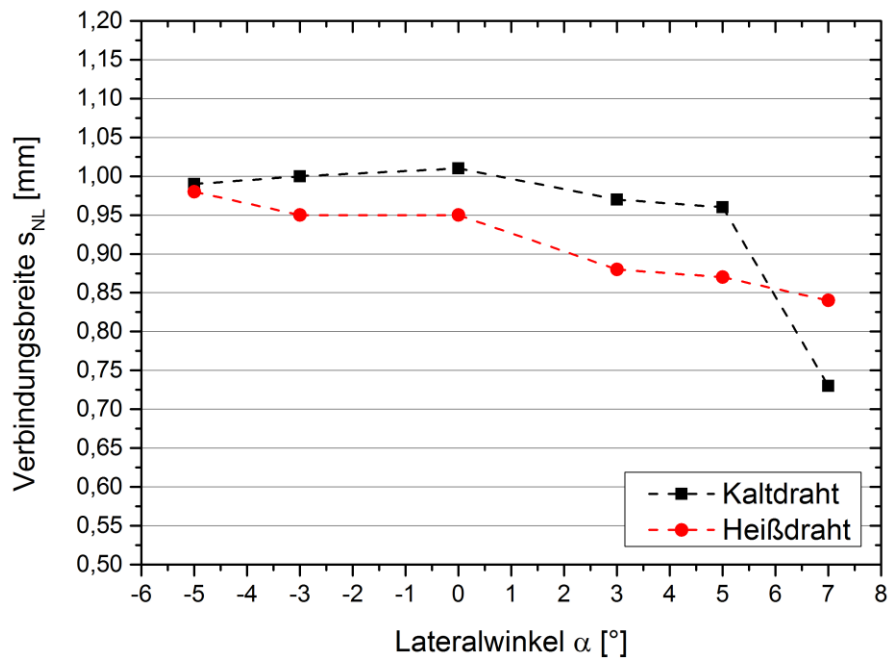


Abbildung 4.33 Minimale Verbindungsbreite in Abhängigkeit des Lateralwinkels $P_L = 3,6 \text{ kW}$, $P_{Vor} = 0 \text{ W}$; $v_R = 3 \text{ m/min}$; $v_{Dr} = 3,2 \text{ m/min}$)

Generell wird für beide Varianten der für die Lötnahtdicke geforderte Grenzwert von 0,8 mm überschritten. Die Verringerung der minimalen Verbindungsbreite bei $\alpha = +7^\circ$ basiert auf einer Fehlstelle. Bei $+7^\circ$ ist die Abschattung der Laserstrahlung durch den vorlaufenden Draht offenbar so groß, dass aufgrund mangelnder Vorwärmung keine Anbindung in die Tiefe erfolgen kann und damit der Grenzwert deutlich unterschritten wird (siehe Abbildung 4.34). Bei größeren Lateralwinkeln (bspw. $\alpha = +10^\circ$) verstärkt sich dieses Phänomen zunehmend.

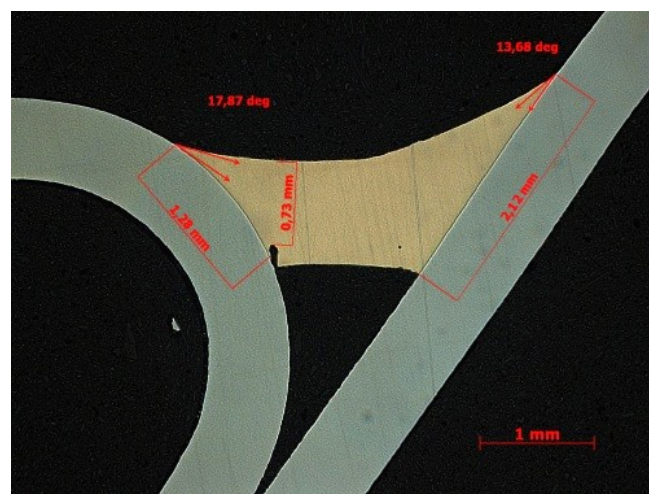


Abbildung 4.34 Ausgeprägte Fehlstelle mit Verringerung der Verbindungsbreite am Dachradius bei $\alpha = +7^\circ$ (Kaltdraht)

Im Vergleich dazu zeigen die Untersuchungen mit Heißdraht geringer ausgeprägte Abhängigkeiten vom Lateralwinkel. Die Ergebnisse bezüglich der Oberflächenqualität und der Schliiffbilder für die Heißdrahtversuche sind ergänzend in Tabelle 4.15 dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass für die Heißdrahtvariante bei Lateralwinkeln kleiner 0° und größer $+5^\circ$ ebenfalls verstärkte Zinkabrände sowie Anschmelzungen des Grundwerkstoffes entstehen. Die minimale Verbindungsbreite schwankt jedoch geringer als bei den Kalt-drahtversuchen (Abbildung 4.33). Zudem bildet sich keine deutliche Keilform aus. Dies ist mit der tieferen Lage der Naht in der Fuge des Bördelstoßes zu begründen, welche durch die zusätzliche Energiezufuhr (Drahtvorwärmung) und der damit verbundenen niedrigeren Viskosität der Lotschmelze zustande kommt.

Tabelle 4.15 Einfluss des Lateralwinkels auf die Nahtausbildung bei Heißdraht am schrägen Bördelstoß ($P_L = 3,0 \text{ kW}$, $P_{Vor} = 165 \text{ W}$; $v_R = 3 \text{ m/min}$; $v_{Dr} = 3,2 \text{ m/min}$)

Parameter	Oberfläche	Querschliff
$\alpha = +5^\circ$		
$\alpha = 0^\circ$		
$\alpha = -5^\circ$		

Abschließend sollen Porenanalysen mittels CT-Aufnahmen Aufschluss über innenliegende Fehlstellen im Nahtvolumen geben. Da bei Heißdraht im Vergleich zu den Referenznähten keine deutlichen Einflüsse festgestellt werden konnten, sind nachfolgend nur die Ergebnisse

für Kaltdraht diskutiert (Abbildung 4.35). Dabei sind am Seitenwandrahmen in allen Bereichen (1 bis 4) über sämtliche Lateralwinkel nur wenige Poren aufgetreten. Dagegen kommt es dachseitig zur vermehrten Porenentstehung mit abnehmenden Lateralwinkel. Vor allem in den unkritischen unteren Bereichen (1 und 2) der Naht treten kleine Poren (bis 0,2 mm) auf, während in den kritischen oberen Bereichen (3 und 4) die Poren bis zu 0,5 mm und größer sind. Eine dieser Poren zeigt beispielhaft Abbildung 4.36, extrahiert aus den CT-Aufnahmen. Zusätzlich konnten aufgrund der CT-Analysen die bereits erwähnten Fehlstellen in der Nahtwurzel für steigende Winkel ab 7° häufiger beobachtet und damit bestätigt werden.

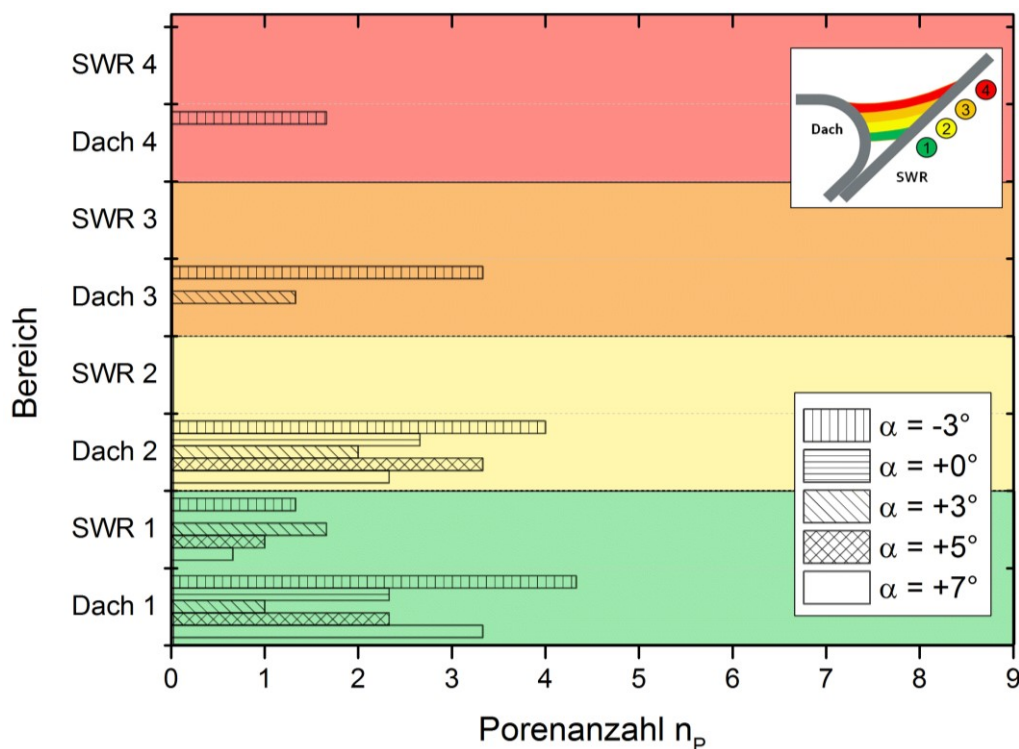


Abbildung 4.35 CT-Analyse der Porenanzahl bei verändertem Lateralwinkel (Kaltdraht: $P_L = 3,6 \text{ kW}$, $P_{Vor} = 0 \text{ W}$; $v_R = 3 \text{ m/min}$; $v_{Dr} = 3,2 \text{ m/min}$)

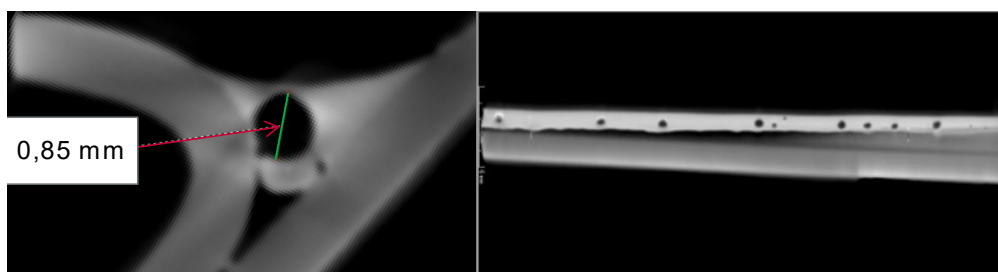


Abbildung 4.36 CT-Aufnahme einer Pore im obersten Bereich bei $\alpha = -3^\circ$ (Kaltdraht) und Porenzeile als Beleg für die Volumenaussage durch CT-Aufnahmen

Der Arbeitsbereich für den Lateralwinkel liegt somit bei dieser Geometrieconfiguration für beide Varianten (Heiß- und Kaltdraht) zwischen 0 und +5 Grad, d.h. die Bearbeitungsoptik

sollte für gute Nahtqualitäten (bezüglich Oberfläche, minimale Verbindungsbreite, Poren) leicht in Richtung Seitenwandrahmen geneigt werden.

4.3.2.2 Variation Schleppwinkel und Verdrehwinkel

Weitere Winkel zur Variation sind der Schleppwinkel und der Verdrehwinkel. Bei der Variation des Verdrehwinkels wurden allerdings in mehreren Voruntersuchungen in einem Bereich von $\gamma = \pm 5^\circ$ keine deutlichen Veränderungen festgestellt. Da am Bauteil zur Vereinfachung der Programmierung die Optik fluchtend zur Fuge eingestellt wird, kann dieser Winkel somit bei allen weiteren Untersuchungen in dieser Arbeit bei 0° gehalten werden. Da der Schleppwinkel je nach 3D-Bauteilen in Abhängigkeit der Geometrie und somit der Energieeintrag leicht variieren kann, sollte dieser ebenfalls im Bereich $\beta = \pm 5^\circ$ untersucht werden. Die Vorzeichen für die Untersuchungen des Schleppwinkels sind in Abbildung 4.37 dargestellt.

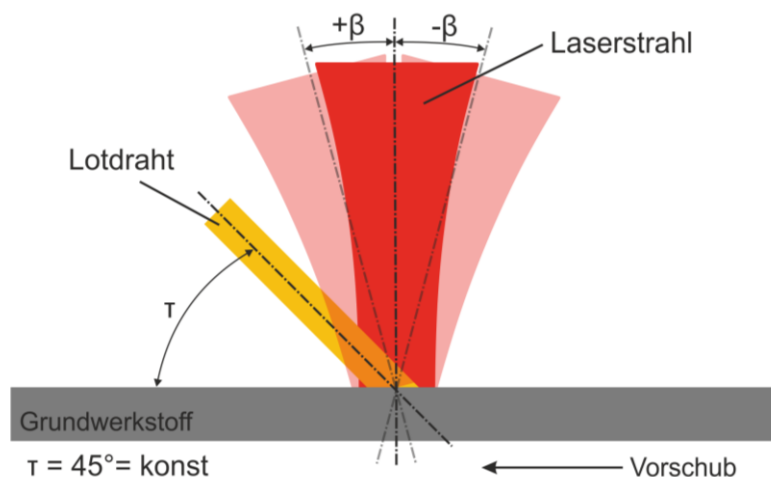


Abbildung 4.37 Definition der Vorzeichen bei Variation des Schleppwinkels

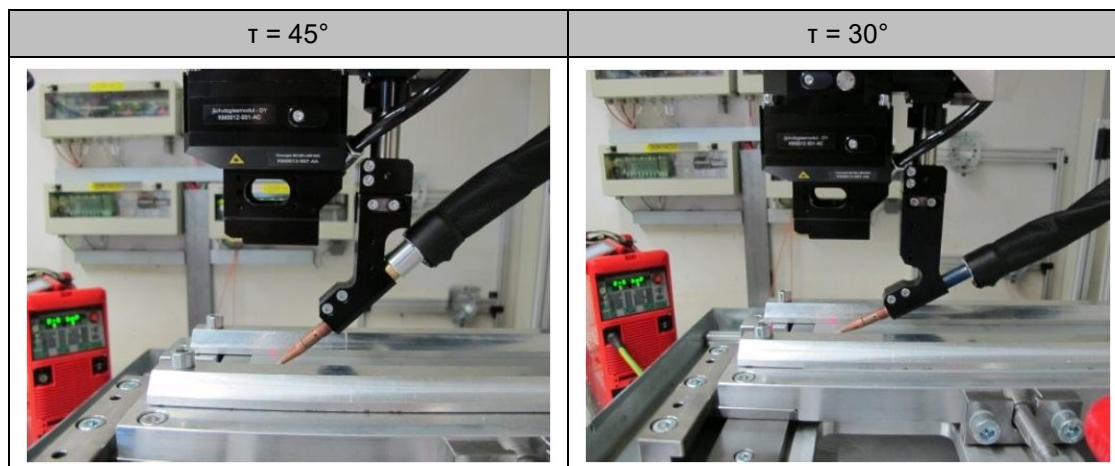
Bei positiven Schleppwinkeln ließ sich lediglich bei Heißdraht eine leichte Veränderung der Nahtoberfläche feststellen. Tendenziell wurde diese grobschuppiger gegenüber der Referenznaht. Bei negativen Schleppwinkeln dagegen wurde die Naht deutlich randkerbiger im Vergleich zu 0° . Bei Kaltdraht waren diese Veränderungen nicht detektierbar. Bei dieser Verfahrensvariante traten demnach keine ausgeprägten Schuppigkeitsveränderungen im gesamten Winkelbereich auf. In Bezug auf die Verbindungsbreite konnte eine leichte Steigerung beim Kaltdrahtverfahren festgestellt werden, wohingegen dies bei Heißdraht nicht detektiert werden konnte. Offenbar kann durch die höhere Lage der Naht im Bördelstoß bei Kaltdraht durch die Änderung des Schleppwinkels der vor- und nachlaufende Energieeintrag und damit die Benetzungsbedingungen beeinflusst werden. Dieser Umstand soll in Kapitel 5 durch das Verfahren „Laserstrahlschmelzlöten“ und den damit veränderlichen Energieeintrag gezielt ausgenutzt werden.

Abschließend lässt sich festhalten, dass von allen Winkelabweichungen der Optik in Bezug auf den Bördelstoß der Lateralwinkel den stärksten Einfluss auf die inneren und äußeren Merkmale der Laserlötnaht für die geometrische Konfiguration der schrägen Dachnulfuge besitzt.

4.3.2.3 Variation Drahtzuführwinkel

Eine Variation des Drahtzuführwinkels in Bezug auf die Bördelnaht bei senkrecht einstrahlendem Laserstrahl ist durch die festverbaute Anordnung des Drahtzuführmodules im Serienbetrieb nicht möglich. Da aber die Lateral- sowie Schleppwinkelversuche gezeigt haben, dass durch Variation der Winkelstellungen und den damit veränderten Absorptionsbedingungen und Energieeinträgen die Nahtqualität hinsichtlich minimaler Verbindungsbreite gesteigert werden kann, wurden zusätzlich Untersuchungen mit einem festen Drahtzuführwinkel von 30° durchgeführt. Diesen Versuchsaufbau veranschaulicht Tabelle 4.16.

Tabelle 4.16 Systemtechnischer Aufbau mit verschiedenen Drahtzuführwinkeln



Bei der Oberflächenauswertung der Heißdrahtversuche traten lediglich leichte Unterschiede bezüglich der Referenznaht auf. Bei den Kaltdrahtversuchen hingegen konnten markantere Abweichungen festgestellt werden. So bildete sich eine starke Nahtunterwölbung mit einer glatten Nahtoberfläche aus. Zudem lag die resultierende Lötnaht deutlich tiefer. Dies spiegelt sich auch in den Schliffbildern bei einem gleichzeitig verwendeten Lateralwinkel von 5° wieder (Tabelle 4.17).

Tabelle 4.17 Einfluss des Drahtzuführwinkels auf die Nahtausbildung für Heiß- und Kaltdraht am schrägen Bördelstoß ($v_R = 3 \text{ m/min}$; $v_{Dr} = 3,2 \text{ m/min}$; $\alpha = +5^\circ$)

Parameter	$\tau = 45^\circ$	$\tau = 30^\circ$
Kaltdraht: $P_L = 3,6 \text{ kW}$ $P_{Vor} = 0 \text{ W}$		
Heißdraht: $P_L = 3,0 \text{ kW}$ $P_{Vor} = 165 \text{ W}$		

So kommt es bei den Kaltdrahtproben zu einer Ausbildung der unruhigen und nicht benetzenden Löt-nahtwurzel, welche in den bisherigen Untersuchungen nur bei Heißdrahtversuchen festgestellt werden konnte. Offenbar sind durch die Winkelvariationen die Energieeinkopplungsbedingungen nicht nur für den Grundwerkstoff, sondern auch für den Zusatzwerkstoff verändert worden. Trotz der heißeren Schmelze kommt es nicht zu einer Anbindung zwischen Lot und Grundwerkstoff im tieferen Bereich der Fuge. Zusätzlich erfolgt eine massive Anschmelzung des dachseitigen Bleches. Die entstehende Nahtgeometrie unterliegt ähnlich der Heißdrahtvariante den Schwankungen bei der minimalen Verbindungsbreite. Die Mittelwerte liegen im Bereich der Referenznähte (Tabelle 4.18) und erfüllen die Grenzwertforderung von 0,8 mm.

Tabelle 4.18 Mittelwerte für die wichtigsten Kenngrößen bei Variation Drahtzuführwinkel und $\alpha = +5^\circ$

Bezeichnung	Kaltdraht		Heißdraht	
	$\tau = 45^\circ$	$\tau = 30^\circ$	$\tau = 45^\circ$	$\tau = 30^\circ$
Minimale Verbindungsbreite	0,94 mm	0,91 mm	0,87 mm	0,86 mm
Anbindungs-länge Dach	1,43 mm	1,31 mm	1,20 mm	1,17 mm
Anbindungs-länge Seitenwandrahmen	2,25 mm	2,03 mm	1,83 mm	1,84 mm
Benetzungswinkel Dach	19,45°	18,61°	23,87°	26,13°
Benetzungswinkel Seitenwandrahmen	14,89°	13,47°	20,46°	16,45°

Ähnliche Abhängigkeiten zeigen die Winkelvariation des Drahtzuführwinkels bei zusätzlich verändertem Lateralwinkel. So entstehen wiederum bei Kaltdraht, die eigentlich für Heißdraht typischen unruhigen Nahtwurzeln ohne Anbindung. Für Volumenuntersuchungen wurden CT-Aufnahmen angefertigt, welche für Heißdraht bei beiden Lateralwinkeln (0° und $+5^\circ$) keine Aussagen hinsichtlich einer signifikanten Erhöhung der Porenanzahl gegenüber den Referenzproben liefern.

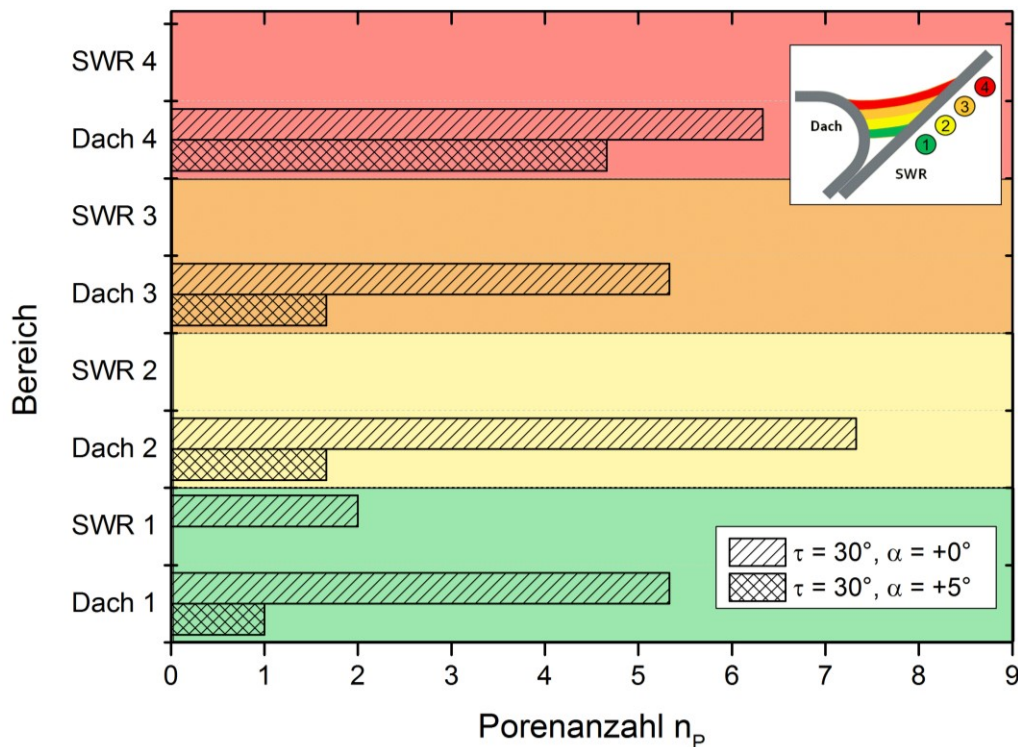


Abbildung 4.38 CT-Analyse der Porenanzahl bei verändertem Drahtzuführwinkel (Kaltdraht: $P_L = 3,6 \text{ kW}$, $P_{Vor} = 0 \text{ W}$; $v_R = 3 \text{ m/min}$; $v_{Dr} = 3,2 \text{ m/min}$)

Die CT-Aufnahmen für den Drahtzuführwinkel von 30° bei den Arbeitsbereich begrenzenden Lateralwinkeln von 0 und $+5^\circ$ zeigen allerdings für Kaltdraht einen deutlichen Porenanstieg in den kritischen Bereichen gegenüber den Referenznähten (Abbildung 4.38). Zusätzlich wurde festgestellt, dass sich der „Lötsack“ nicht über die gesamte Naht ausbildet, was wiederum zu komplett unterschiedlichen Lötnahtdicken führt. So konnten gegenüber der Schliffprobe erheblich geringere minimale Verbindungsbreiten (bspw. $s_{NL} = 0,4 \text{ mm}$ bei $\alpha = +5^\circ$) detektiert werden. Diese unterschreiten den geforderten Grenzwert signifikant. Zudem bleibt an dieser Stelle festzuhalten, dass es bei einem Drahtzuführwinkel von 30° bei allen Versuchen zu einer Anschmelzung des dachseitigen Grundwerkstoffes kam. Da eine weitere Laserleistungsverminderung zu noch geringeren Lötnahtdicken führte und die geschilderte erhöhte Porenzahl nicht gewünscht wird, ist die Verwendung des Drahtzuführwinkels von 30° abzulehnen. Für die weiteren Untersuchungen ist daher immer ein Drahtzuführwinkel von $40^\circ - 45^\circ$ zum Einsatz gekommen und auch zukünftig zu empfehlen.

4.4 Analyse Bauteil-/Spanntechnikinflüsse

4.4.1 Variation Lateralversatz

Der Lateralversatz beschreibt den Versatz des Laserstrahls zum Bauteil, wobei durch die taktile Nahtführung der Draht weiterhin mittig in der Fuge läuft. Das Verschieben des Laserstrahls wird durch ein Stellrad an der Bearbeitungsoptik ermöglicht. Innerhalb dieser Untersuchungen wurde für einen positiven Lateralversatz die Richtung hin zum Seitenwandrahmen gewählt, die negative Richtung entsprechend zum Dachblech hin. Die Abbildung 4.39 zeigt skizzenhaft den Lateralversatz mit entsprechenden Vorzeichen.

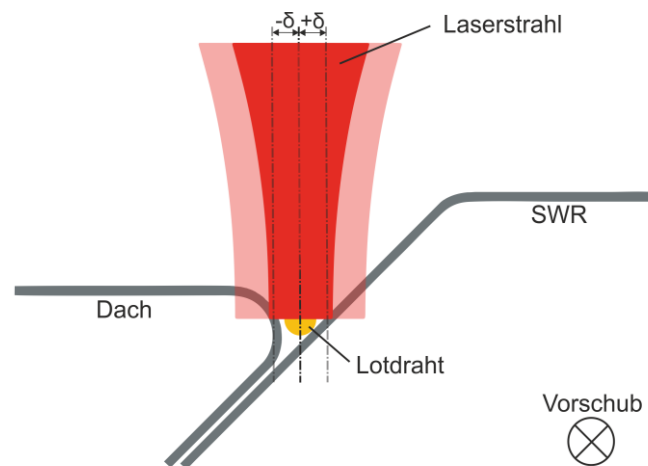
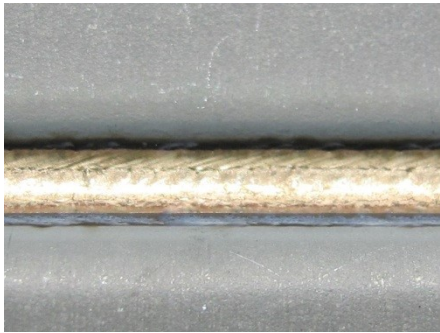
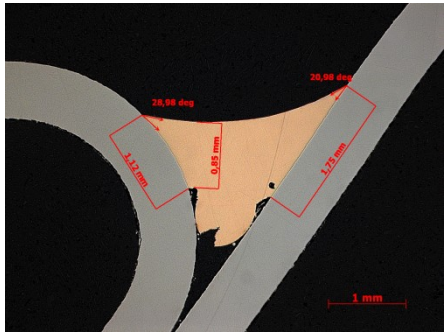

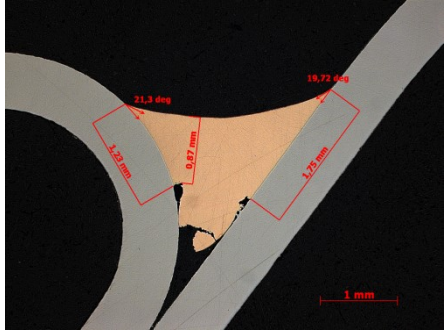
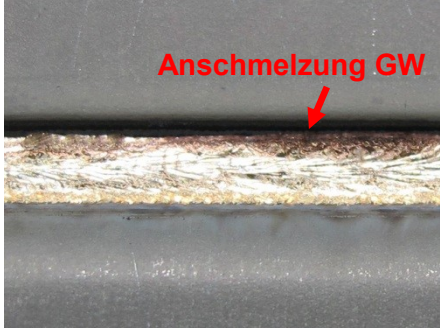
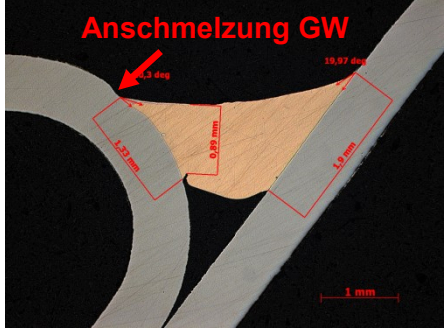


Abbildung 4.39 Definition der Vorzeichen bei Variation des Lateralversatzes


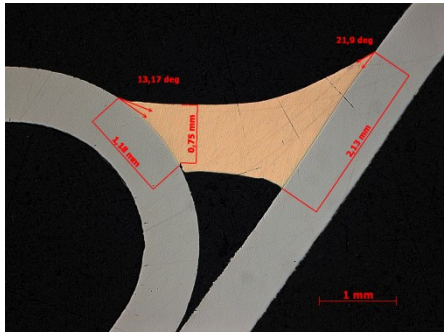
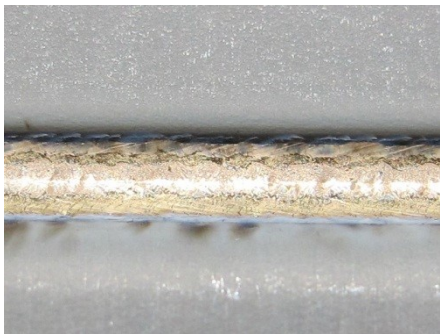
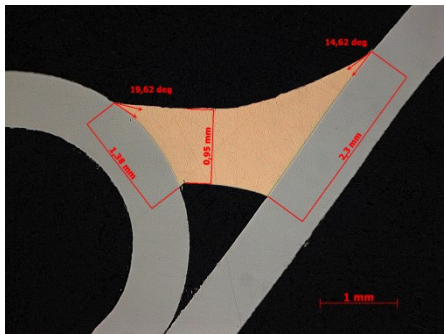
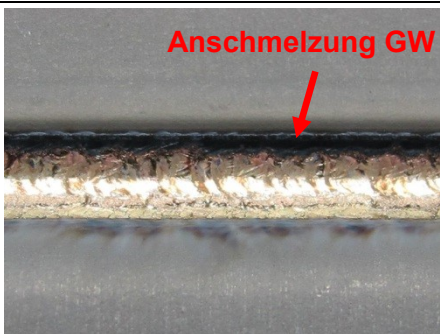
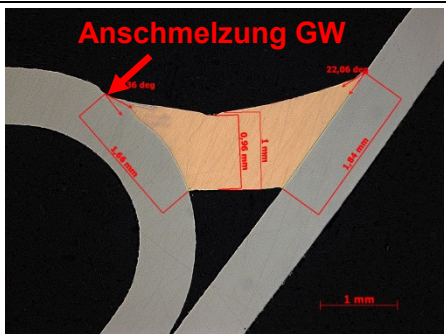
Erwartungsgemäß verstärkt der Lateralversatz den Zinkabbrand auf dem Bauteil, in dessen Richtung die Auslenkung stattgefunden hat. So führt der verstärkte Zinkabbrand bei Heißdraht bereits ab einer Verschiebung des Laserstrahls von 0,2 mm zur Beeinflussung der Benetzungslinie und leichter Randkerbigkeit. Vor allem in negativer Richtung (zur Dachseite) sind die Einflüsse ausgeprägt. Ab - 0,4 mm verändert sich die Oberflächenqualität signifikant, d.h. die Naht liegt deutlich höher in der Fuge und bildet eine raue Oberfläche mit erhöhter Randkerbigkeit besonders dachseitig aus (Tabelle 4.19). Die unruhige Löt-nahtwurzel wird nicht ausgebildet und damit verhält sich die Probe ähnlich der Referenzproben "Kalt-draht". Allerdings kommt es zu einer Anschmelzung des Grundwerkstoffes am Dachblech. Für einen positiven Lateralversatz können gegenüber der Referenznaht bis auf eine sehr leichte Schuppigkeit und den verstärkten Zinkabbrand keine signifikanten Veränderungen der Löt-nahtqualität festgestellt werden.

Tabelle 4.19 Einfluss des Lateralversatzes auf die Nahtausbildung bei Heißdraht am schrägen Bördelstoß ($P_L = 3,0 \text{ kW}$, $P_{Vor} = 165 \text{ W}$; $v_R = 3 \text{ m/min}$; $v_{Dr} = 3,2 \text{ m/min}$)

Parameter	Oberfläche	Querschliff
$\delta = 0,4 \text{ mm}$		
$\delta = 0 \text{ mm}$		
$\delta = -0,4 \text{ mm}$		

Bei den Kaltdrahtversuchen können bei einer Verschiebung des Laserstrahls in Richtung Seitenwandrahmen ebenfalls nur geringe Unterschiede an der Oberfläche beobachtet werden. Die Schmelze folgt allerdings dem Hauptenergieeintrag und benetzt besser auf dem Seitenwandrahmenblech. Dadurch entsteht zum einen eine leichte Keilform, zum anderen wird mit zunehmenden Versatz die Ausbildung einer Fehlstelle (unvollständige Benetzung) im dachseitigen Nahtwurzelbereich forciert (siehe Tabelle 4.20). Verschiebt sich der Laserstrahl Richtung Dach, kommt es zu einem Anschmelzen des Grundwerkstoffes, was in einer schlechteren Oberflächenqualität resultiert. Bedingt durch den in das Schmelzbad fließenden Grundwerkstoff, bildet sich eine raue Oberfläche mit einer verstärkten rötlichen Verfärbung (Oxidbildung). Das Schmelzvolumen und damit die Naht verschiebt sich weiter in Richtung Dachbauteil.

Tabelle 4.20 Einfluss des Lateralversatzes auf die Nahtausbildung bei Kaltdraht am schrägen Bördelstoß ($P_L = 3,6 \text{ kW}$, $P_{Vor} = 0 \text{ W}$; $v_R = 3 \text{ m/min}$; $v_{Dr} = 3,2 \text{ m/min}$)

Parameter	Oberfläche	Querschliff
$\delta = 0,4 \text{ mm}$		
$\delta = 0 \text{ mm}$		
$\delta = -0,4 \text{ mm}$		

Die Orientierung zum stärker erwärmten Bauteil ist ähnlich der Winkelversuche generell deutlicher bei Kaltdraht als bei Heißdraht ausgeprägt. Damit kommt es auch zu einer großen Abhängigkeit der minimalen Verbindungsbreite. Dies zeigt Abbildung 4.40.

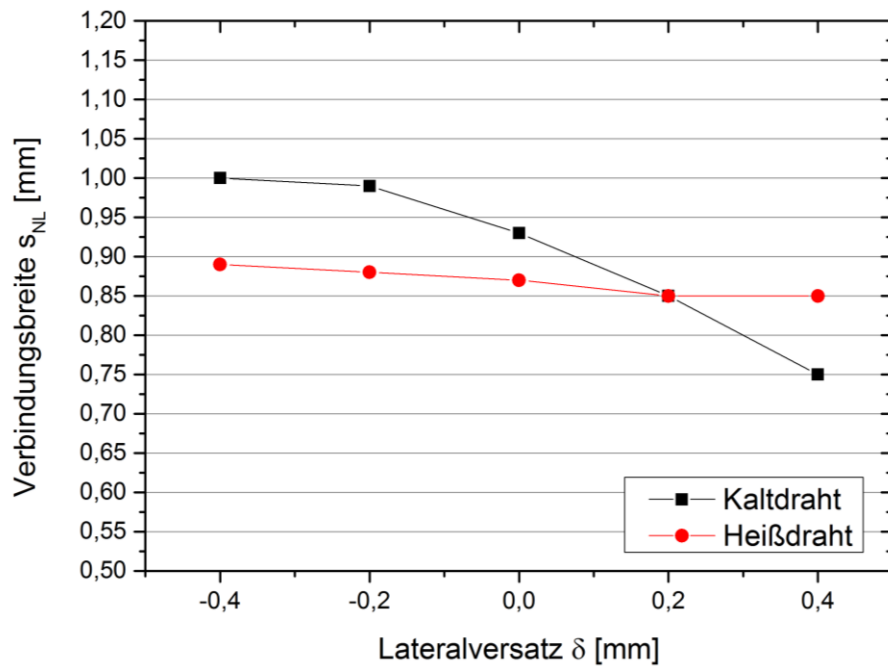


Abbildung 4.40 Minimale Verbindungsbreite in Abhängigkeit des Lateralversatzes

Aus den Mittelwerten der Schliiffproben ist ersichtlich, dass es ausgehend von der Nulllage mit größer werdendem Versatz in positiver Richtung bei den Kalt drahtproben zu einem starken Abfall der minimalen Verbindungsbreite kommt. Dabei führt das verschobene Intensitätsprofil in Richtung Seitenwandrahmen zu einem geringeren Strahlenanteil, welcher das Dachbauteil vorwärmen und die Zinkbeschichtung entfernen kann. Weiterhin wird die Vielfachreflexion zwischen Draht und Bauteil abgeschwächt. Durch diese Faktoren kann keine Benetzung bis in die tieferen Bereiche der Fuge erfolgen und es bilden sich die obengenannten Fehlstellen im dachseitigen Nahtwurzelbereich aus, welche wiederum die minimale Verbindungsbreite herabsetzen. Bei einer Verschiebung des Intensitätsprofils in die negative Richtung steigt die Löt nahtdicke bis auf einen Maximalwert von 1 mm an. Dies hängt mit dem größeren Energieanteil, welcher zur direkten Bauteilvorwärmung genutzt werden kann, und der verstärkten Mehrfachreflexion zwischen Draht und Bauteiloberfläche zusammen. Der Bereich wird durchgehend gut benetzt und bildet keine festigkeitsmindernden Fehlstellen aus. Bei den Heiß drahtversuchen ist ebenfalls ein tendenzieller Abfall der minimalen Verbindungsbreite mit zunehmendem Lateralversatz in positiver Richtung erkennbar, welcher allerdings geringer ausfällt. Da von vornherein keine vollständige Anbindung der gesamten Nahtwurzel erfolgt, lässt sich ein Ausbilden von Fehlstellen wie bei der Kalt drahtvariante nicht feststellen. Allerdings verschiebt sich der kritische Bereich der Nahtwurzel in höhere Bereiche, was zu der geringen Abnahme der Löt nahtdicke bei positivem Lateralversatz führt. Die maximal erreichbare Verbindungsbreite betrug bei Heiß draht 0,88 mm für einen negativen Lateralversatz. Bei den CT-Analysen der Proben mit Lateralversätzen von $\pm 0,4$ mm konnten keine signifikanten Unterschiede zu den Referenz-

nähten hinsichtlich der Porenanzahl festgestellt werden. Es treten lediglich kleinere Poren im Wurzelbereich (Bereich 1) auf, welche als unkritisch zu bewerten sind. Auf eine ausführliche Diskussion wird daher an dieser Stelle verzichtet. Aufgrund der besten Nahteigenschaften hinsichtlich Oberflächenqualität und Lötnahtdicke sowie Poren kann die Nulllage als geeignetste Laserspotposition empfohlen werden. Dennoch ist diese applikationsspezifisch zu überprüfen.

4.4.2 Variation Biegeradius

Bei den bisherigen Versuchen wurde der Radius des Dachbleches in Anlehnung an den Standardwert (Innenradius $r_i = 1,5 \text{ mm}$) konstant gehalten. Allerdings konnten im Großserienbetrieb Schwankungen des Radius aufgrund von produktionsbedingten Fertigungstoleranzen und damit verbunden Einflüsse auf die Ausbildung der Nahtqualität festgestellt werden. Daher wurde der Einfluss des Biegeradius am Dachblech in diesem Abschnitt systematisch untersucht. Für detaillierte Bewertungsmöglichkeiten sind (neben den in Kapitel 4.2.7 geschilderten) nachfolgend weitere Bemaßungen am Schliff als Hilfsgrößen definiert worden (siehe Abbildung 4.41).

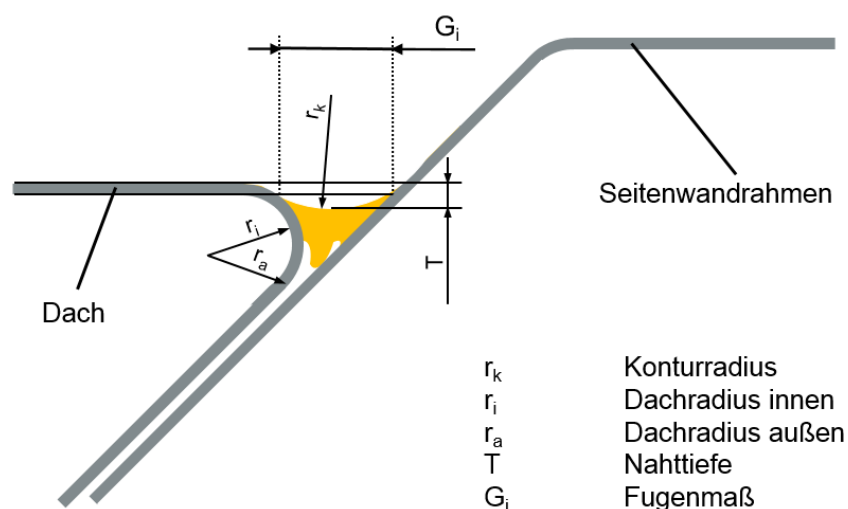


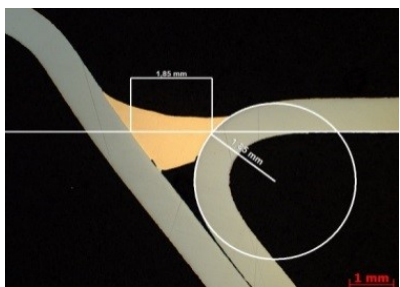
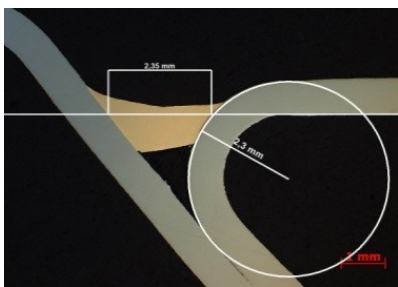
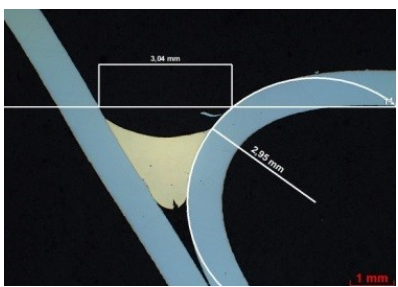
Abbildung 4.41 Definition Hilfsgrößen für detaillierte Bewertung der Nahtqualität am Schliff der Dachnullfuge

Danach entstehen aus den Innenradien (r_i) des Dachbleches, welche durch den Stempel der Biegemaschine vorgegeben werden, die für die Benetzungsbedingungen des Lotes entscheidenden Außenradien (r_a) im Arbeitsbereich. Zusätzlich wurde die Hilfsgröße G_i wie „GAP“ für die Definition des Fugenmaßes eingeführt. Dieses bestimmt den sich ergebenden Abstand aus zwei Schnittpunkten der horizontal verlängerten Unterkante des Dachbleches mit dem Außenradius und der gegenüberliegenden nahtzugewendeten Seite des Seitenwandrahmenbleches. Diese ist nicht zu verwechseln mit der Größe Spalt (b, siehe Kapitel

4.2.7), die zwischen den beiden zu fügenden Blechschenkeln im Grund des Bördelstoßes bestimmt wird. Weiterhin kann der Konturradius (r_k) ausgewertet werden, welcher sich aus der Unterwölbung der Lötnahtoberfläche ergibt und die geforderten tangentialen Übergänge zum Grundwerkstoff beschreibt. Abschließend wurde der Abstand zwischen verlängerter Außenkante des Dachbleches und dem tiefsten Punkt der Lötnahtoberfläche als Nahttiefe (T) definiert.

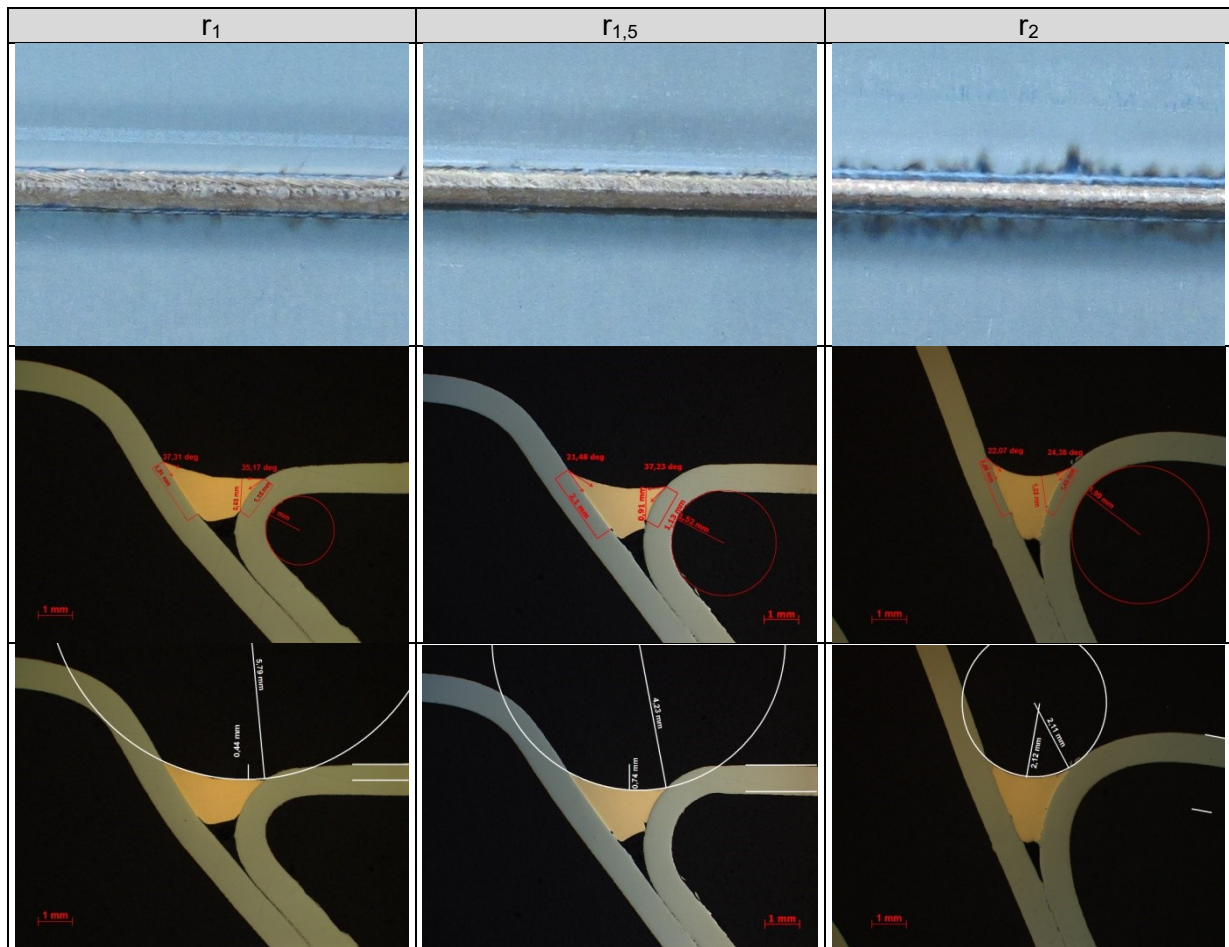
Für die Untersuchungen der Nahtausbildung in Abhängigkeit des Biegeradius am Dachblech wurden drei Radien festgelegt. Zum einen bisher verwendete seriennahe Standardwert ($r_i = 1,5 \text{ mm}$), sowie ein kleinerer ($r_i = 1,0 \text{ mm}$) und ein größerer Biegeradius ($r_i = 2,0 \text{ mm}$). Um die folgenden Auswertungen zu vereinfachen, werden die drei Dachbleche mit den jeweiligen Innenradien (r_1 ; $r_{1,5}$ und r_2) unterschieden (siehe Tabelle 4.21).

Tabelle 4.21 Übersicht für das sich einstellende Fugenmaß (G_i) bei verschiedenen Dachradien

kleiner Radius (r_1)	Referenzradius ($r_{1,5}$)	großer Radius (r_2)
		
Innenradius: $r_{i1} = 1,0 \text{ mm}$ Außenradius: $r_{a1} = 1,85 \text{ mm}$ Fugenmaß: $G_{i1} = 1,76 \text{ mm}$	Innenradius: $r_{i1,5} = 1,5 \text{ mm}$ Außenradius: $r_{a1,5} = 2,3 \text{ mm}$ Fugenmaß: $G_{i1,5} = 2,23 \text{ mm}$	Innenradius: $r_i = 2,0 \text{ mm}$ Außenradius: $r_a = 2,95 \text{ mm}$ Fugenmaß: $G_{i1} = 3,2 \text{ mm}$

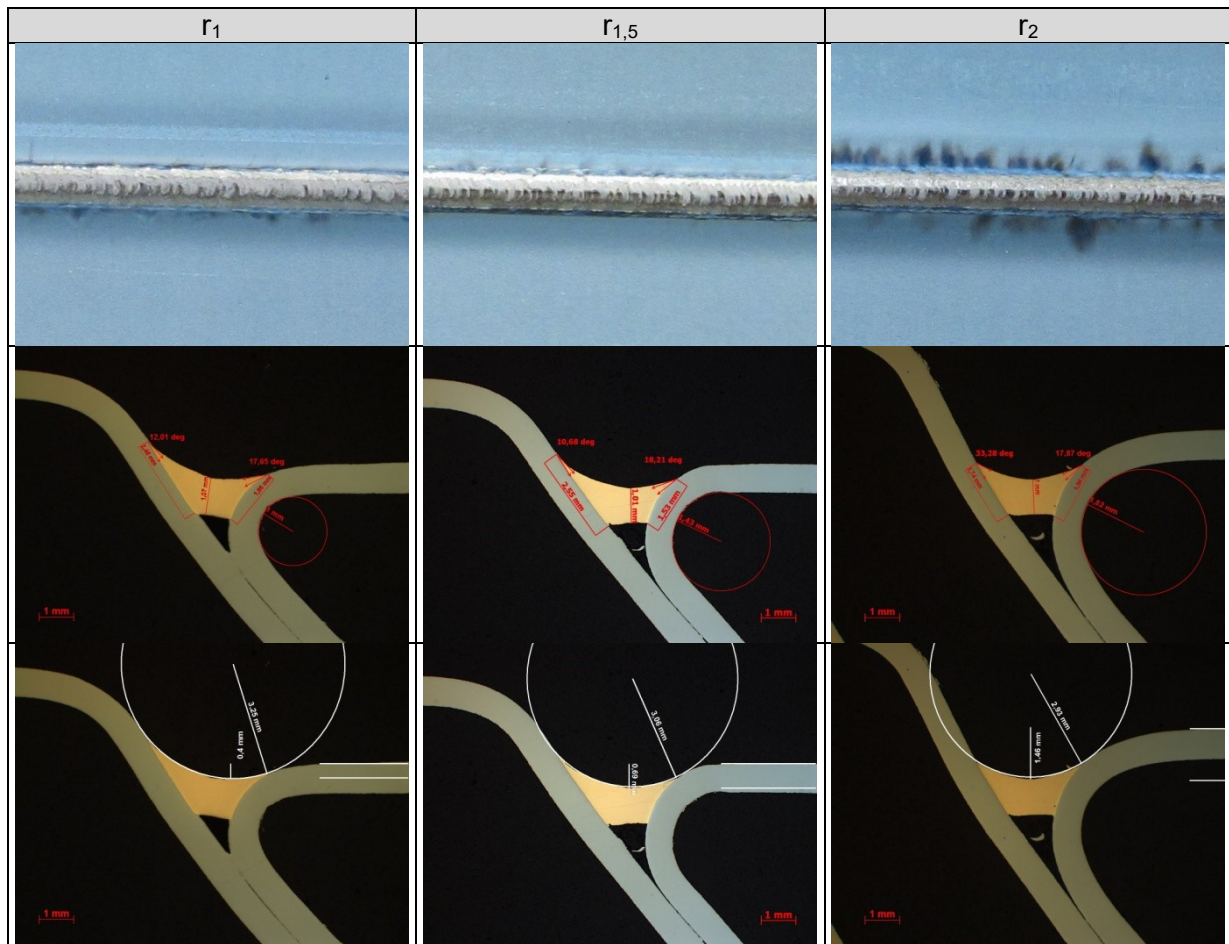
Daraus wird ersichtlich, dass sich in Abhängigkeit vom Biegeradius ein unterschiedliches Fugenmaß (G_i) einstellt. Je größer der Biegeradius, desto größer das Fugenmaß. Dies hat Einfluss auf die taktile Nahtführung über den fest vorgegebenen Drahtdurchmesser von 1,6 mm, welcher mit zunehmenden Radius (bei freibeweglichem Teleskoparm in z-Richtung) tiefer in der Fuge zur Anlage kommt. Des Weiteren werden die Benetzungsbedingungen durch die sich unterschiedlich ergebenden Einfallswinkel der Laserstrahlung am Dachblech bei einer festen Fokusgröße von 3,6 mm beeinträchtigt. Somit sind die Prozessbedingungen in der Wechselwirkungszone durch die geometrischen Einflüsse bei gleich eingestellten Verfahrensparametern unterschiedlich. Dies soll unter Verwendung der Referenzparameter für Heiß- und Kaltdraht nachgewiesen werden. Die Ergebnisse für Heißdraht sind für die verschiedenen Radien in Tabelle 4.22 dargestellt.

Tabelle 4.22 Einfluss des Dachradius auf die Nahtausbildung bei Heißdraht am schrägen Bördelstoß ($P_L = 3,0 \text{ kW}$, $P_{\text{Vor}} = 165 \text{ W}$; $v_R = 3 \text{ m/min}$; $v_{\text{Dr}} = 3,2 \text{ m/min}$)



Die Auswertungen zeigen, dass für die Radien r_1 (trotz leichter Randkerbigkeit) und $r_{1,5}$ gute Oberflächenqualitäten erzielt werden konnten. Beim großen Biegeradius r_2 entstehen hingegen starke Zinkabbrände und Schmauchspuren, welche für eine gute Lackhaftung wieder entfernt werden müssen. Die Nahtunterwölbung lässt sich anhand der Konturradien ermitteln. Je kleiner der Konturradius einer Nahtoberfläche ist, desto größer wird die Nahtunterwölbung und desto besser bilden sich die tangentialen Übergänge zum Grundwerkstoff mit kleinen Benetzungswinkeln aus. Dies wurde am besten für den Radius r_2 erreicht. Der Radius r_1 besitzt hingegen eine flache Nahtoberfläche (großer r_K) und relativ große Benetzungswinkel, welche zu der leichten Randkerbigkeit führen. Erwartungsgemäß verschiebt sich die Lage der Löt-naht mit größer werdendem Dachradius und damit steigendem Fugenmaß zu tieferen Positionen in der Fuge des Bördelstoßes (siehe T-Maß). Weiterhin entstehen bei der Verwendung von Heißdraht die charakteristischen nicht angebondenen Löt-nahtwurzeln bei allen verwendeten Geometrien und am stärksten ausgeprägt bei r_2 . Im Gegensatz dazu bilden sich bei Kaltdraht andere Nahtgeometrien aus (Tabelle 4.23).

Tabelle 4.23 Einfluss des Dachradius auf die Nahtausbildung bei Kaltdraht am schrägen Bördelstoß ($P_L = 3,6 \text{ kW}$, $P_{\text{Vor}} = 0 \text{ W}$; $v_R = 3 \text{ m/min}$; $v_{\text{Dr}} = 3,2 \text{ m/min}$)



Bei den Kaltdrahtversuchen entstehen ebenfalls die nach Sichtprüfung geeignetsten Oberflächen für den Standardradius $r_{1,5}$ und den kleineren r_1 . Bei dem Biegeradius r_2 bilden sich verstärkt Zinkabbrände und Schmauchspuren aus, welche als negativ zu bewerten sind. Zusätzlich lassen sich gegenüber Heißdraht wiederholt die in Kapitel 4.3.1 beschriebenen Unterschiede bezüglich der veränderten Nahtgeometrie im Schliff feststellen, da sich statt der nicht vollständig angebundenen Nahtwurzel eine Lotbrücke ausbildet. Dies führt zu etwas größeren Mittelwerten bei der minimalen Verbindungsbreite (siehe Tabelle 4.24).

Tabelle 4.24 Mittelwerte für die wichtigsten Kenngrößen bei Variation des Biegeradius am Dachblech

Bezeichnung	Kaltdraht			Heißdraht		
	r_1	$r_{1,5}$	r_2	r_1	$r_{1,5}$	r_2
Minimale Verbindungsbreite	0,98 mm	0,99 mm	1,03 mm	0,91 mm	0,94 mm	1,04 mm
Anbindungslänge Dach	1,58 mm	1,54 mm	1,63 mm	1,13 mm	1,21 mm	1,46 mm
Anbindungslänge SWR	2,41 mm	2,33 mm	2,09 mm	2,05 mm	2,16 mm	1,73 mm
Benetzungswinkel Dach	17,46°	18,26°	15,33°	34,29°	21,64°	25,27°
Benetzungswinkel SWR	14,23°	17,36°	24,12°	35,21°	23,22°	21,39°
Konturradius	3,23 mm	3,16 mm	2,91 mm	5,89 mm	4,62 mm	2,23 mm
Lötnahttiefe	0,41 mm	0,69 mm	1,42 mm	0,42 mm	0,73 mm	2,45 mm

Normalerweise würde bei konstantem Drahtvolumen und einer tieferen Nahtlage bei Heißdraht eine Vergrößerung der Lötnahtdicke erfolgen. Durch die nicht vollständig angebotenen Nahtwurzel, verringert sich dieses Maß wieder, sodass die Kaltdrahtvariante besonders bei kleineren Radien etwas größere Verbindungsbreiten liefert. Die Ergebnisse stimmen mit den in Abschnitt 4.3.1 ermittelten tendenziell überein. Die Benetzungswinkel schwanken stark, je nach Schnittebene des metallografischen Schliffes, und geben daher keine Auskunft über Abhängigkeiten vom Biegeradius. Gleiches gilt für die Anbindungslängen. Dagegen lassen sich mittels der neu eingeführten Hilfsgrößen (Konturradius und Lötnahttiefe) eindeutige Abhängigkeiten erkennen. So verringert sich der Konturradius für beide Varianten (Heiß- und Kaltdraht) mit zunehmendem Radius des Dachbleches. Dies geht einher mit einer größer werdenden Nahtunterwölbung sowie gewünschten tangentialen Übergängen zum Grundwerkstoff. Die Lötnahttiefe steigt mit größer werdendem Biegeradius, d.h. die Naht verlagert sich in tiefere Bereiche des Bördelstoßes. Dieser Vorgang ist beim Heißdrahtverfahren stärker ausgeprägt.

Weitere Untersuchungen zeigten, dass für jeden Radius separat die Spotgeometrie und die weiteren Prozessparameter (Laserleistung, Vorschubgeschwindigkeiten, usw.) für eine gute Nahtqualität angepasst werden müssen. Der Standardinnenradius $r_{1,5}$ wurde als der Radius mit den reproduzierbarsten und besten Ergebnissen bezüglich Nahtqualität identifiziert und in den weiteren Versuchen verwendet. Auch ist dieser für alle Modellgeometrien im Großserienbetrieb zu empfehlen und möglichst über die komplette Nahtlänge konstant zu halten.

4.4.3 Spaltvariation

Aus Voruntersuchungen [Kais09; Hoff03] ist bekannt, dass eine schwankende Spaltbreite einen großen Einfluss auf die Nahtqualität beim Laserlöten am Bördelstoß hat. Dies äußert sich insbesondere in einer erhöhten Porenanzahl am schrägen Bördelstoß der Dachnulfuge. Für die geringsten Porenhäufigkeiten sind in diesen Arbeiten Spaltbreiten von kleiner 0,2 mm

empfohlen worden. Da sich durch die in dieser Dissertation verwendete Spannvorrichtung für die Probenbleche ein technischer Nullspalt reproduzierbar einstellen lässt (siehe Abschnitt 4.2.6), sind für alle Untersuchungen die Probebleche ohne Spalt gelötet worden. Dadurch reduziert sich auch der Einfluss des Spaltes auf die in dieser Arbeit ermittelten Porenhäufigkeiten und es lassen sich die anderen Einflussgrößen deutlicher extrahieren.

4.5 Rissanalyse

Wie in Abschnitt 2.5.3 beschrieben kann es beim Lötten von verzinkten Stahlblechen zur Rissbildung bzw. zur sogenannten Lötbrüchigkeit kommen. Im folgenden Abschnitt sollen detaillierte Analysen Aufschluss über deren Entstehung geben. Vor allem in Nahtanfangs- und Endbereichen bei erhöhtem Energieeintrag und/oder längerer Verweildauer des Laserstrahles an einem Ort (bspw. bei der Eckumlötung) wurden die Rissphänomene beobachtet. Die Abbildung 4.42 zeigt eine REM-Aufnahmen einer rissbehafteten Probe.

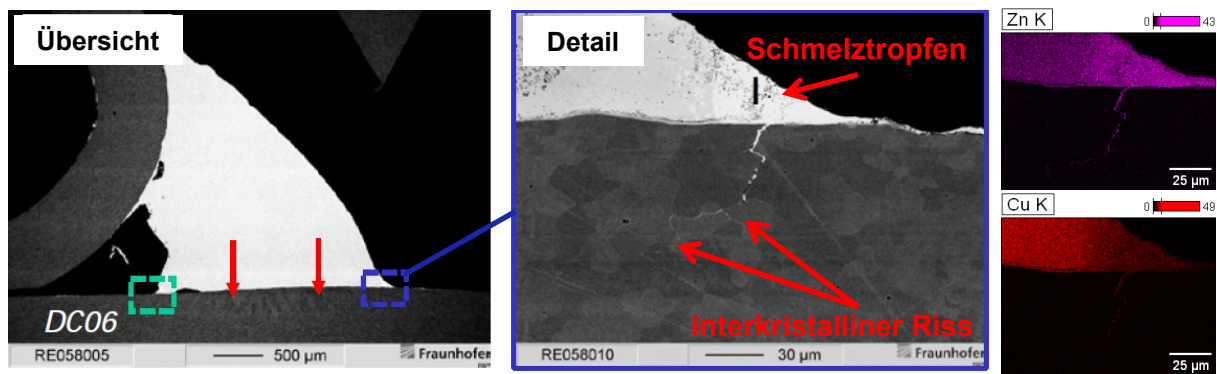
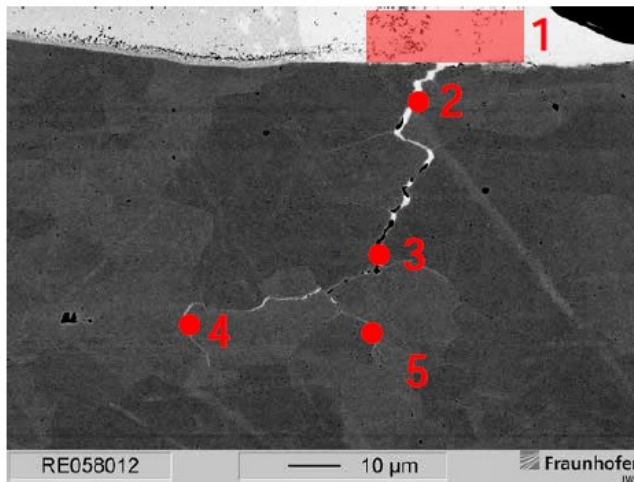


Abbildung 4.42 REM-Aufnahmen einer rissbehafteten Laserlötprobe in der Übersicht (links), Detail (Mitte), sowie EDX-Analyse (rechts)

Die Probe wurde am Nahtanfang einer Laserhartlötverbindung der Dachnullfugengeometrie entnommen. In der Detailansicht (Mitte) ist die feine Vernetzung des Risses bis tief in den Grundwerkstoff (DC 06) zu erkennen. Dieses Rissphänomen bildet sich ausgehend von den Zinkanhäufungen (Schmelztropfen) im oberen Bereich der Naht am Übergang zwischen Lot- und Grundwerkstoff. Der Riss verläuft interkristallin, besonders entlang der durch den Wärmeeintrag vergrößerten Körner, und ist überwiegend mit dem Material des Schmelztropfens gefüllt (Lötbrüchigkeit). Dies bestätigt eine EDX-Analyse (siehe Abbildung 4.43).



Ermittelte Zusammensetzung (ohne Eisen):

Nr.	Zn	Cu
1	68,8	31,2
2	68,0	32,0
3	68,1	31,9
4	65,4	34,6
5	67,8	32,2

Abbildung 4.43 EDX-Punkt-Untersuchungen des gefüllten Risses an verschiedenen Messpositionen

Das sich ausbildende „Rissnetzwerk“ ist hauptsächlich mit einer Zink(Zn)-Kupfer(Cu)-Legierung gefüllt. Die Elemente aus der angrenzenden Stahlmatrix wurden dabei nicht berücksichtigt. Das Verhältnis von Zink- zu Kupferanteil beträgt bei dieser Probe etwa 2:1. Das Verhältnis zwischen diesen Elementen dreht sich gegenüber der Rissausbildung beim Schutzgaslöten (vgl. Abschnitt 2.5.3) aufgrund der kürzeren Energieeinwirkzeiten um. Weiterhin wurden bei den Proben besonders in von der Lötnaht weiter entfernten Bereichen auch Zn-Cu-Verhältnisse von bis zu 4:1 ermittelt. Das Vorhandensein von Zink begünstigt demnach die Rissbildung in erheblichem Maße, da das vorhandene Zink die Festigkeit an den Korngrenzen absenkt und somit die Spannungen beim Erstarren der Lötnaht nicht aufgenommen werden können. Zudem hat das Zink gegenüber Kupfer den niedrigeren Schmelzpunkt und kann daher bei gleichen Prozesstemperaturen schneller in den Grundwerkstoff diffundieren. Ein weiterer Faktor für die Ausprägung der Risse und Loteindringungen ist die Dauer der Einwirkung des Laserstrahls auf den Grundwerkstoff und der daraus resultierenden Kornvergrößerung. Ergänzend wurden Härtemessung (Mikrohärte HV0,05) im Grundwerkstoffblech nahe der Laserlötnaht durchgeführt (Abbildung 4.44).

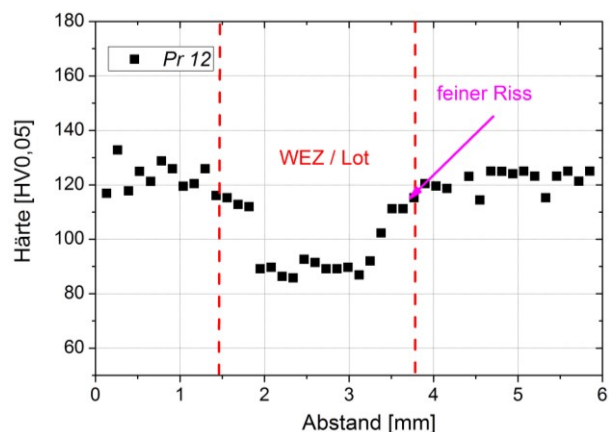
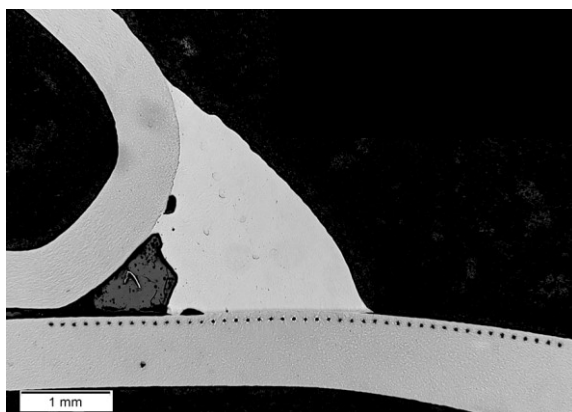


Abbildung 4.44 Härtemesspositionen im Grundwerkstoff (links) und ermittelte Mikrohärtewerte (rechts)

Bei den Härtemessungen zeigt sich ein signifikante Verringerung (30 HV) der Mikrohärtigkeit im wärmebeeinflussten Bereich der Lötnaht. Durch den laserinduzierten Energieeintrag kommt es zu einer Reduzierung der Kaltverfestigung des kaltgewalzten und umgeformten Grundwerkstoffbleches, wodurch es wiederum weniger Kräfte (bspw. eingebracht durch die Spannvorrichtung oder die taktil geführte Optik) aufnehmen kann. Ebenso wie das Kornwachstum begünstigt dies ebenfalls die interkristalline Rissbildung. Auffällig ist weiterhin der Härtesprung im Übergang der Wärmeeinflusszone (WEZ) zum unbeeinflussten Grundwerkstoff. Dies ist ein Hinweis auf hohe Temperaturgradienten, welche starke Schrumpfspannungen im Bauteil bewirken und die Neigung zur Flüssigmetall induzierten Spannungsrisskorrosion (Lötbrüchigkeit) verstärken kann.

Da beim Laserstrahlhartlöten der Dachnahtfuge in der Karosseriebaufertigung folgende Prämissen vorgegeben sind:

- Verzinkung der Karosseriebleche aus Korrosionsschutzgründen
- Verwendung von Tiefziehblechen (DC06) aufgrund der erforderlichen starken Umformungsgrade des Seitenwandrahmens (Designanspruch)
- Festigkeitsanforderung (mindestens Grundwerkstofffestigkeit) und damit Verwendung eines thermisches Fügeverfahrens
- Fertigungsfolge (letzter Prozessschritt) und somit Vorfixierung der restlichen Karosseriekomponenten

lassen sich die Riss fördernden Maßnahmen (Eigenspannungen, Werkstoffkombination sowie Arbeitstemperatur) nur bedingt reduzieren. Zum einen sollte als Vermeidungsstrategie ein für den optimalen Prozess ermitteltes Temperatur-Zeit-Regime nicht überschritten und zum anderen die Zinkverdampfung direkt vor dem Prozess sichergestellt werden. Neuartige Ansätze zur verbesserten Prozessführung sind in Kapitel 5 erläutert. Generell sind bei der in dieser Arbeit verwendeten Werkstoffkombination geringere Streckenenergien zu verwenden, um die Grobkornbildung, die Diffusionsgeschwindigkeiten sowie die temperaturbedingten Spannungen zu reduzieren.

4.6 Synopsis zur Lötnahtqualität und zur Entstehung von Nahtimperfectionen

In diesem Kapitel der Arbeit konnten die begrenzten Nahtmodellierungsmöglichkeiten bzw. die Grenzen für positive Maßnahmen bezüglich Steigerung der Verbindungsbreite bei gleichzeitiger Reduzierung der Nahtimperfectionen (Poren, Randkerben, Anbindungsfehler) mit dem Standardequipment aufgezeigt werden. Zudem wurden weitere in der Literatur nicht abgeprüfte Änderungen der Nahtqualität aufgrund von Geometrieinflüssen untersucht. Für eine genaue Bewertung der Nahtqualität müssen immer äußere und innere Merkmale

herangezogen werden, da die Tendenzen für jeweilige Verbesserungen oft gegenläufig ausgeprägt sind. Die größten Einflüsse auf die Nahtqualität beim Laserstrahlhartlöten haben der Energieeintrag (über Laserleistung, Vorwärmstrom), die Winkellagen der Einstrahlung sowie der Drahtzuführung und die Bauteilgeometrien (im Besonderen der Dachradius am schrägen Bördelstoß). Über HS-Aufnahmen konnte die hohe Dynamik des Prozesses beobachtet und eine schlagartige Spritzer- sowie verstärkte Porenbildung bei gesteigertem Energieeintrag und hohen Geschwindigkeiten festgestellt werden. Die Schmelzbadbewegung im vorderen Bereich erfolgt dabei am schrägen Bördelstoß in lateraler und vertikaler Richtung zyklisch. Entscheidend ist dafür auch das zugeführte Drahtvolumen in Kombination mit dem Energieeintrag, da dadurch das zur Verfügung stehende Schmelzbadvolumen definiert wird. So kommt es bspw. bei einem zu geringen Energieeintrag oder zu hohem Drahtvorschub zu ungleichmäßigem Abschmelzen und zur verstärkten Bildung von Nahtimperfectionen. Auch bei zu hohem Energieeintrag im Vergleich zur Referenz entstehen verstärkt nicht zulässige Nahtimperfectionen. Bspw. können sich durch schlagartige Eruptionen im Schmelzbad Oberflächenporen ausbilden. Ein erhöhter Energieeintrag (Laserleistung, Vorwärmstrom) führt zudem bis zu einem gewissen Maß zu einer höheren Verbindungsbreite, allerdings auch zu einer Steigerung der Porenanzahl, besonders in den kritischen oberen Bereichen der Lötnaht. Zusätzlich kann bei einer Erhöhung der Vorwärmleistung ab ca. 100 W keine Steigerung der Verbindungsbreite erzielt werden, da die Nahtwurzel in der tiefen Fuge des Bördelstoßes nicht anbindet. Weiterhin kommt es ab einer gewissen Leistungsschwelle zu einem Anschmelzen des Grundwerkstoffes, was nicht zulässig ist (Auflegieren der Naht, Absenken der Festigkeit, korrosiv auffällig). Außerdem steigt mit dem erhöhten Energieeintrag die Gefahr für Rissbildung (Flüssigmetall induzierte Spannungsrisskorrosion). Da aus den Untersuchungen in Kapitel 4 hervorgeht, dass die Benetzung hauptsächlich in den vom Laserstrahl ausgeleuchteten Bereichen erfolgt, wird für die weiteren Untersuchungen die Kaltdrahtvariante favorisiert. Dies eliminiert gleichzeitig auch den Einflussfaktor „Vorwärmleistung“. Als Radius konnte der Referenzradius von $r_i = 1,5 \text{ mm}$ für die besten geometrischen Voraussetzungen hinsichtlich innerer und äußerer Merkmale bestätigt werden. Bei Radiusänderung auf der Dachseite müssten weiterhin der Draht- und Fokusbereich angepasst werden.

Generell bleibt festzuhalten, dass der Laserstrahlhartlötprozess für eine Vorschubgeschwindigkeit von 3 m/min bei dieser komplexen Geometrie der Dachnullfuge mit dem Standardequipment an seine Grenzen stößt und neuere systemtechnische Möglichkeiten entwickelt werden müssen.

5 Versuchsdurchführung und –ergebnisse zum Laserstrahlscanlöten

5.1 Laserlöten mit gescanntem Laserstrahl

Für das Laserstrahllöten durch Strahlpendeln sowie Laserlöten mit gescanntem Laserstrahl soll an dieser Stelle der Begriff „**Laserstrahlscanlöten**“ definiert und nachfolgend verwendet werden. Das Laserstrahlscanlöten basiert auf der Auslenkung des Laserstrahls in ein- oder zweidimensionaler Form quer und/oder in Vorschubrichtung. Darüber lassen sich ausgehend vom ursprünglichen Strahl- bzw. Intensitätsprofil verschiedene Energieverteilungen in der Fokusebene und somit in der Schmelzbadzone einstellen. Das Parameterfeld wird dabei um die einzustellenden Größen Amplitude und Frequenz erweitert. Weiterhin beeinflusst beim Scannen in Vorschubrichtung die Geschwindigkeit des Bearbeitungskopfes die Energieverteilung entscheidend mit. Dieser Sachverhalt wird in [Haar10] beschrieben. In dieser Arbeit wurde durch eine Strahlauslenkung in Vorschubrichtung das Temperatur-Feld vergrößert und damit das Temperatur-Zeit-Regime eingestellt. Dadurch erfolgte hinsichtlich der Prozesszone eine Reduzierung der lokalen Maximaltemperatur, gleichzeitig aber eine zeitliche Verlängerung der mittleren Temperatureinwirkung, wodurch die Leistung pro Zeit steigt [Haar08]. Bei gleicher Laserleistung und Strahlablenkung wird durch eine höhere Vorschubgeschwindigkeit das Temperaturfeld gestreckt. Dies führt zu einer zusätzlichen Absenkung der Maximaltemperatur bezogen auf den statischen Brennfleck. Mit dieser Verfahrensvariante konnte in [Haar10] an lasergelöteten Aluminium-Stahl-Verbindungen im Stumpfstoß die Bildung der kritischen intermetallischen Phasensäume gezielt vermindert und somit die Festigkeitseigenschaften verbessert werden. Zudem wurde unter Berücksichtigung der gestellten Anforderungen eine Verdopplung der Vorschubgeschwindigkeit auf 4 m/min erreicht. Für das Laserstrahlscanlöten gibt es bezüglich Bördelstoßkonfigurationen sowie gelöteten Stahlblechen mit Kupferzusatzwerkstoffen hingegen keine Referenzen.

In dieser Arbeit soll der Ansatz des Laserstrahlscanlötens an der speziellen Applikation **Dachnullfuge** unter den höchsten Qualitätsanforderungen evaluiert werden. Weiterhin ist die im Optikaufbau vorhandene Laserleistungsregelung über koaxiale bildgebende Temperatursensoren auf diesen Anwendungsfall zu prüfen. Dabei sollen mögliche Regelgrößen identifiziert und die Systemtechnik weiterentwickelt werden.

5.2 Versuchsaufbau mit Scanoptik

5.2.1 Anlagentechnik

Die Anlagentechnik entspricht im Wesentlichen dem unter Punkt 4.2 geschilderten Aufbau mit den für das Laserstrahllöten benötigten Prozessteilnehmern. Nachfolgend sollen lediglich die Unterschiede zum Standardaufbau herausgearbeitet werden. Als Handhabungsgerät kam ein KUKA-Roboter zum Einsatz mit Wiederholgenauigkeiten von $\pm 0,1$ mm [Kuka14]. Als Drahtfördergerät wurde ein Dinse (DIX KDK) verwendet, das nach dem Push-Pull-Prinzip arbeitet, allerdings ausschließlich Kaltdraht fördert. Da in dieser Arbeit explizit nachgewiesen werden konnte, dass die geforderte Lötnahtqualität mit Kaltdraht erreicht werden kann und zudem die Nahtveränderungen auf Einflüsse (bspw. bei Winkelveränderungen) sensibler reagieren, wird bei den Laserstrahlscanlötversuchen nur Kaltdraht angewendet. Weiterhin erfolgte die Drahtzuführung über ein bezüglich Optik fest fixiertes Modul, welches die Drahtdüse beinhaltet. Demzufolge war bei diesen Untersuchungen keine taktile Nahtführung möglich. Es wurde ein fasergekoppelter Diodenlaser der Firma Laserline (LDF-400-5000), mit einer Strahlqualität von $40 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$, verwendet. Die Fügegeometrie, Spannungssituation, Prüfvorgaben und –methoden werden analog der Untersuchungen in Kapitel 4 angewendet. Der prinzipielle Aufbau ist in Abbildung 5.1 dargestellt.

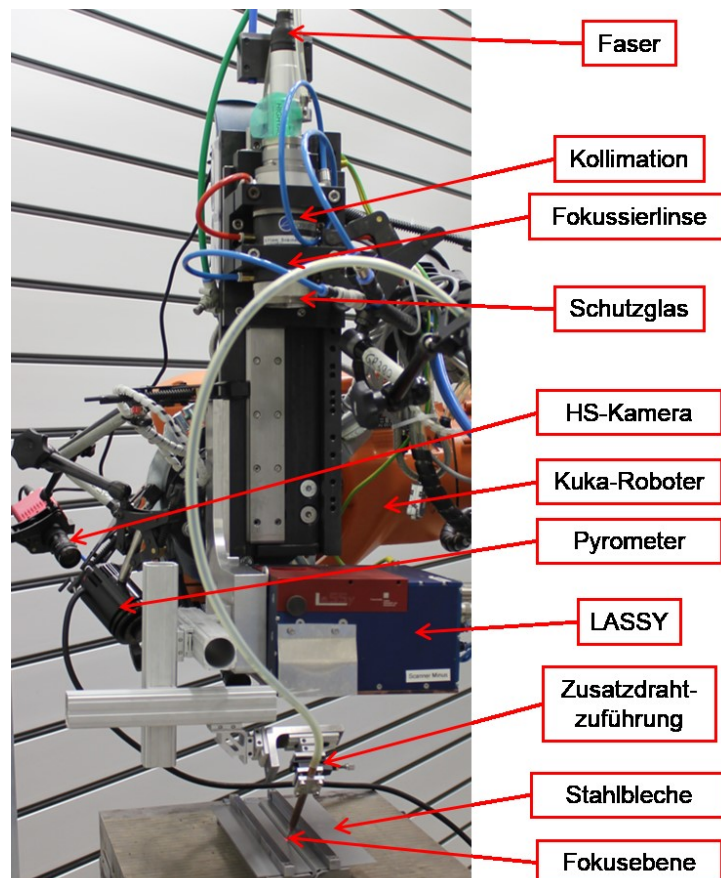


Abbildung 5.1 Versuchsaufbau für das Laserstrahlscanlöten

5.2.2 Scanoptik „LASSY“

Die Abkürzung „LASSY“ steht für **L**aser-**S**canning-**S**ystem. Diese wurde vom Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik (IWS) Dresden als Strahlformungssystem für Diodenlaseranwendungen im Wellenlängenbereich von 808 bis 1064 nm konzipiert [Bonß06a]. Das System kann dabei bis zu einer maximalen Laserausgangsleistung von 6 kW eingesetzt werden [IWS10]. Die Abbildung des Laserspots wird durch eine Kollimations- und Fokussierlinse, welche im Strahlengang dem System vorgelagert sind, festgelegt. Die weitere Strahlumlenkung erfolgt im „LASSY“ mit kleinen Spiegeln, wobei dem Scanspiegel die größere Bedeutung zu Teil wird. Dieser kann mittels eines Galvanometerantriebs ausgelenkt werden, sodass Scanwinkel von $\pm 8^\circ$ und Scanfrequenzen von bis zu 200 Hz erreichbar sind. Damit wird eine dynamische Strahlformung möglich [Seif04]. Durch Variation der Auslenkung des Scanspiegels ist die Spotlänge eindimensional einstellbar. Die zweite Dimension wird durch die oben genannte Abbildung des Linsensystems vorgegeben. Die prinzipielle Funktionsweise des „LASSY“ ist in Abbildung 5.2 schematisch dargestellt.

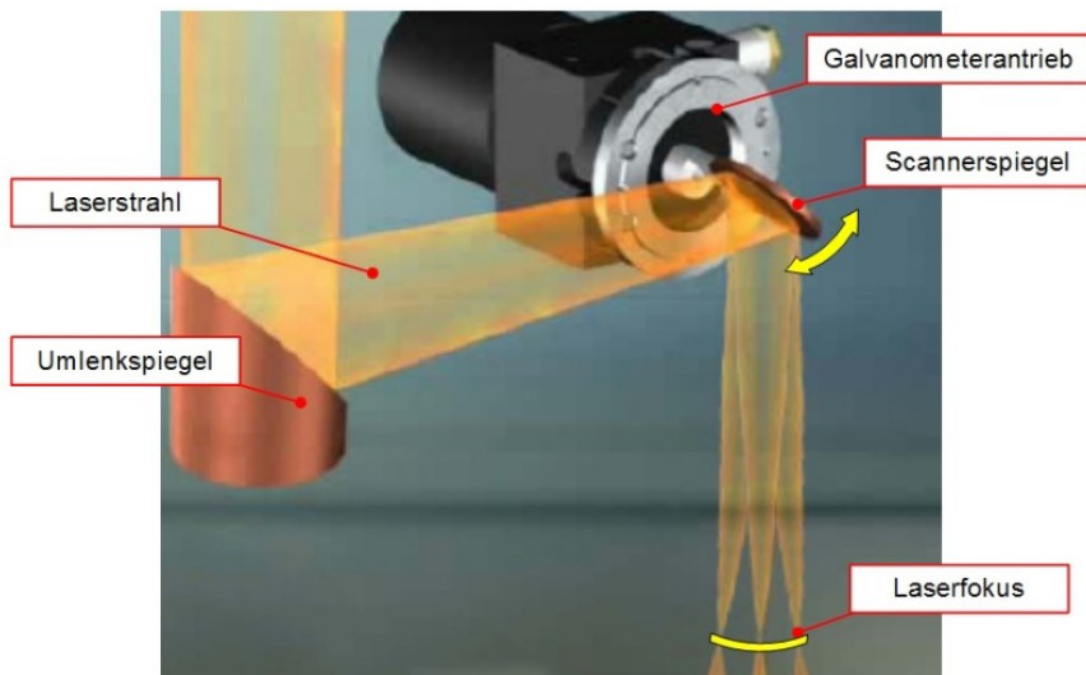


Abbildung 5.2 Funktionsprinzip der dynamischen Strahlformung mittels LASSY [Webe10]

Zusätzlich ist Modulation der Intensitätsverteilung über die Auslenkung mittels frei definierbarer Schwingfunktionen über die zugehörige Software Laser Scanner Control (LSC) möglich. Die Schwingfunktionen können durch Einstellen der lokalen Einwirkzeit generiert und gespeichert werden (Abbildung 5.3, rechts). Dadurch ist ein Anpassen des Energieeintrages an die jeweilige Wärmeableitung im Bauteilvolumen möglich, bspw. bei Kanten, Bohrungen oder einer vorlaufenden Bauteilerwärmung während des Prozesses [Bonß08]. Des Weiteren können in der Benutzeroberfläche des Programms (Abbildung 5.3

links) die Einstellungen für die Scanfrequenz, die Spiegelauslenkung (Amplitude) und die Verschiebung in Längsrichtung (Offset) vorgenommen werden.

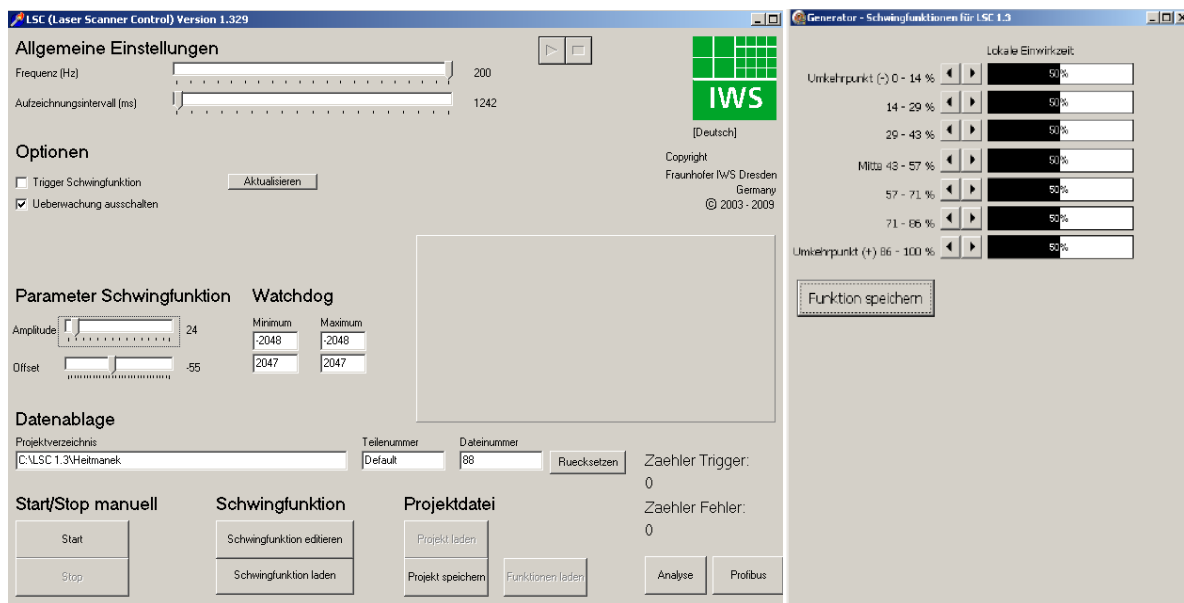


Abbildung 5.3 LSC Benutzeroberfläche: Allgemeine Einstellungen (links) und Schwingfunktionsgenerator (rechts)

Bei einer beliebig eingestellten Scanweite und konstant gehaltener Laserleistung lassen sich bspw. bei einer Sinusschwingung in den Umkehrpunkten Intensitätsspitzen aufgrund der langsameren Spiegelgeschwindigkeiten (Brems- und Beschleunigungsverhalten) nicht vermeiden. Dies kann zu qualitätsmindernden Bearbeitungsergebnissen führen. Über den Schwingfunktionsgenerator kann dies mit Hilfe der Einstellung der gleichen Einwirkzeit (hier überall 50%) angepasst werden (Abbildung 5.4). Darüber hinaus sind durch die frei definierbare Schwingfunktion beliebige Intensitätsverteilungen angepasst auf die jeweilige Applikation denkbar.

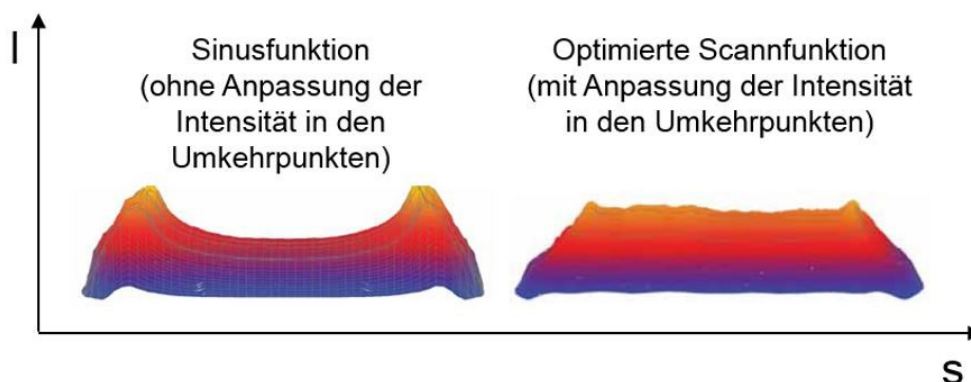


Abbildung 5.4 Exemplarische Beispiele für Intensitätsverteilungen [Bonß06b]

Bei den aktuellen „LASSY“-Baureihen wurde zudem die Möglichkeit einer direkten Temperaturüberwachung und Visualisierung durch Integration eines kamerabasierten und ortsauflösend messenden Temperaturerfassungssystems „E-MAqS“ geschaffen. Mit diesem System lassen sich nach [Bonß08] Temperaturen ab 600 °C mit einer Messrate von bis zu 220 Hz in einem variablen Messfeld von 10 mm x 10 mm bis zu 100 mm x 100 mm aufzeichnen. Die Empfindlichkeit des Sensors steigt zu höheren Temperaturbereichen an (Abbildung 5.5).

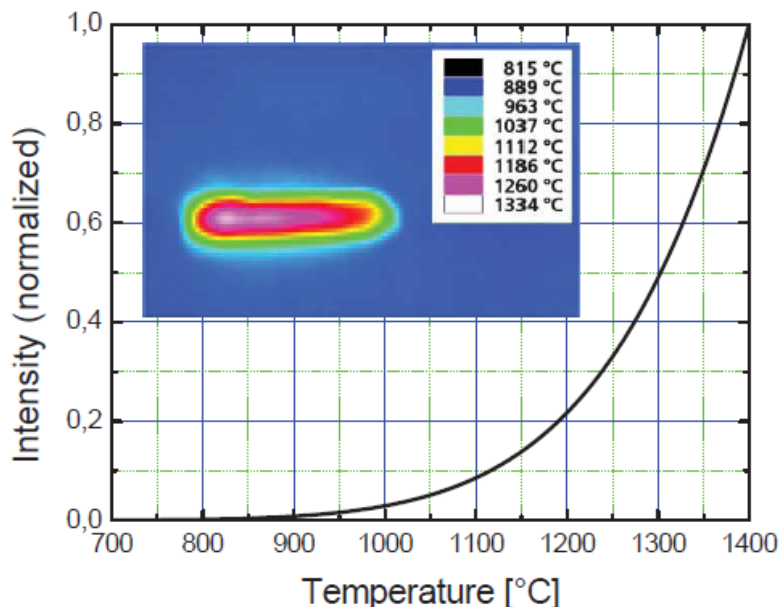


Abbildung 5.5 Normierte Signalempfindlichkeit der kamerabasierten Temperaturmessung [Bonß08]

Weiterhin wird der luftgekühlte Scanspiegel pyrometrisch und das wassergekühlte Gehäuse durch Temperatursensoren überwacht, um eine Überhitzung bspw. bei Abschalten oder Unterbrechung der Medienversorgung zu vermeiden. Über die permanente Kühlung mit Selbstüberwachung wird die Möglichkeit für einen industriellen Dauerbetrieb sichergestellt. Zudem wird das LASSY dauerhaft luftgespült, um eine Verschmutzung der empfindlichen optischen Komponenten zu vermeiden. Die Schutzgläser können bei Verunreinigungen oder Einbränden gewechselt werden. Generell ist auf eine sorgfältige Justage des Strahlengangs zu achten. Dabei muss der Abstand der vorgelagerten Fokussierlinse so gewählt werden, dass der Laserstrahl nicht zu stark fokussiert auf den Scanspiegel trifft. In diesem Fall könnte die lokale Wärmebelastung durch die hohe Energiedichte auf der luftgekühlten, beschichteten Spiegeloberfläche zu groß werden und irreparable Beschädigungen verursachen. Auch ein zu stark defokussierter Laserstrahl ist zu vermeiden, da bei einer Drehung des Scanspiegels im Strahlengang (während des Scanvorgangs) die Gefahr besteht, dass der Laserstrahl über die Spiegelränder hinaus auf empfindliche Bauteile innerhalb des LASSY trifft. [IWS10] In Rahmen dieser Arbeit wurde die Ausleuchtung der

optischen Komponenten im Strahlengang so eingestellt, das keine Überlastung auf der Spiegeloberfläche entstand und der gesamte Strahlquerschnitt bei jeder und besonders bei maximaler Auslenkung auf dem Scanspiegel abgebildet wurde.

Zudem wurden Kaustikmessungen mit dem entwickelten Versuchsaufbau durchgeführt, um eine vergleichbare Abbildung zu den Untersuchungen mit Standardequipment sicherzustellen (vgl. Kapitel 4.2.2). Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.6 dargestellt.

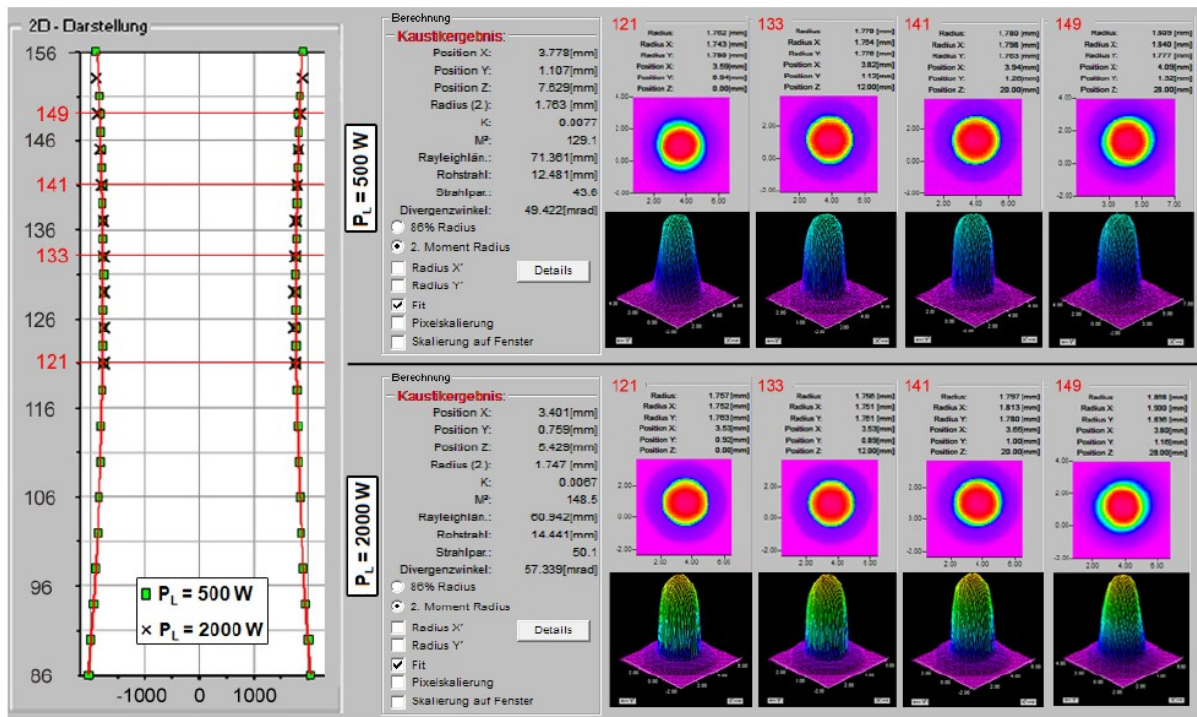


Abbildung 5.6 Kaustikmessungen des Laserstrahls im Bearbeitungsbereich mittels Primes [Webe10]

Die Messungen erfolgten bei zwei unterschiedlichen Leistungen (500 und 2000 W) und lieferten für den Strahlradius in der Fokusebene ein gemitteltetes Ergebnis von 1,755 mm. Die Spotgröße, welche für die Bearbeitung bei den Scanversuchen besonders für die Benetzungsbedingungen an den seitlichen Rändern quer zur Vorschubrichtung von entscheidender Bedeutung ist, ergibt sich daraus zu 3,6 mm. Dies liegt im Bereich des gemessenen Strahldurchmessers mit der Standardbearbeitungsoptik. Eine Vergleichbarkeit hinsichtlich des Wärmeeintrages in Querrichtung ist damit und mit dem Top-Hat ähnlichen Profil gegeben. Weiterhin fällt die sehr große Rayleighlänge auf. Dadurch wirken sich Variationen in z-Richtung im Zehntelmillimeterbereich kaum auf die Versuchsergebnisse aus. Dies wurde zudem mit Vorversuchen nachgewiesen und soll an dieser Stelle nicht weiter erläutert werden.

5.2.3 Laserleistungsregelung (lasertronic® LompocPro)

Eine Prozessregelung wirkt im Hinblick auf industrielle Anwendungen besonders bei komplexen Prozessen unterstützend. So werden neben der Kompensation von kleinen Störungen, auch frühzeitig Warnungen ausgegeben, bevor der Prozess aus den vorgegebenen Qualitätsgrenzen herausläuft. [Bonß08] Letztlich stellt eine Online-Prozessregelung (In-Prozess) immer den kleinstmöglichen Regelkreis für sämtliche Bearbeitungsprozesse dar, wodurch sich eine gleichbleibende Qualität und minimale Ausschussquoten erzielen lassen. In Verbindung mit dem im LASSY integrierten Kamerasystem „E-MAqS“ ermöglicht die zusätzliche Software „LompocPro“ (Laser online monitoring power control program) eine Online-Regelung der Laserleistung. Diese wird in Abhängigkeit des beobachteten Temperaturfeldes in der Fügezone in vorab definierten Grenzen geregelt. Die Bedienoberfläche zeigt Abbildung 5.7.

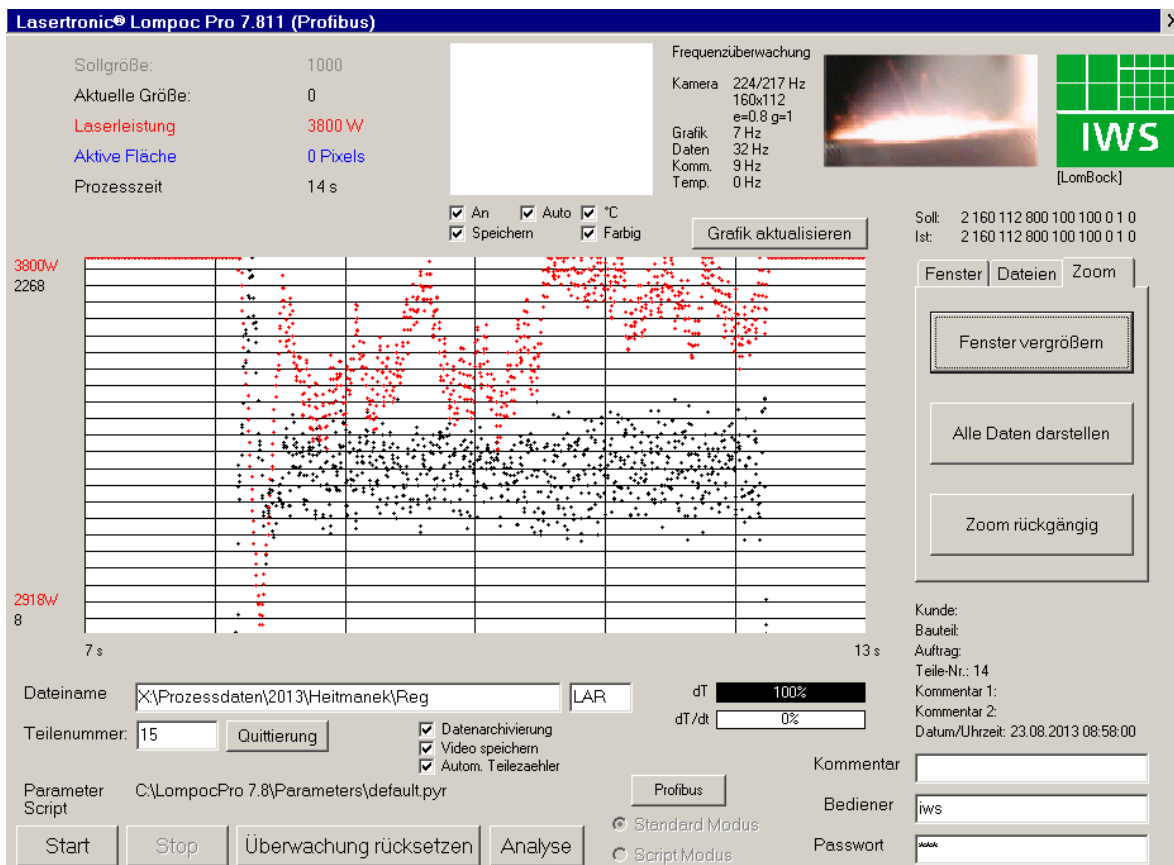


Abbildung 5.7 Bedienoberfläche „lasertronic® LompocPro“

Im oberen Teil sind eine Anzeige für die aktuellen Regelparameter während des Prozesses und darunter der zeitliche Verlauf der Laserleistung (rote Kurve) sowie die gemessenen Temperaturdaten (schwarze Kurve) angeordnet. Die Daten können jederzeit aus dem vorher festgelegten Speicherort (unterhalb des Diagramms) geladen oder für die Weiterverarbeitung exportiert werden. Die Regelung selbst besteht aus einem Software-Digitalregler mit einem

speziell an schnelle Laserprozesse angepassten Algorithmus. Die Regelung funktioniert dabei im Wesentlichen wie eine klassische PID-Regelung. Zur Kalibrierung der Regelung für das Laserstrahlhartlöten können im Fenster „Parameter“ alle relevanten Einstellmöglichkeiten vorgenommen werden (siehe Abbildung 5.8).

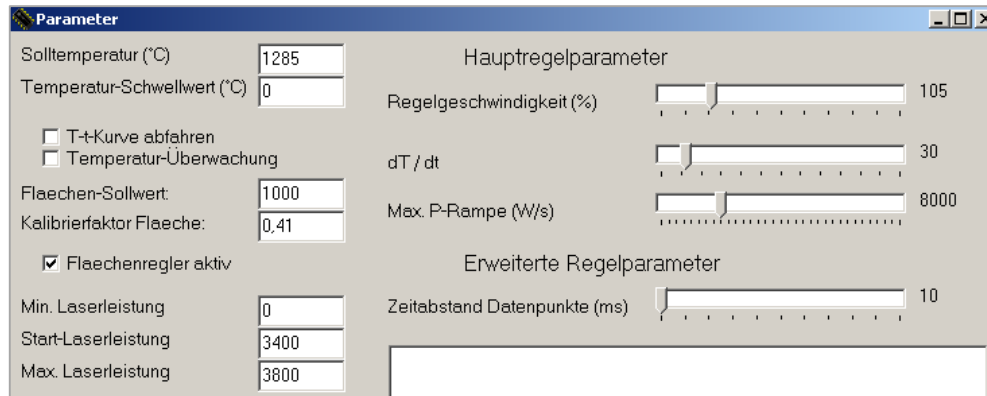


Abbildung 5.8 Einstellung der Überwachungs- und Regelparameter in „LompocPro“

In diesem Fenster können die Temperatur (Soll- und Grenzwert bzw. Temperaturverlauf bei Temperaturregelung), die Flächengröße (Sollwert und Kalibrierfaktor bei Flächenregelung), die Laserleistung (Start-, minimaler und maximaler Grenzwert) sowie die Regelparameter angepasst werden. Es kann entweder die Temperatur- oder die Flächenregelung aktiv sein. Die Hauptregelgrößen sind:

- die Regelgeschwindigkeit, welche auf alle Regelanteile wirkt
- der Regelanteil dT/dt , der proportional zur Temperaturänderungsgeschwindigkeit wirkt und damit die Empfindlichkeit der Regelung beeinflusst,
- die maximale P_L -Rampe mit der die maximale Laserleistungsänderung pro Zeit definiert und instabiles Regelverhalten vermieden werden kann, sowie
- der Zeitabstand des Messwertabgleichs mit der Regelkarte, welcher nur bei langen Prozessen vom minimal möglichen abweichen sollte, da die Puffergröße begrenzt ist.

[Seif14]

Grundlage für hinreichende Genauigkeit bzw. Reproduzierbarkeit der Messwerte ist die vorherige Kalibrierung der im Programm jeweils für die Spitzentemperatur- oder die Flächenregelung hinterlegten Kennlinien. Als Referenz für die Sollwerte dienen dabei die Prozesse, bei denen die bestmögliche Nahtqualität erreicht wird. Diese muss in jedem Falle vor den Regeluntersuchungen evaluiert werden.

Wie im Stand der Technik (vgl. Kapitel 2.3.3) gezeigt, existieren derzeit für das Laserstrahlhartlöten keine Systeme zur kamerabasierten koaxialen Prozessregelung. Dies liegt in der extrem schwierigen Ableitung von verlässlichen Regelkenngrößen begründet. Die Laserleistungsregelung „LompocPro“ wurde für das Laserstrahlhärten bzw. Randschichtveredeln

komplexer Strukturen und Bauteile am IWS entwickelt und soll in dieser Arbeit auf das Laserstrahlschweißen als wesentlich schnelleren und komplexeren Prozess übertragen werden. Erste Versuche in [Webe10] zeigten vielversprechende Ansätze an ebenen verzinkten Stahlblechen mit Kupferlot. Allerdings ist aufgrund der geometrisch stark veränderlichen Randbedingungen am schrägen Bördelstoß der Dachnulfuge und der sich ständig ändernden Schmelzbadoberfläche des Lotes sowie den damit verbundenen Variationen der Emissionsgrade der einzelnen Oberflächen mit großen Einflüssen auf die Temperaturfelder zu rechnen.

5.3 Analyse Strahleinwirkung

5.3.1 Vorbetrachtungen

In Voruntersuchungen [Webe10] wurde die Verbesserung der Nahtqualität am ebenen verzinkten Stahlblech mit Hilfe des Laserstrahlschweißens nachgewiesen. In diesen Versuchen konnten die unruhige Oberfläche und die innenliegenden Poren reduziert werden. Der Sachverhalt ist in Abbildung 5.9 anhand von Längsschliffen dargestellt.

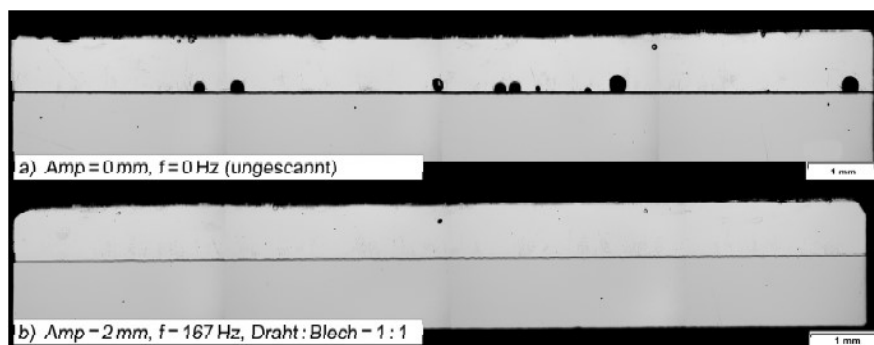


Abbildung 5.9 Porenreduktion am ebenen Stahlblech mittels Laserstrahlschweißens [Webe10]

Der Ansatz für das Laserstrahlschweißen wurde in Punkt 5.1 zum Teil diskutiert. Neben den Veränderungen im Temperatur-Zeit-Regime soll die Strahlelongation allerdings auch für eine bessere Vorwärmung des Grundwerkstoffes und damit verbunden die vor der Schmelzbadfront stattfindende Zinkverdampfung erreicht werden. Zudem wird angestrebt die Schmelzbadlänge hinter dem Draht zu vergrößern, um die Schmelzbadlebensdauer zu erhöhen. Bleibt die Schmelze länger flüssig, ist eine bessere Entgasung aus dem Schmelzbadvolumen möglich und die Oberfläche kann sich gleichmäßig ausbilden. Dies ist vor allem für höhere Prozessgeschwindigkeiten ≥ 3 m/min interessant. Die Abbildung 5.10 zeigt exemplarisch den Vergleich zwischen statischem (links) und ausgelenktem Laserstrahl (doppelte Strahlradius, rechts) mittels Pilotlaser. Die absolute Auslenkung der im System eingestellten

Amplituden wurde mit „heißem“ Strahl an eloxiertem Aluminium ermittelt. Diese Angaben werden weiterhin in dieser Arbeit unter dem Begriff „Auslenkung“ bzw. „ A_{ges} “ verwendet.

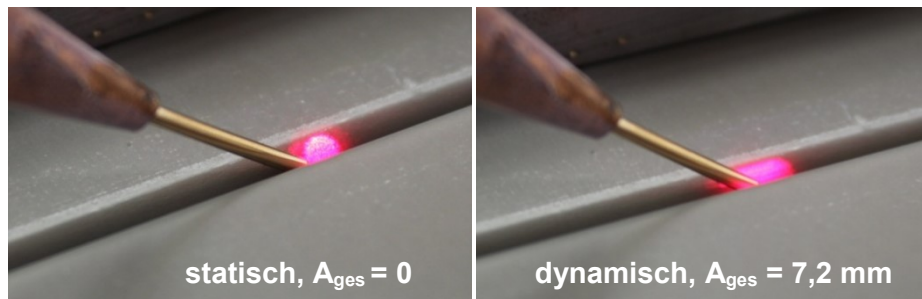


Abbildung 5.10 Deutlich erkennbare Auslenkung in Vorschubrichtung, erzeugt mittels Scanoptik und sichtbarem Pilotlaser

5.3.2 Evaluierung der Referenzparameter

Für die Herstellung einer Laserstrahlhartlötverbindung am schrägen Bördelstoß als Basisreferenz für weitere Untersuchungen ist eine Evaluierung geeigneter Parameter aufgrund der im Vergleich zum Standardaufbau veränderten Betriebsmittel durchzuführen. Die ermittelten Werte an identischen Fügegeometrien und mit gleichen Werkstoffkombinationen ohne Drahtvorwärmung (Kaltdraht) für den statischen Fall (ohne Auslenkung) zeigt Tabelle 5.1.


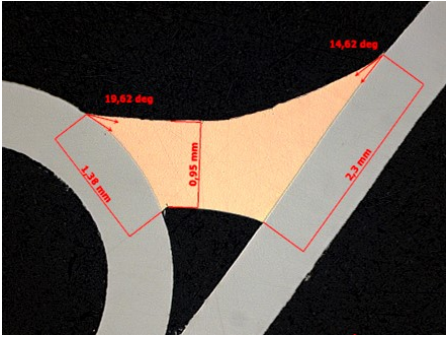

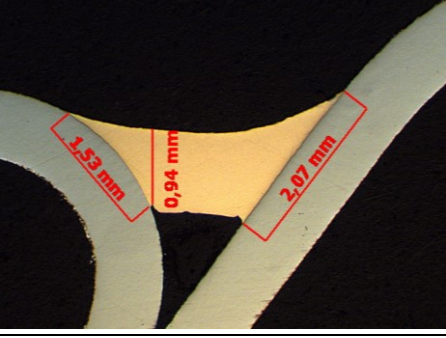
Tabelle 5.1 Ermittelte Parameter als Referenz für weitere Versuche (Kaltdrahtvariante)

Parameter	Bereich Standardequipment	Systemtechnik (IWS)
Laserleistung P_L	3,4 kW – 3,6 kW	3,4-3,6 kW
Vorwärmung Draht P_{Vor}	Nicht verwendet	Nicht verwendet
Lateralwinkel α	0 bis +5°	0 bis +3°
Schleppwinkel β	0 bis -3°	0
Verdrehwinkel γ	0°	0°
Drahtzuführwinkel τ	45°	40° bis 42°
Vorschub v_R	3 m/min	3 m/min
Drahtvorschub v_{Dr}	3,2 m/min	3,2 m/min
Lateralversatz δ	0 mm	0 mm
Stickout l_s	8 mm - 9 mm	12 mm
Auslenkung A_{ges}	Nicht möglich	0 mm
Scanfrequenz f	Nicht möglich	0 Hz

Einige Parameter konnten unverändert übernommen werden. Die Laserleistung der Referenz deckt sich dabei trotz leicht verändertem Strahlprofil (ausgeprägter Top-Hat, siehe

Abschnitt 5.2.2) mit dem ermittelten Leistungsbereich des Standardequipments. Der Draht-zuführwinkel sowie der Stickout mussten geringfügig angepasst werden, da keine taktile Nahtführung möglich war. Die besten Ergebnisse wurden mit Lateralwinkeln von 0° bis +3° erzielt. Ergänzend für die Parameterevaluierung mit dem Prozessequipment des Fraunhofer IWS sind in Tabelle 5.2 die Schliff- und Oberflächenbilder der beiden Referenznähte (Standardequipment und IWS-Equipment) gegenübergestellt.

Tabelle 5.2 Kaltdrahtreferenz im Vergleich zur Standardnaht als Voraussetzung für weitere Untersuchungen

Parameter	Oberfläche	Querschliff
Standard equipment: $P_L = 3,6 \text{ kW}$; $v_R = 3 \text{ m/min}$; $v_{Dr} = 3,2 \text{ m/min}$; $\alpha = 0^\circ$; $\beta = 0^\circ$		
IWS-Equipment $P_L = 3,6 \text{ kW}$; $v_R = 3 \text{ m/min}$; $v_{Dr} = 3,2 \text{ m/min}$; $\alpha = 0^\circ$; $\beta = 1^\circ$		

Zusätzlich zum bestehenden Versuchsaufbau wurde ein High-Speed-Pyrometer (Messfrequenz = 8,7 kHz) integriert. Dadurch konnte die Schmelzbadfrontbewegung bzw. die Benetzungszyklen der Schmelze hoch aufgelöst detektiert werden. Der Messfleck des Pyrometers („Pyrometerspot“) ist dabei ortsfest zur Schmelzbadfront fixiert wurden. Die prinzipielle Ausrichtung des Pyrometers ist Abbildung 5.11 dargestellt.

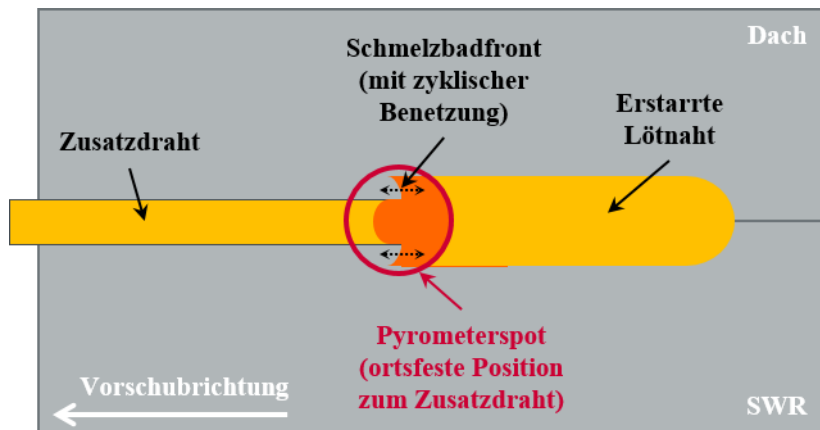


Abbildung 5.11 Position des HS-Pyrometerspots bezüglich Schmelzbadfront

Das Pyrometer detektiert über die gesamte Fläche des Spots ein Wärmeemissionssignal und gibt dieses als gemitteltetes Temperatursignal wieder. Den gemessenen Verlauf des Temperatursignales für den statischen Prozess ($A_{\text{ges}} = 0 \text{ mm}$, $f = 0 \text{ Hz}$) bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 3 m/min zeigt Abbildung 5.12.

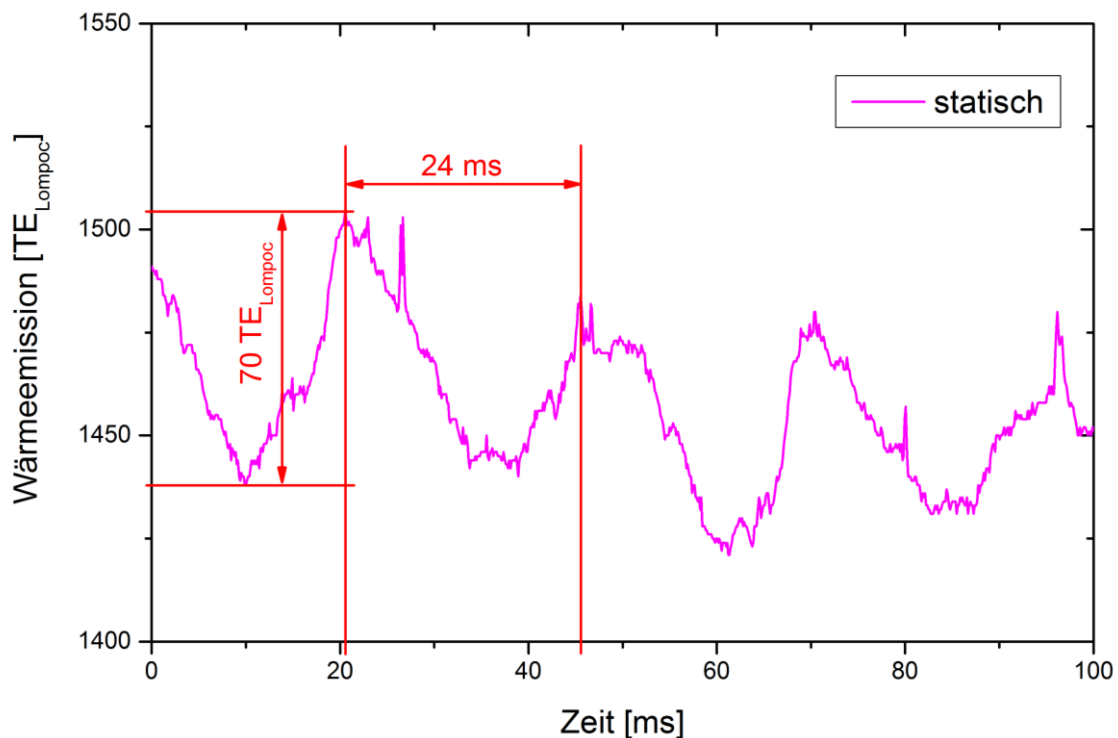


Abbildung 5.12 Eigenfrequenz Benetzungsfrent des Schmelzbades ($P_L = 3,6 \text{ kW}$; $v_R = 3 \text{ m/min}$; $v_{Dr} = 3,2 \text{ m/min}$; $\alpha = 0^\circ$; $\beta = 1^\circ$; $A_{\text{ges}} = 0 \text{ mm}$; $f = 0 \text{ Hz}$)

In dem Diagramm ist der zeitliche Verlauf des Wärmeemissionssignales dargestellt. Die Temperaturvariation zwischen Minima und Maxima zeigt im Mittel 70 Temperatureinheiten (TE_{Lompoc}). Weiterhin ist ersichtlich, dass der Abstand zwischen den einzelnen Temperaturmaxima 24 bis 25 ms beträgt. Diese Maxima stellen die einzelnen Schmelzbadwellen der

zyklischen Benetzung der Schmelzbadfront dar. Für den statischen Prozess ergibt sich somit eine mittlere Benetzungsfrequenz von 42 Hz. Diese wurde ebenfalls für eine Vorschubgeschwindigkeit von $v_R = 3,5$ und 4 m/min ermittelt und ist mit den Daten aus der Literatur [Grim12] in Abbildung 5.13 dargestellt.

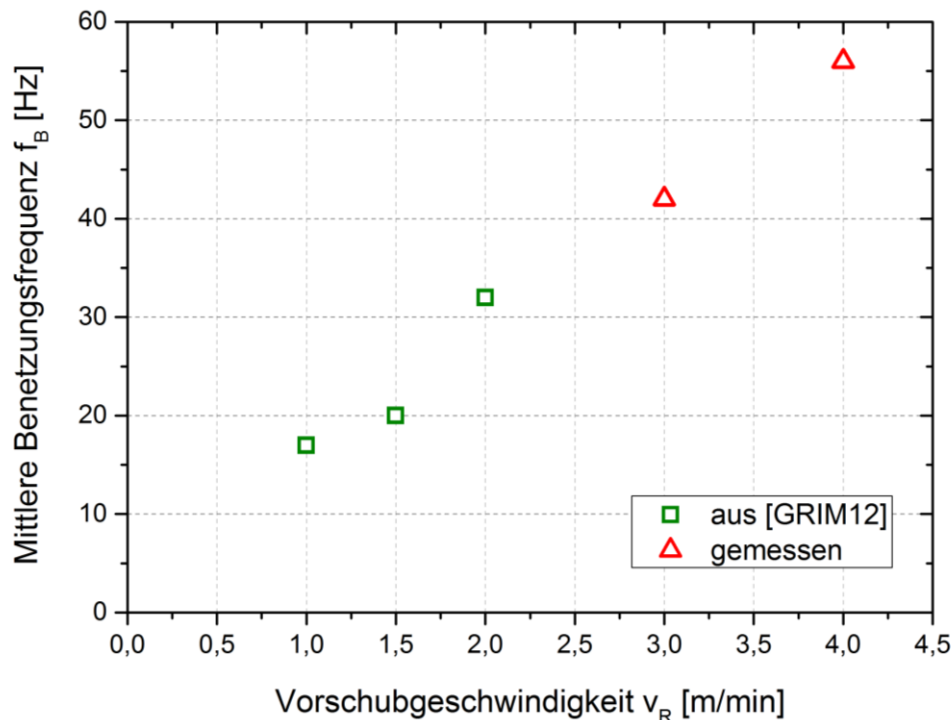


Abbildung 5.13 Mittlere Eigenfrequenzen der Benetzungsfront des Schmelzbades für verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten


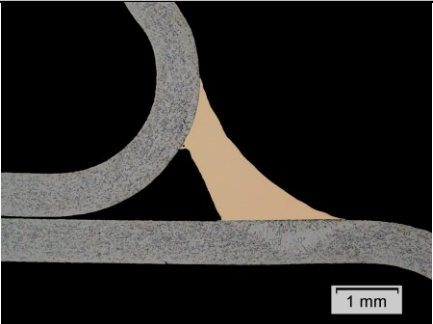

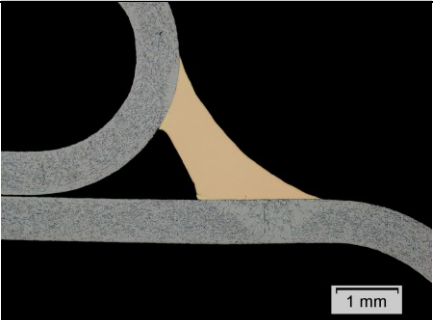
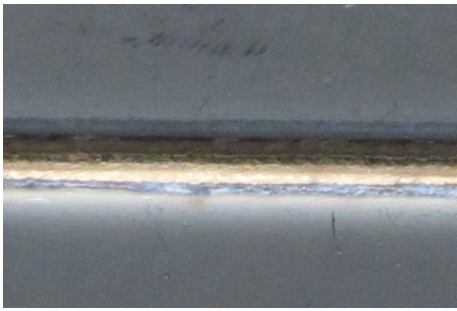
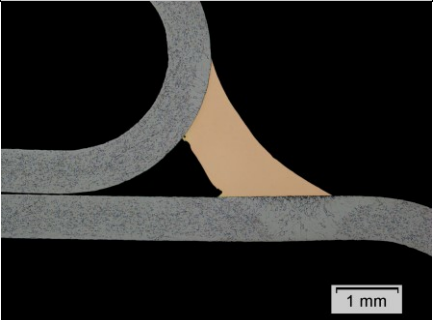
Es ist ersichtlich, dass die mittlere Benetzungsfrequenz mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit steigt. Somit wurde der Trend aus der Literatur bestätigt. Da sich die Zykluszeiten für die Ausbildung der Lötnaht mit höheren Geschwindigkeiten verkürzen und damit direkt der Erstarrungsvorgang beeinflusst wird, ist auch eine größere Randkerbigkeit zu erwarten. Nach [Grim12] ist die Benetzungsfrequenz zusätzlich abhängig vom lateralen Versatz. Eine niedrige Benetzungsfrequenz auf einem der beiden Fügepartner erhöhte bei diesen Untersuchungen die Gefahr für die Bildung von Oberflächenporen und Anbindungsfehlern.

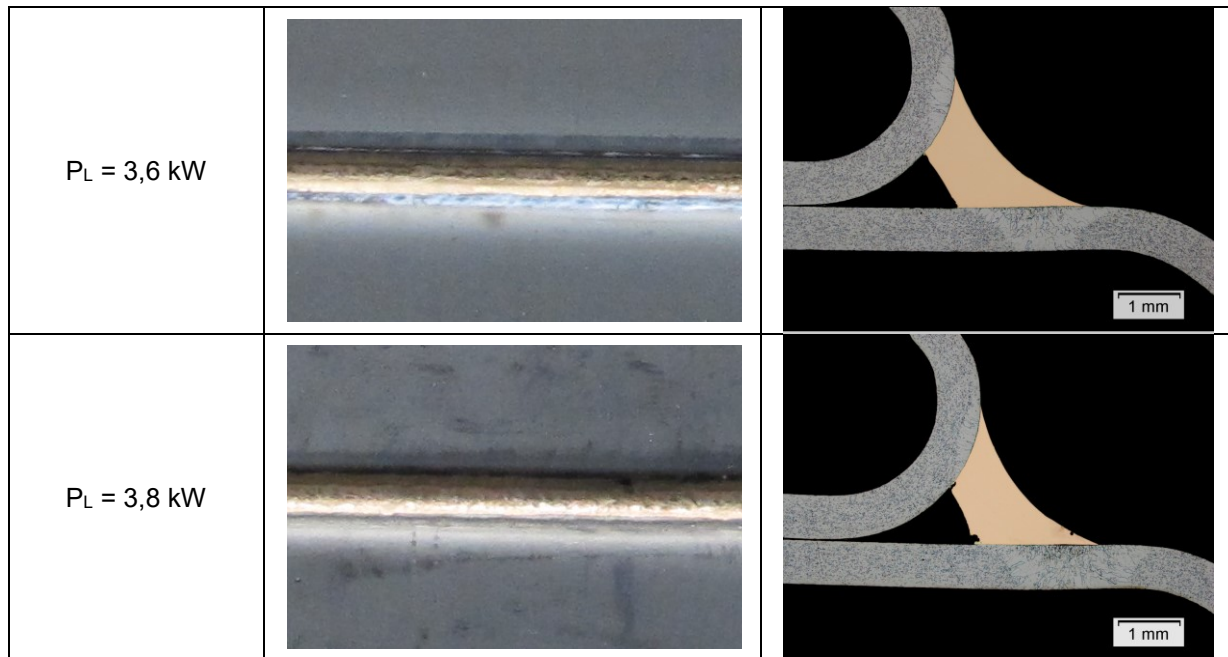
Eine mögliche Grenze der Benetzungsfähigkeit in Abhängigkeit der Benetzungsfrequenzen für Vorschubgeschwindigkeiten oberhalb von 4 m/min konnte nicht ermittelt werden, da die Laserleistung am Bearbeitungsort nicht weiter erhöht werden konnte und somit die notwendige höhere Streckenenergie nicht zur Verfügung stand. Die kleineren Vorschubgeschwindigkeiten (< 3 m/min) wurden im Hinblick auf Wirtschaftlichkeit und Produktivität eines Serienlötprozesses in dieser Arbeit nicht untersucht.

5.3.3 Auffälligkeiten bei der Strahlauslenkung

Aufbauend auf den Referenzuntersuchungen mit statischem Strahl wurden die ersten Versuche mit verschiedenen Auslenkungen erzeugt. In Tabelle 5.3 sind die Analysen der Nahtqualität (Oberflächengüte und Nahtquerschnitt) für die einstellbare Maximalfrequenz von 200 Hz und eine Auslenkung 4,4 mm dargestellt. Ähnlich der statischen Proben ist die deutliche Grobschuppigkeit an der Oberfläche und im Übergang zum Grundwerkstoff bei niedrigen Laserleistungen (3 kW) erkennbar. Die Nahtoberfläche wird mit zunehmender Leistung glatter. Generell bildet sich eine „Lotbrücke“ aus, welche mit steigender Laserleistung weiter in den Bördelstoß hinein sinkt. Dadurch kommt es bei gleichem abgeschmolzenen Lotdrahtvolumen zu einer Vergrößerung der Verbindungsbreite s_{NL} („A-Maß“). Anhand der Schlifffbilder lässt sich zusätzlich erkennen, dass sich ab einer Leistung von 3,2 kW, die Grobkornzone am Seitenwandrahmenblech über die gesamte Blechdicke erstreckt. Ab 3,8 kW treten die unerwünschten Anschmelzungen des Grundwerkstoffes sowie die nicht vollständige Anbindung der Lötnahtwurzel auf.

Tabelle 5.3 Vergleich der unterschiedlichen Nahtausbildungen für verschiedene Laserleistungen ($v_R = 3 \text{ m/min}$; $v_{Dr} = 3,2 \text{ m/min}$; $\alpha = 0^\circ$; $\beta = 1^\circ$; $A_{ges} = 4,4 \text{ mm}$; $f = 200 \text{ Hz}$)

Parameter	Oberfläche	Querschliff (geätzt mit Nital)
$P_L = 3,0 \text{ kW}$		
$P_L = 3,2 \text{ kW}$		
$P_L = 3,4 \text{ kW}$		



Die Auswertung der zugehörigen Verbindungsbreite zeigte eine deutliche Steigerung mit zunehmender Laserleistung (siehe Abbildung 5.14). Ab 3,8 kW fällt diese aufgrund der schlechteren Anbindung im Wurzelbereich wieder stark ab. Das optimale Prozessfenster für Oberflächengüte und Verbindungsbreite liegt mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 3 m/min bei einer Laserleistung von 3,6 kW. Diese wurde für die weiteren Versuche ausgewählt.

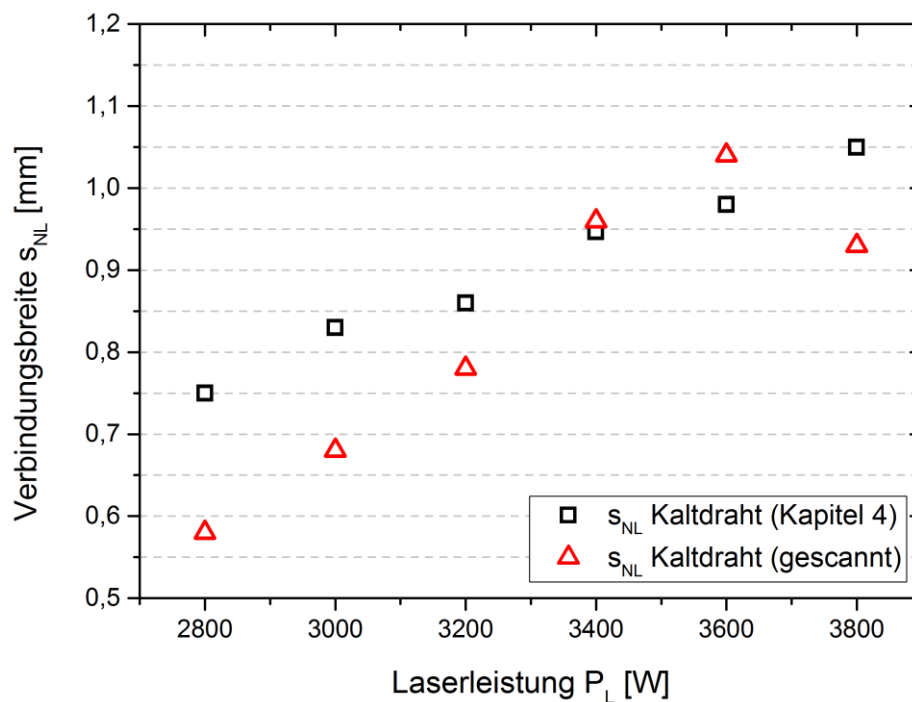


Abbildung 5.14 Verbindungsbreite in Abhängigkeit der Laserleistung ($v_R = 3 \text{ m/min}$; $v_{Dr} = 3,2 \text{ m/min}$; $\alpha = 0^\circ$; $\beta = 1^\circ$; $A_{ges} = 4,4 \text{ mm}$; $f = 200 \text{ Hz}$)

Wird der Prozesszone zu wenig Energie zugeführt, kann es vorkommen, dass der Zusatzdraht nicht vollständig aufgeschmolzen wird. Vor allem im Wurzelbereich (tief in der Fuge) wird dem Draht zuletzt die Energie des Lasers durch Wärmeleitung zugeführt. Dies soll anhand der Abbildung 5.15 verdeutlicht werden. Die Lötung wurde mit einer Laserleistung von 2,8 kW durchgeführt. Die weiteren Parameter entsprechen denen der Referenznaht. Auffällig ist, dass das Lot beidseitig komplett benetzt und angebonden hat, sich im Wurzelbereich allerdings eine Unterwölbung und damit eine geringe Verbindungsbreite ausprägt. Die metallografische Ätzung auf den Lotwerkstoff zeigt einen ausgeprägten feinkörnigen Bereich, der dem Ausgangszustand des Lotwerkstoffes entspricht. Der Draht wurde demnach nicht vollständig aufgeschmolzen. Die hohe Viskosität im Wurzelbereich sorgt dafür, dass die Naht nicht weiter in den Bördelstoß absinken kann. Trotz der vollständigen Anbindung kann dieser Parameter daher nicht empfohlen werden. Die besten Ergebnisse für eine Auslenkung von 4,4 mm lieferten die Untersuchungen mit einer Laserleistung von 3,6 kW.

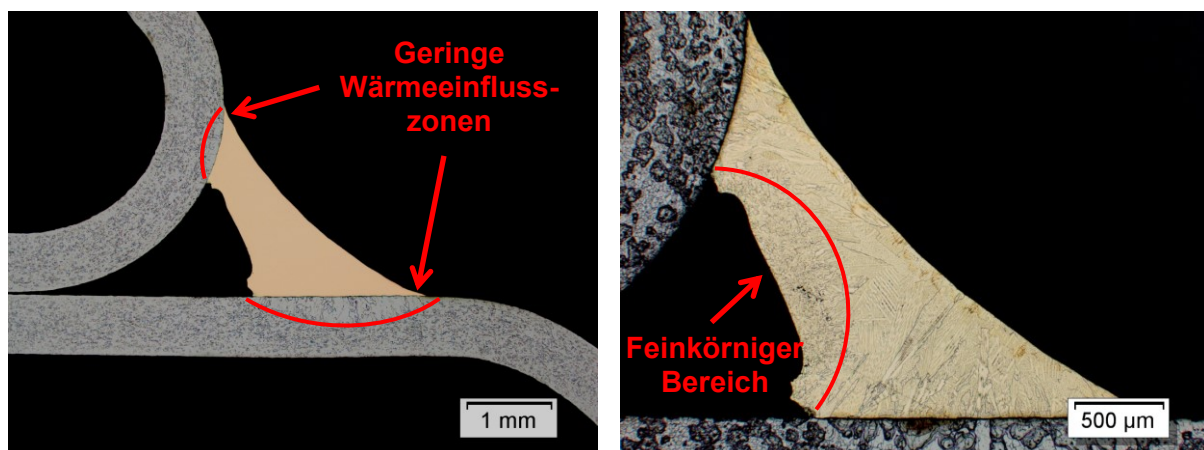


Abbildung 5.15 Analyse bei einer Laserleistung $P_L = 2,8$ kW; $v_R = 3$ m/min; $v_{Dr} = 3,2$ m/min; $\alpha = 0^\circ$; $\beta = 1^\circ$; $A_{ges} = 4,4$ mm; $f = 200$ Hz

Weiterhin wurde durch die metallografische Analyse ein Riss bei einer Laserleistung von 3,2 kW festgestellt. Der Riss trat auf, obwohl bei geringerem Energieeintrag im Vergleich zur Referenznaht ($P_L = 3,6$ kW) die Grobkornzone im Grundwerkstoff deutlich reduziert werden konnte. Derartige Risse können also auch bei geringerer Laserleistung auftreten. Der detektierte Riss war sehr fein (im Mikrometerbereich) und im Grundwerkstoff relativ mittig zur Nahthöhe bzw. Verbindungsbreite auf der Dachseite ausgeprägt (Abbildung 5.16, links).

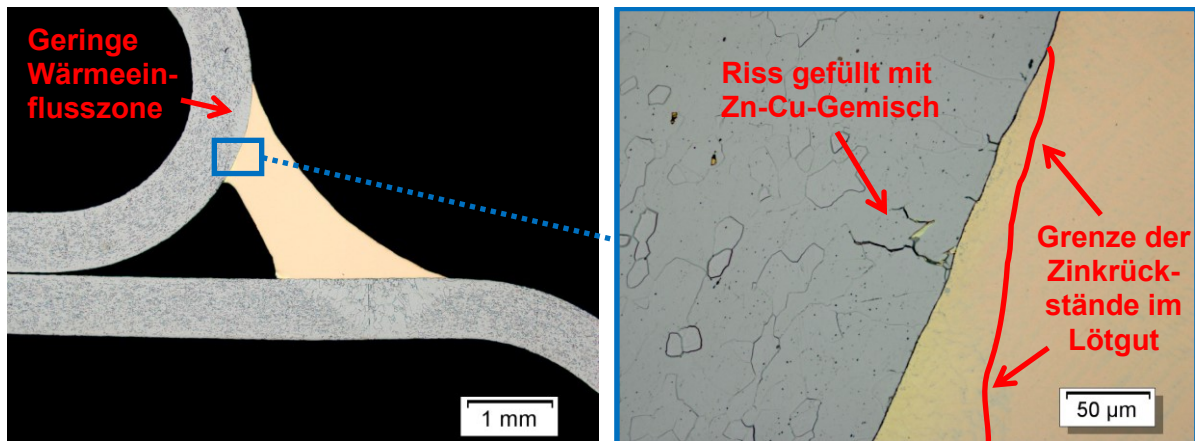


Abbildung 5.16 Analyse bei einer Laserleistung $P_L = 3,2 \text{ kW}$; $v_R = 3 \text{ m/min}$; $v_{Dr} = 3,2 \text{ m/min}$; $\alpha = 0^\circ$; $\beta = 1^\circ$; $A_{ges} = 4,4 \text{ mm}$; $f = 200 \text{ Hz}$

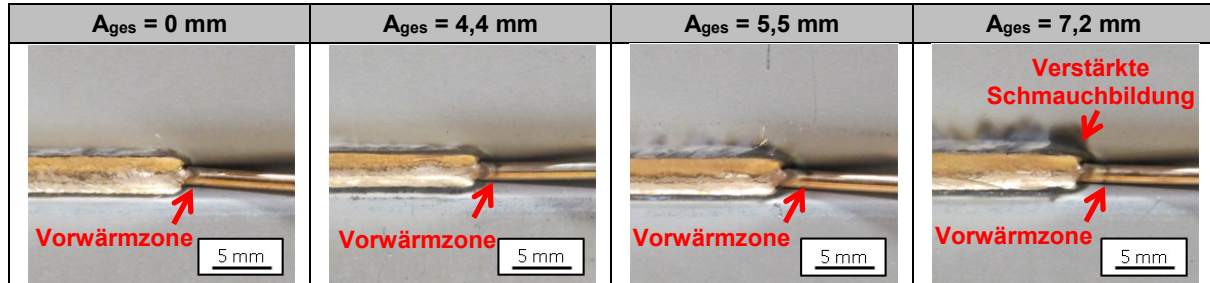
Durch die Detailanalyse im Lichtmikroskop (Abbildung 5.16, rechts) konnte ein teilweise gefüllter und zudem verzweigter Riss am Beginn der Grobkornzone im Grundwerkstoff detektiert werden. Ebenfalls zu erkennen ist eine gelbliche Färbung des Lötgutes bis weit in die Mitte der Lötnaht hinein. Diese Färbung spricht für Zinkrückstände im Lötgut. Dies bestätigten auch REM-Analysen an dieser Stelle. Das Zink konnte offensichtlich nicht ausreichend aus der Prozesszone entfernt werden und diffundiert in die Korngrenzen des Grundwerkstoffbleches hinein. Diese Nahtimperfection ist oberflächlich nicht detektierbar, kann aber ja nach Häufigkeit und Größe der Ausprägung die Festigkeit der Verbindung beeinflussen und ist unzulässig. Somit ist nach Ermitteln der Referenzparameter auch eine Untergrenze für das Laserstrahllöten zu empfehlen, bei der keine Zinkrückstände bzw. Zinkanhäufungen im Lötgut verbleiben.

5.3.4 Nahtqualität in Abhängigkeit der Strahlauslenkung

Durch den Scanspiegel in der Bearbeitungsoptik lässt sich der Laserstrahl je nach Justage in oder quer zur Vorschubrichtung auslenken. In dieser Arbeit wird ausschließlich die Variante des Scannens in Vorschubrichtung untersucht. Durch diese Auslenkung soll der Energieeintrag für eine effizientere Vorwärmung der Fügepartner sowie für eine gezielte Nachwärmung des Schmelzbades beeinflusst werden. In Tabelle 5.4 sind die Lötnahtausbildungen an der Schmelzbadfront für verschiedene Auslenkungen zu sehen. Diese Zustände wurden durch die Betätigung des „Notaus“-Schalters der Anlage während des Prozesses erzeugt. Die Bilder zeigen für die verschiedenen Strahlauslenkungen eine deutlich veränderte vorlaufende Zone der Zinkverdampfung sowie der Schmauchbildung neben der Naht. Eine signifikante Verschlechterung mit fest anhaftendem Schmauch tritt ab der doppelten Auslenkung ($A_{ges} = 7,2 \text{ mm}$) in Bezug zum statischen Strahl ($\varnothing = 3,6 \text{ mm}$) auf. Dieser festhaftende Schmauch bildet sich vor allem am SWR-Blech aus und muss aufgrund der verschlechterten Lackhaftung wieder entfernt werden. Er ist daher von vorn herein zu

vermeiden. Die Auslenkung von 7,2 mm wird daher als vorläufige obere Grenze der folgenden Untersuchungen zum Laserstrahlschmelzen festgelegt.

Tabelle 5.4 Schmauchbildung für verschiedene Auslenkungen A_{ges} ($P_L = 3,6 \text{ kW}$; $v_R = 3 \text{ m/min}$; $v_{Dr} = 3,2 \text{ m/min}$; $\alpha = 0^\circ$; $\beta = 1^\circ$; $f = 200 \text{ Hz}$)



Weiterhin sind bei kleineren Auslenkungen ($A_{ges} = 4,4 \text{ mm}$ und $A_{ges} = 5,5 \text{ mm}$) gegenüber der statischen Variante ($A_{ges} = 0 \text{ mm}$) eine vergrößerte Vorwärmzone auf dem Drahtende (Anlauffarben) sowie eine stärker ausgeprägte Zinkverdampfungszone zu erkennen. Zudem sind die Oberflächen der gescannten Nähte sehr glatt, die Benetzungslinien sehr gleichmäßig (keine Randkerbigkeit) und die Löt­nähte liegen etwas tiefer in der Fuge als bei der statischen Variante. Um den Einfluss der Auslenkung auf den Energieeintrag zu extrahieren, wurde die Laserleistung ausgehend von den Referenzprozessparametern ($P_L = 3,6 \text{ kW}$) konstant gehalten und lediglich die Amplitude des Scanspiegels variiert. Die Ergebnisse hinsichtlich Oberfläche und Schliff sind in Tabelle 5.5 dargestellt.

Tabelle 5.5 Vergleich der unterschiedlichen Nahtausbildungen für verschiedene Auslenkungen A_{ges} ($P_L = 3,6 \text{ kW}$; $v_R = 3 \text{ m/min}$; $v_{Dr} = 3,2 \text{ m/min}$; $\alpha = 0^\circ$; $\beta = 1^\circ$; $f = 200 \text{ Hz}$)

Parameter	Oberfläche	Querschliff
$A_{ges} = 4,4 \text{ mm}$		
$A_{ges} = 5,5 \text{ mm}$		

Mit einer Gesamtauslenkung von 4,4 mm konnten reproduzierbare Ergebnisse hinsichtlich der Oberflächenqualität erzielt werden. Die Nähte waren glatt (keine Schuppigkeit) und bildeten tangentielle Benetzungsübergänge zum Grundwerkstoff (gleichmäßige Benetzungslinien), ohne Schmauchrückstände neben der Naht. Die Anbindung des Lotes erfolgte bis in die Tiefe der Nahtwurzel. Bei größeren Auslenkungen ($A_{\text{ges}} = 5,5$ mm) lässt sich ebenfalls eine komplette Anbindung des Lotes erzielen. Allerdings bilden sich bei unveränderter Laserleistung aufgrund des lokal geringeren Energieeintrages (kleinere Intensität über größer gescannte Fläche) Randkerben aus. Zudem entsteht zunehmend Schmauch am Seitenwandrahmen und die Naht liegt höher im Bördelstoß. Dies führt zu einer reduzierten Verbindungsbreite. Dieser Trend nimmt zu größeren Auslenkungen hin zu (Abbildung 5.17).

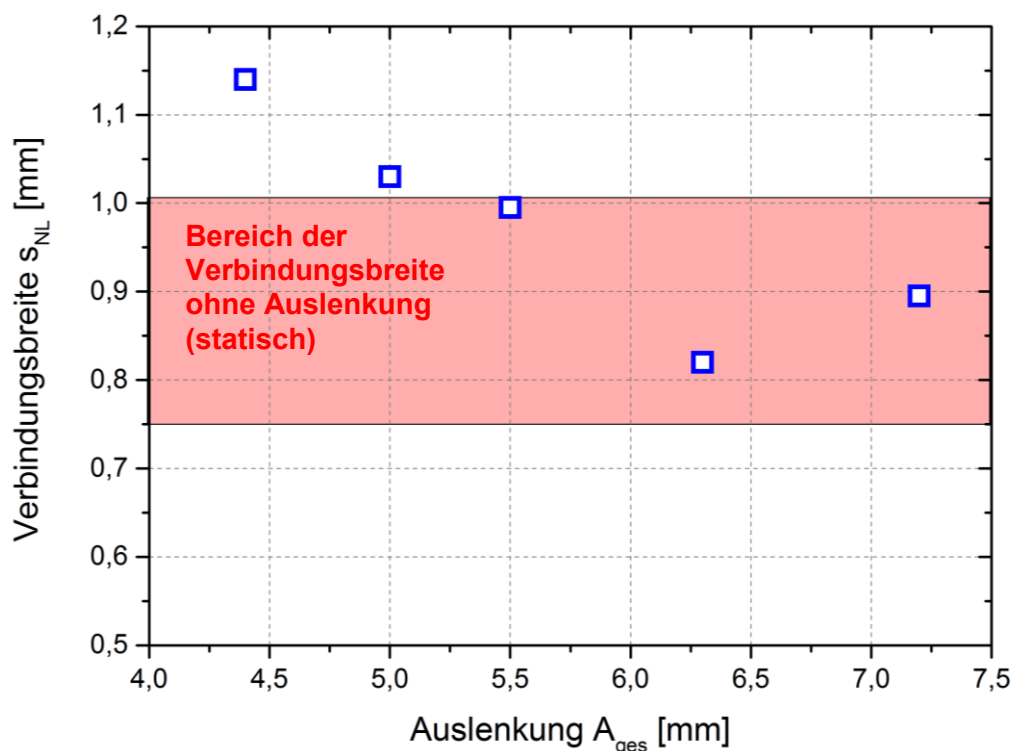


Abbildung 5.17 Verbindungsbreite in Abhängigkeit der Auslenkung bei konstanter Laserleistung ($P_L = 3,6$ kW; $v_R = 3$ m/min; $v_{Dr} = 3,2$ m/min; $\alpha = 0^\circ$; $\beta = 1^\circ$; $f = 200$ Hz)

Aus der Darstellung ist ersichtlich, dass für kleine Amplituden bei sonst gleichen Parametern eine signifikant höhere Verbindungsbreite (10 bis 20%) verglichen zum statischen Verfahren (rot gekennzeichnete Bereich) erzielt werden kann. Dies liegt zum einen an der besseren Vorwärmung des Drahtes und zum anderen an der weiter vorlaufenden Isotherme für die Zinkverdampfung. Dadurch erfolgt zusätzlich eine höhere Vorwärmung der Grundwerkstoffe. Bei größeren Auslenkungen lässt sich dieser Effekt ebenfalls beobachten, allerdings ist dies mit steigender Schmauchbildung (siehe Tabelle 5.4) verbunden. Weiterhin kommt es bei Auslenkungen über 6 mm zu einer verlängerten, „nicht schmelzflüssigen“ Drahtunterseite (siehe Abbildung 5.18). Diese feste bzw. hochviskose Drahtspitze stößt auf den Grund der

Fuge und führt somit zu einer ungleichmäßigen Drahtzuführung („Drahtruckeln“). Die ungleichmäßige Drahtzuführung wiederum kann zu einer Unterbrechung der zyklischen Benetzung und infolgedessen zu verstärkter Porenbildung an der Oberfläche führen.

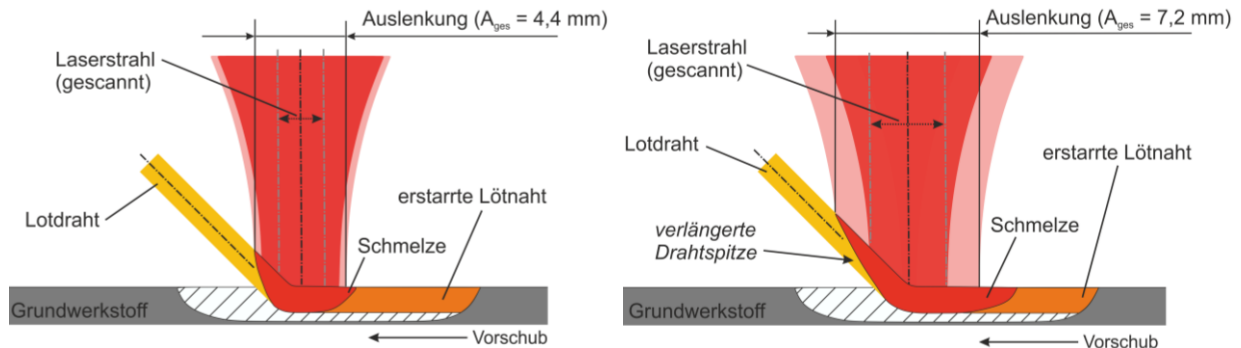


Abbildung 5.18 Schematische Abbildung der normalförmigen (links) und der verlängerten „kellenförmigen“ Drahtspitze (rechts)

Zusätzlich kann dieser feste „Restdraht“ die Schmelze in Vorschubrichtung „mitreißen“. Reicht die Oberflächenspannung des flüssigen Lötgutes nicht aus um das Schmelzbad geschlossen zu halten, kann sich je nach Dauer der Instabilität und in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeiten eine größere Fehlstelle ausbilden. Nach dem erneutem „Durchwärmen“ des Lotdrahtes schmilzt die Drahtspitze vollständig ab, eine homogene bzw. gleichmäßige Benetzung der Fügepartner kann erfolgen und der Prozess stabilisiert sich wieder. Die Ausbildung der Fehlstelle zeigt die HS-Sequenz in Abbildung 5.19, sowie die entstandene Nahtimperfection (Abbildung 5.19, unten rechts).

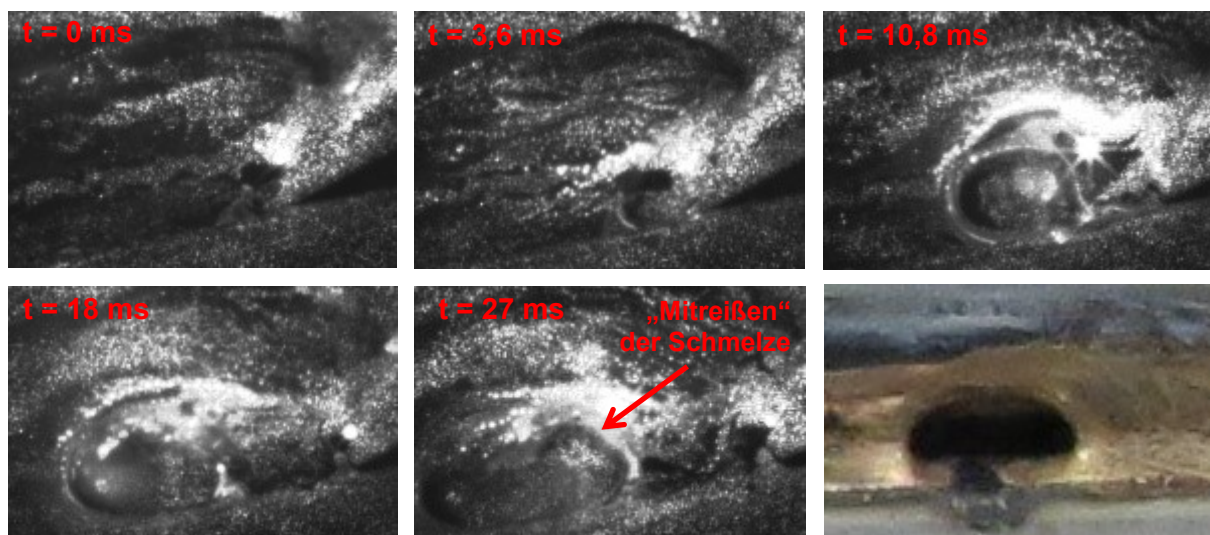


Abbildung 5.19 „Mitreißen“ der Schmelze (HS-Sequenz) und die Nahtimperfection (unten rechts)

Eine Erhöhung der Laserleistung führte zur Verminderung dieser Nahtimperfection. Die Fehlstelle trat dennoch sporadisch auf und die Erhöhung der Laserleistung resultierte in

zusätzlicher verstärkter Schmauchbildung neben der Lötnaht. Daher wurde als weitere Möglichkeit zur Reduzierung dieser Nahtimperfection die Modulation der Energieverteilung untersucht (siehe Kapitel 5.3.7).

Diese Fehler und/oder die verstärkte Porenbildung an der Oberfläche traten für Auslenkungen über 6 mm bei über 50% der Versuchsproben auf. Daher werden diese Auslenkungen bei den weiteren Untersuchungen nicht berücksichtigt.

5.3.5 Nahtqualität in Abhängigkeit der „Eintauchposition“ des Drahtes (Offset)

Da die Untersuchungen zur Nahtqualität bei unterschiedlichen Auslenkungen einen Einfluss auf die Vorwärmung sowie das Abschmelzverhalten des Drahtes zeigten, soll der Einfluss durch Verschiebung des Laserspots gezielt auch bei kleineren Auslenkungen untersucht werden. Die Verschiebung des Laserstrahles in Vorschubrichtung kann dabei über den Scanspiegel realisiert werden. Die Einstellungen sind softwareseitig über einen Offset-Schieberegler möglich. Die Abbildung 5.20 stellt die Verschiebung des Laserspots bzw. des gescannten Laserstrahles exemplarisch dar.

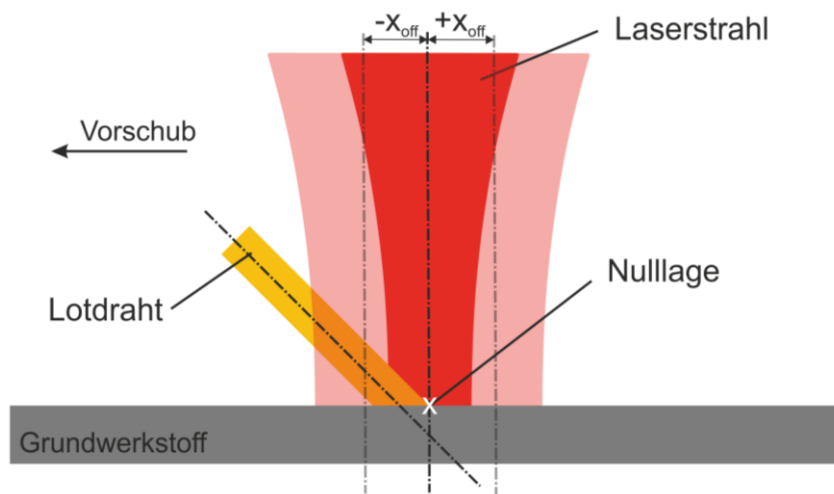


Abbildung 5.20 Schematische Abbildung der Verschiebung des Laserstrahls in Vorschubrichtung (Offset in x-Richtung)

Für eine Verschiebung des Laserstrahles gegenüber dem Draht wird von einer zuvor definierten „Nulllage“ ausgegangen. Diese Ausgangslage (Offset in $x = 0$) wird festgelegt durch das Eintauchen des Drahtes in der Mitte des Laserstrahles, was wiederum mit Hilfe des Pilotlasers (ohne Auslenkung) bestimmt wurde. Das Zentrum des Laserspots liegt dabei mittig auf der Drahtachse (y -Richtung).

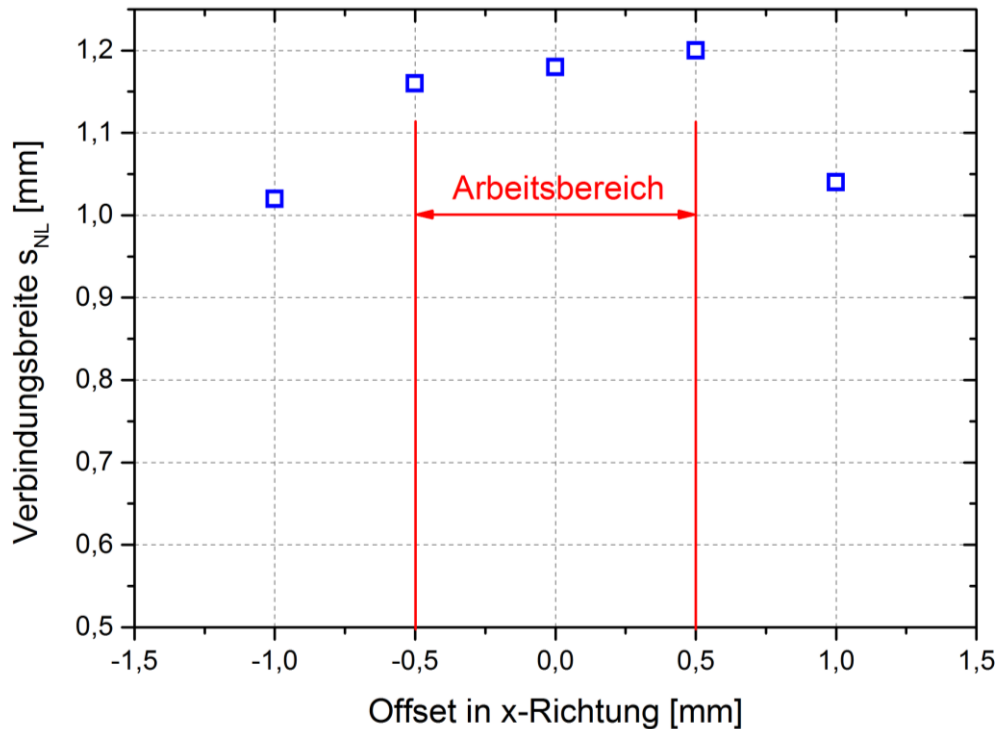





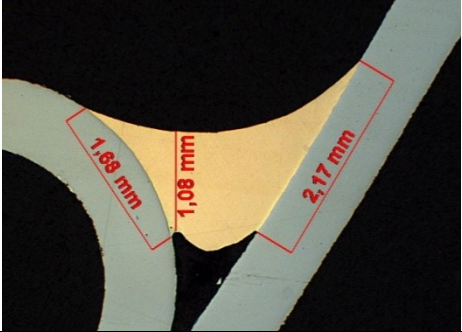
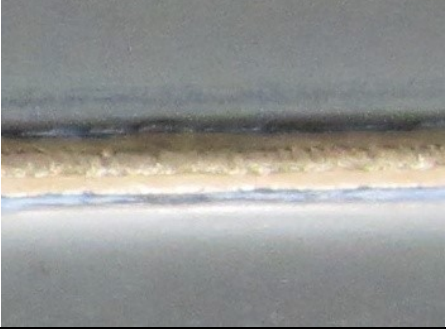

Abbildung 5.21 Verbindungsbreite in Abhängigkeit des Offset in Vorschubrichtung, ($P_L = 3,6$ kW; $v_R = 3$ m/min; $v_{Dr} = 3,2$ m/min; $\alpha = 0^\circ$; $\beta = 1^\circ$; $A_{ges} = 4,4$ mm; $f = 200$ Hz)

Aus dem inneren Befund, d.h. Bewertung der Verbindungsbreite Abbildung 5.21 konnte ein geeigneter Arbeitsbereich für die Verschiebung in x-Richtung ermittelt werden. Dieser Bereich beginnt 0,5 mm vor der Spotmitte (-). Der Draht könnte für eine hohe Verbindungsbreite ($> 1,1$ mm) auch hinter der Nulllage in die Prozesszone eintauchen (+). Für eine Erleichterung des „Einrichtbetriebes“ im Vorfeld der weiteren Versuche wird ein Offset von 0 mm festgelegt.

5.3.6 Nahtqualität in Abhängigkeit der Scanfrequenz

Neben der Auslenkung und dem Offset können bei Scanoptiken auch die Schwingfrequenzen des Spiegels in gewissen Bereichen variiert werden. Beim Lassy-System beträgt die maximale Scanfrequenz 200 Hz. Bei einer Frequenz von 0 Hz bleibt der Spiegel starr (statisch). Über die Scanner-Software ist sichergestellt, dass bis 200 Hz keine Schwingungseffekte in den Umlenkbereichen des Spiegels entstehen. Der Spiegel führt eine definierte Dreiecksschwingung aus, sodass eine konstante Intensitätsverteilung über den Scanbereich generiert wird. Aufbauend auf der Evaluierung der Referenznaht wurden Laserscanlötnähte für verschiedene Scanfrequenzen erzeugt (Tabelle 5.6).

Tabelle 5.6 Vergleich der unterschiedlichen Nahtausbildungen für verschiedene Frequenzen ($P_L = 3,6 \text{ kW}$; $v_R = 3 \text{ m/min}$; $v_{Dr} = 3,2 \text{ m/min}$; $\alpha = 0^\circ$; $\beta = 1^\circ$; $A_{ges} = 4,4 \text{ mm}$)

Parameter	Oberfläche	Querschliff
f = 20 Hz		
f = 100 Hz		
f = 200 Hz		

Schon anhand der Oberflächenbewertung lassen sich die signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Scanfrequenzen erkennen. Bei Scanfrequenzen unterhalb der Eigenfrequenzen des statischen Bereiches ($< 40 \text{ Hz}$, siehe Kapitel 5.3.2) bilden sich grobschuppige Nähte mit ungleichmäßigen Benetzungslinien und Randkerben aus. Dagegen werden die Nähte mit höheren Scanfrequenzen glatter, zeigen einen geringeren Zinkabbrand und gleichmäßigere Benetzungslinien. Die Versuche zeigen, dass die Verbindungsbreite mit zunehmender Frequenz steigt (siehe Abbildung 5.22).

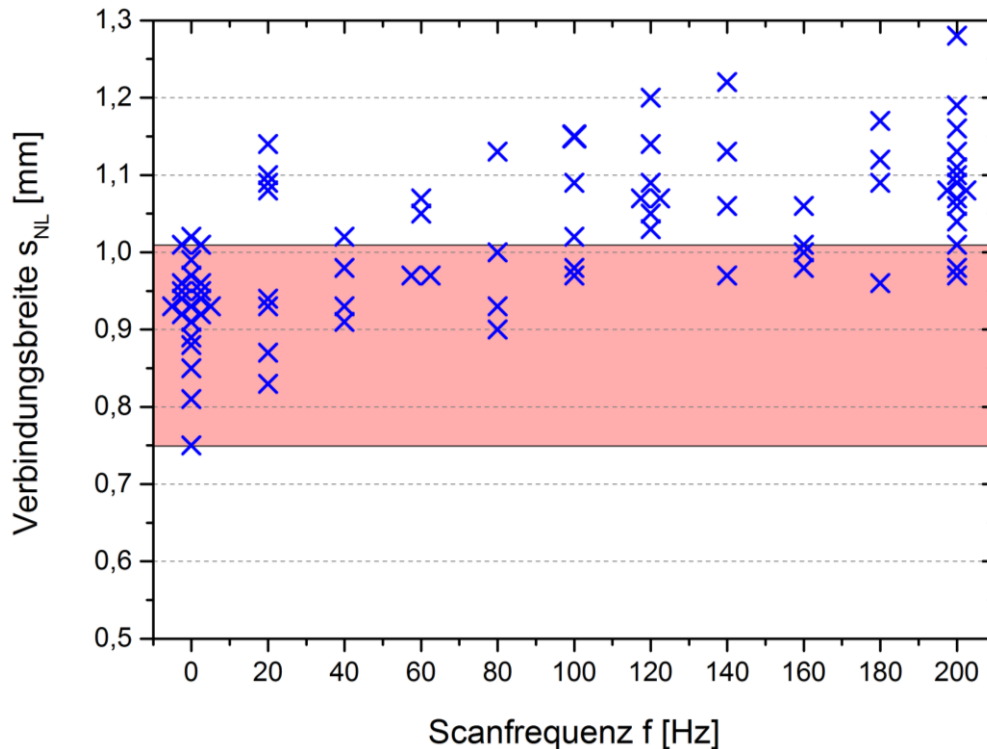


Abbildung 5.22 Verbindungsbreite in Abhängigkeit der Frequenz des Scanspiegels bei sonst konstanten Parametern für Kaltdraht ($P_L = 3,6$ kW; $v_R = 3$ m/min; $v_{Dr} = 3,2$ m/min; $\alpha = 0^\circ$; $\beta = 1^\circ$; $A_{ges} = 4,4$ mm)

Im Diagramm ist die Verbindungsbreite über die Frequenz des Scanspiegels aufgetragen. Der rot markierte Bereich stellt die maximal erreichbare Verbindungsbreite mit statischem Laserstrahl dar (siehe 0 Hz und Kapitel 4). Es wird deutlich, dass die mittlere Verbindungsbreite mit zunehmender Scanfrequenz ansteigt, obwohl Drahtvorschub und Laserleistung konstant gehalten wurden. Die Ursache ist eine verbesserte Benetzung der Grundwerkstoffe bis in die Tiefe des Bördelstoßes hinein (Lötnahtwurzel vollständig angebunden). Die Verbindungsbreite der einzelnen Versuchsproben unterliegt relativ großen Schwankungen. Allerdings ist das grundsätzliche Niveau der Verbindungsbreite ab 100 Hz wesentlich höher gegenüber kleineren Frequenzen und verglichen mit dem statischen Prozess (0 Hz). Dies ist im Hinblick auf einen Serienprozess als sehr positiv zu bewerten. Die Steigerung der Verbindungsbreite bei einer Scanfrequenz von 200 Hz gegenüber dem statischen Prozess beträgt im Mittel ca. 15 %, ohne Grundwerkstoffanschmelzung und bei gleichmäßigeren Oberflächen.

Dieser gleichmäßigere Lötprozess war ebenfalls in den HS-Aufnahmen zu detektieren. Die Dynamik der Schmelzbadfront ist bei höheren Scanfrequenzen deutlich geringer als bei niedrigen Frequenzen sowie gegenüber dem statischen Prozess. Weiterhin konnten signifikant kleinere Benetzungsfrequenzen der Schmelzbadfront auf dem Grundwerkstoffblech festgestellt werden. Da dieser Vorgang aus den Videos anhand einzelner Prozessbilder schwierig darzustellen ist, sollen die in Abbildung 5.23 dargestellten Pyrometersignale der Schmelzbadfront diesen Sachverhalt verdeutlichen.

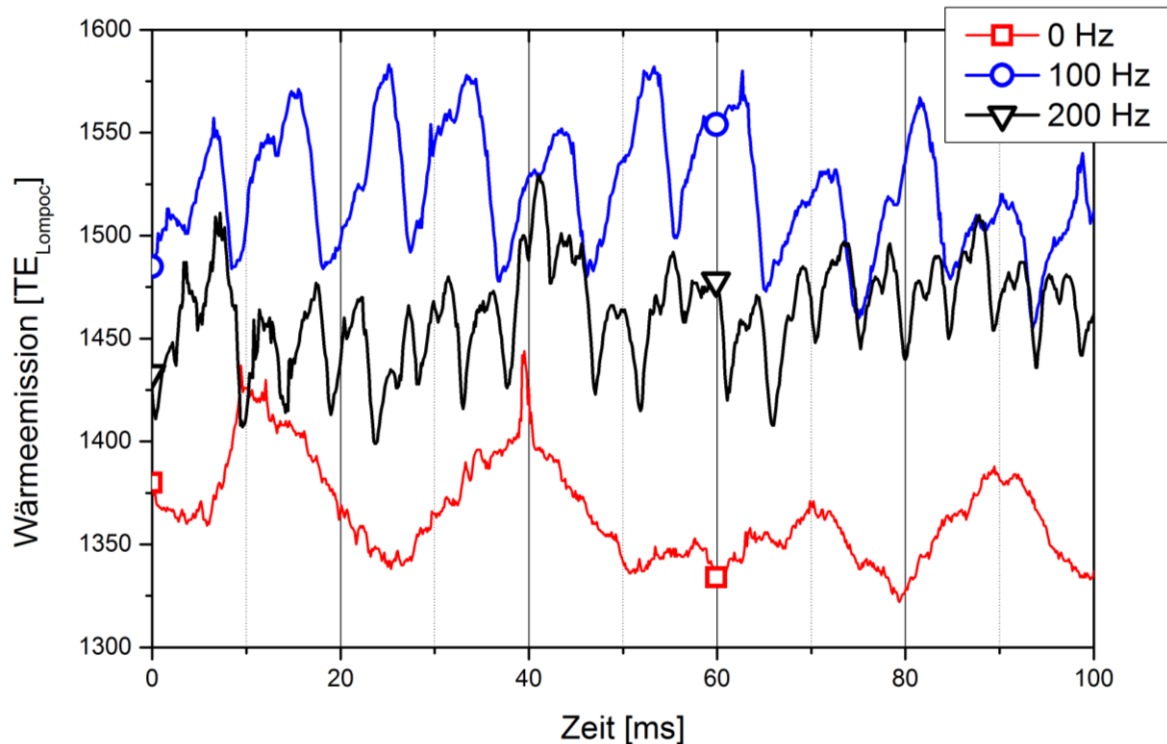


Abbildung 5.23 Frequenzen der Benetzungsfront des Schmelzbades bei verschiedenen Scanfrequenzen

Die Veränderungen der Periodizität der Temperatursignale an der Schmelzbadfront sind deutlich zu erkennen. Zudem sind auch die Scanfrequenzen in den Benetzungsfrequenzen der Schmelzbadfront sichtbar (bspw. 200 Hz). Dies wurde ergänzend mittels Simulationen nachgewiesen [Heit14]. Das „Scanning“ beim Laserstrahlscanlöten vergrößert demnach nicht nur die Vorwärmzone und somit den Energieeintrag in die Grundwerkstoffbleche sowie die Nachwärmzone des Schmelzbades, sondern steuert auch das vom Draht abgeschmolzene Volumen und damit den Benetzungszyklus. Die aufgrund von fehlendem flüssigen Drahtvolumen basierenden Störungen im Benetzungsprozess, welche zu Oberflächenporen führen, können so gezielt vermieden werden. Die Poren im Nahtvolumen müssen allerdings gesondert betrachtet werden. Diese zeigt Abbildung 5.24. Zur Vereinfachung und besseren Übersichtlichkeit sind die Bereiche dabei nicht in Dach und Seitenwandrahmen unterteilt worden. Aus den Mittelwerten ($n = 6$) der Porenanzahl pro Betrachtungszone, welche mittels CT-Analyse bestimmt wurden, geht hervor, dass über alle Scanfrequenzen Poren in allen Bereichen auftreten können. Allerdings ist die Porenanzahl unterhalb der Oberfläche (Zone 3 und 4) anteilig gering. Die meisten Poren traten bei diesen Untersuchungen im unteren Wurzelbereich (Zone 1) auf. Diese sind als unkritisch zu bewerten, solange die nachfolgenden Schleifvorgänge nicht zu viel Material abtragen. Weiterhin konnte aus den CT-Analysen entnommen werden, dass beim Laserstrahlscanlöten in keinem der Bereiche Anbindungsfehler oder größere Poren entstanden sind, was wiederum als sehr positiv zu bewerten ist.

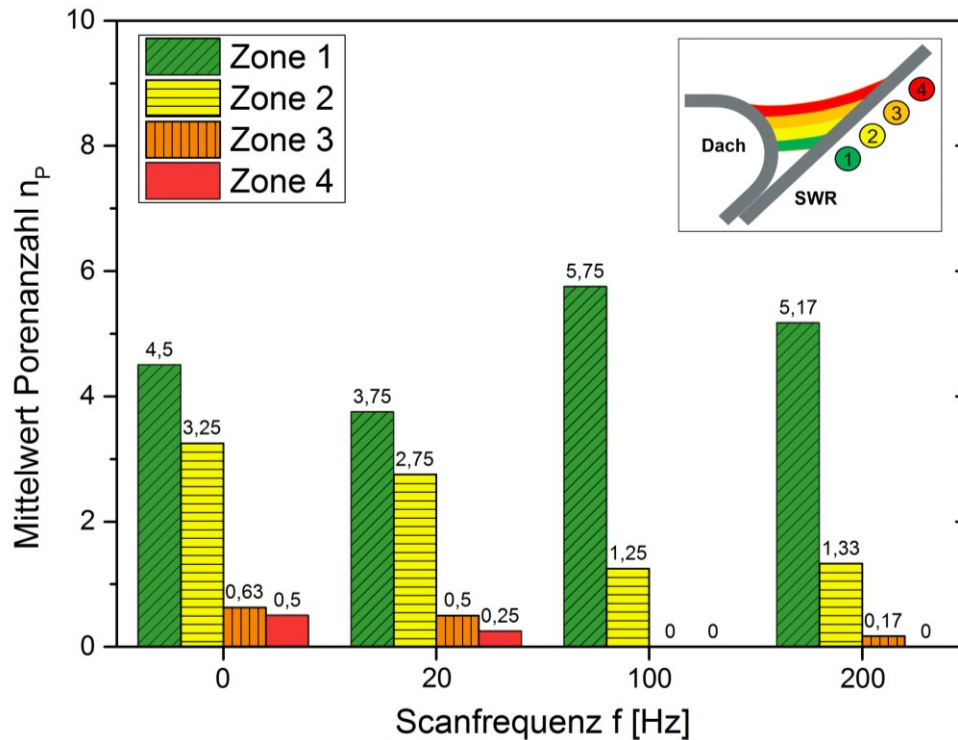


Abbildung 5.24 Mittelwerte der Porenanzahl über Scanfrequenz ($P_L = 3,6 \text{ kW}$; $v_R = 3 \text{ m/min}$; $v_{Dr} = 3,2 \text{ m/min}$; $\alpha = 0^\circ$; $\beta = 1^\circ$; $A_{ges} = 4,4 \text{ mm}$)

5.3.7 Nahtqualität in Abhängigkeit von der Modulation des Energieeintrages

Der gesamte Auslenkungsbereich des Scanspiegels kann mittels Schwingfunktionen (siehe Kapitel 5.2.2) in 7 Segmente unterteilt werden. Dadurch lassen sich unterschiedliche Modulationen der Intensitätsverteilung einstellen. Damit wird der Energieeintrag in der Prozesszone direkt beeinflusst. Das Prinzip beruht auf der Beschleunigungsvariation des Scanspiegels. Die Verweildauer des Laserstrahls im jeweiligen Segment wird so je nach Bedarf angepasst. Damit können bspw. die Intensitätsspitzen in den Umkehrpunkten der maximalen Auslenkung reduziert bzw. vermieden werden (siehe Abbildung 5.25).

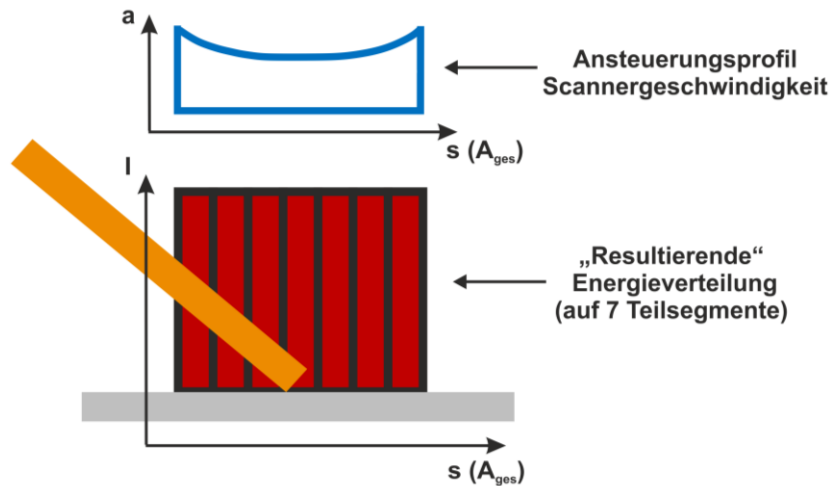


Abbildung 5.25 Prinzipskizze von der Modulation des Energieeintrages

Weiterhin lassen sich Schwingfunktionen für eine Veränderung des Energieeintrages in Vorschubrichtung definieren. So wurde in dieser Arbeit die Hauptenergie in Richtung Draht (Abbildung 5.26 bei B, E); auf das hintere Schmelzbad (C, F), in beide Richtungen (D) und in die Schmelzbadmitte (A) gelegt. Dadurch soll eine Stabilisierung des Prozesses im Allgemeinen sowie eine Verbesserung beim Abschmelzen des Drahtes (B, E), Ausgasen der Poren (C, F) und im Benetzungsverhalten erreicht werden. Speziell bei größeren Amplituden bzw. Auslenkungen (7,2 mm) stand die Vermeidung des „Abreißens“ der Schmelze (siehe Kapitel 5.3.4) im Vordergrund. Die Verringerung dieser Oberflächendefekte konnte erreicht werden, allerdings waren dennoch über 30 Prozent der Proben fehlerbehaftet.

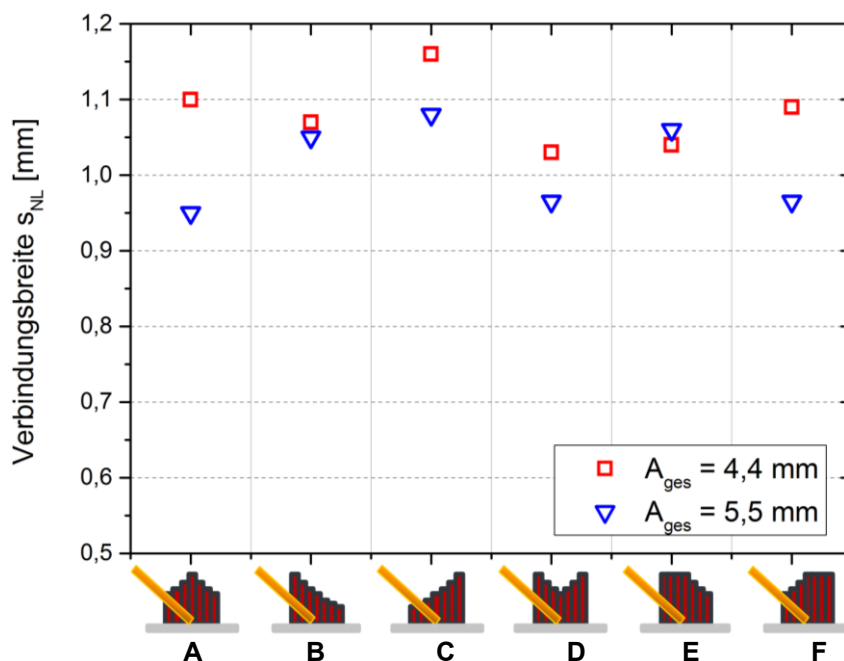


Abbildung 5.26 Verbindungsbreite für unterschiedliche Auslenkungen in Abhängigkeit des Energieeintrages bei sonst konstanten Parametern ($P_L = 3,6 \text{ kW}$; $v_R = 3 \text{ m/min}$; $v_{Dr} = 3,2 \text{ m/min}$; $\alpha = 0^\circ$; $\beta = 1^\circ$; $f = 200 \text{ Hz}$)

Abbildung 5.26 zeigt die Auswertung für die Verbindungsbreite über die verschiedenen Energieeinträge für kleine (4,4 mm) und mittlere Auslenkungen (5,5 mm). Die weiteren Parameter sind ebenfalls der Abbildung zu entnehmen. Für die Auslenkungen von 4,4 mm konnte keine Verbesserung der Verbindungsbreite gegenüber den Ergebnissen in zuvor geschilderten Kapiteln erreicht werden. Lediglich bei dem Hauptenergieeintrag im hinteren Schmelzbad (Variante C) war die Verbindungsbreite etwas höher, aber dennoch im Bereich des durchschnittlichen Wertes für eine Scanfrequenz von 200 Hz (siehe Kapitel 5.3.6). Bei 5,5 mm Auslenkung schwanken die Mittelwerte der Verbindungsbreite deutlich stärker. Allerdings lässt sich für beide Auslenkungen keine bevorzugte Zone für den Energieeintrag in Bezug auf die Verbindungsbreite ableiten. Nach Sichtprüfung wurde zusätzlich gegenüber den kleineren Amplituden eine erhöhte Randkerbigkeit festgestellt.

Festzuhalten bleibt, dass bei diesen Auslenkungen kein signifikanter Einfluss der Modulation des Energieeintrages ausgeprägt ist. Allerdings wird ein Potential für die Anwendung bei größeren Auslenkungen in Kombination mit der Energiemodulation für höhere Vorschubgeschwindigkeit gesehen. Zu beachten ist, dass sich bei höheren Auslenkungen die bestrahlten Bereiche ebenfalls vergrößern und damit die Anfälligkeit auf eine Offset-Verschiebung gegenüber dem Drahteinlaufpunkt in Vorschubrichtung steigt. Dies kann wiederum zu sehr stark variierenden Nahtergebnissen führen. Bei der Auslenkung von 4,4 mm konnte dagegen kein Einfluss des Energieeintrages auf die Nahtqualität festgestellt werden.

5.3.8 Nahtqualität in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit

In diesem Abschnitt wurde die Auswirkung des Laserstrahlscanlötens auf die Nahtqualität für verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten untersucht. Die erzielten Ergebnisse bei einer geringen Auslenkung von 4,4 mm und einem konstant gehaltenen Verhältnis von Draht- zu Robotervorschubgeschwindigkeit sind in den Oberflächen- und Schliffbildern in Tabelle 5.7 dargestellt.

Tabelle 5.7 Vergleich der unterschiedlichen Nahtausbildungen für verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten ($\alpha = 0^\circ$; $\beta = 1^\circ$; $A_{ges} = 4,4 \text{ mm}$; $f = 200 \text{ Hz}$)

Parameter	Oberfläche	Querschliff
$v_R = 3 \text{ m/min}$ $v_{Dr} = 3,2 \text{ m/min}$ $P_L = 3,6 \text{ kW}$		
$v_R = 3,5 \text{ m/min}$ $v_{Dr} = 3,8 \text{ m/min}$ $P_L = 4,2 \text{ kW}$		
$v_R = 4 \text{ m/min}$ $v_{Dr} = 4,3 \text{ m/min}$ $P_L = 4,8 \text{ kW}$		

Aus den Bildern geht hervor, dass für alle Vorschubgeschwindigkeiten gute Oberflächenqualitäten ohne starke Randkerbigkeit erzeugt werden konnten. Bei 4 m/min wurde eine oftmals unruhigere Benetzungslinie im Vergleich zu den anderen Geschwindigkeiten im Übergang zum Grundwerkstoff festgestellt. Dies bedeutet, dass durch die gesteigerte Dynamik bei höheren Vorschubgeschwindigkeiten und den damit verbundenen größeren Benetzungsfrequenzen (Abbildung 5.13) bei gleichem Drahtvolumenstrom die Erstarrung vor der gleichmäßigen Benetzung erfolgt. Dennoch wäre diese leichte Randkerbigkeit qualitätsseitig zulässig, da sie in einem nachfolgenden automatisierten Schleifvorgang entfernt werden kann. Anhand der Schliffbilder ist zu erkennen, dass die Anbindung der Naht bis in die Tiefe der Lotnahtwurzel erfolgt. Es konnten im Vergleich zum statischen Fall für alle Vorschubgeschwindigkeiten eine Erhöhung der Verbindungsbreite erzielt werden. Die Mittelwerte für die erreichten Verbindungsbreiten sind in Abbildung 5.27 dargestellt.

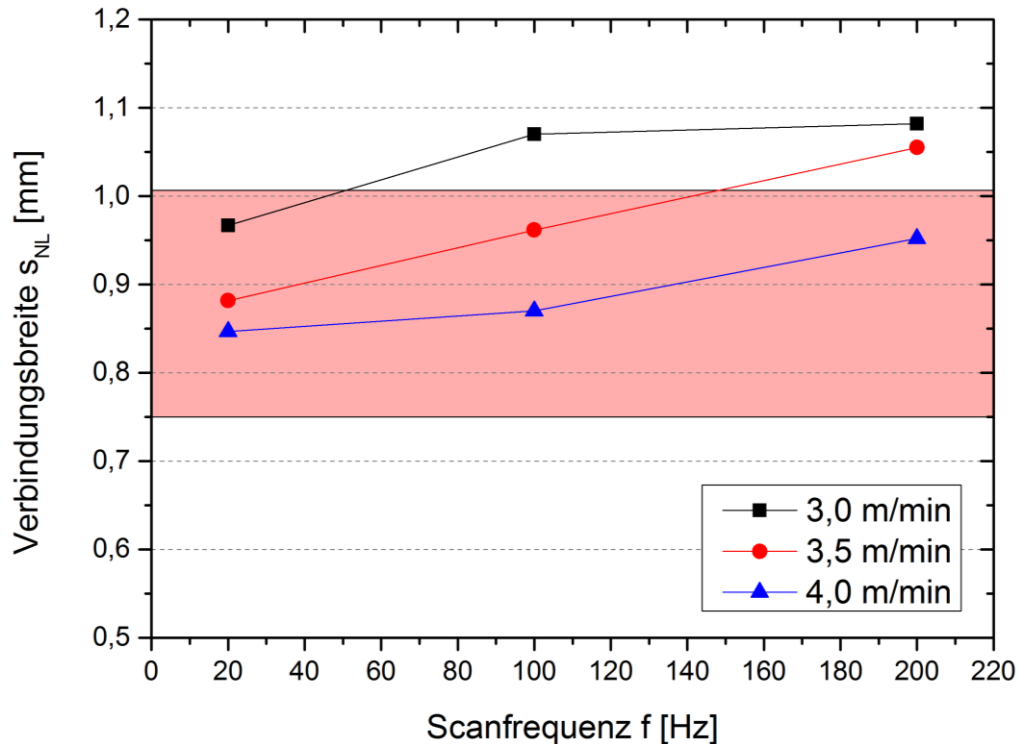


Abbildung 5.27 Verbindungsbreite in Abhängigkeit der Scanfrequenz für verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten ($\alpha = 0^\circ$; $\beta = 1^\circ$; $A_{ges} = 4,4$ mm; $f = 200$ Hz; weitere Parameter von Referenz ausgehend 1:1 skaliert siehe Tabelle 5.7)

Das Diagramm zeigt die Mittelwerte für die Verbindungsbreite bei gleicher Auslenkung aber unterschiedlichen Lötgeschwindigkeiten und Scanfrequenzen. Mit zunehmender Scanfrequenz konnten für alle Vorschubgeschwindigkeiten höhere Verbindungsbreiten erzielt werden. Diese sind deutlich größer im Vergleich zum statischen Prozess. Weiterhin zeigt sich, dass die Verbindungsbreite bei 4 m/min am niedrigsten ist, was mit der kürzeren Einwirkzeit des Strahles bei gleicher Auslenkung zusammenhängt. Dadurch kann die Benetzung der Grundwerkstoffe nicht so tief hinunter in die Fuge des Bördelstoßes erfolgen und es bildet sich eine „gestrecktere“ Lotbrücke aus. Bei gleichem Drahtvolumen verringert sich damit die Verbindungsbreite.

Zusätzlich wurde eine weitere Nahtimperfection (Abbildung 5.28) festgestellt, welche bisher weder in der Literatur noch in den vorangegangenen Experimenten aufgetreten ist. Diese Unstetigkeit trat vor allem bei den höheren Geschwindigkeiten und bei 20 Hz Scanfrequenz auf. Offenbar reicht die geringe Scanfrequenz nicht aus, um das Schmelzbad lang genug flüssig zu halten, so dass die Schrumpfspannung bei der Erstarrung zum benetzten Grundwerkstoff hin eine Nahtmittentrennung erzeugt. Diese ist von der Oberfläche her nicht sichtbar, da lediglich eine kleine Aufwölbung entsteht und die Nahtoberfläche geschlossen bleibt (links in Abbildung 5.28). Die Nahtimperfection kann sich in Vorschubrichtung über mehrere Millimeter erstrecken und so die Festigkeit der Verbindung herabsetzen. Zusätzlich kann diese Stelle durch nachfolgende Schleifprozesse freigelegt, aber aufgrund der geringen

lateralen Ausdehnung sehr schwer nachgearbeitet werden (bspw. durch Aufzinnen). Eine niedrige Scanfrequenz sollte daher besonders bei hohen Geschwindigkeiten vermieden werden.

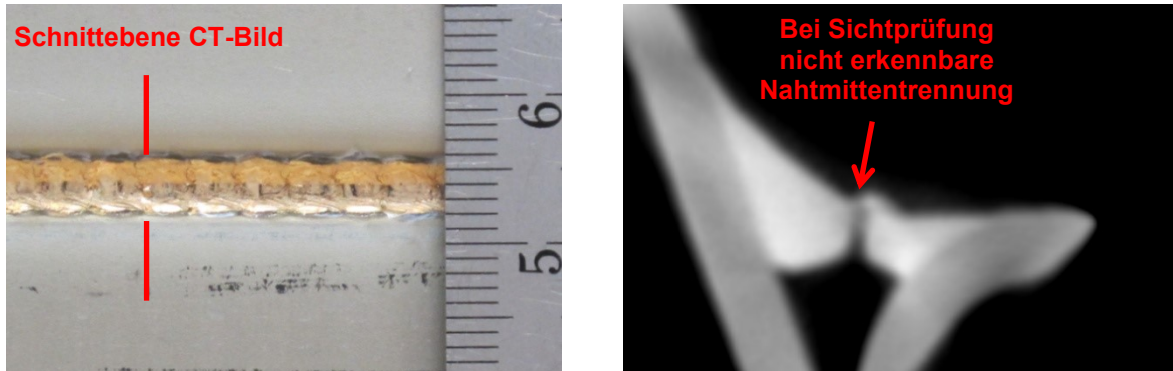


Abbildung 5.28 Auffälligkeit Nahtmittentrennung bei Sichtprüfung (links) und bei CT-Analyse (rechts); ($P_L = 4,8 \text{ kW}$; $v_R = 4 \text{ m/min}$; $v_{Dr} = 4,3 \text{ m/min}$; $\alpha = 0^\circ$; $\beta = 1^\circ$; $A_{ges} = 4,4 \text{ mm}$; $f = 20 \text{ Hz}$)

Festzuhalten bleibt, dass mit dem Scanansatz eine Steigerung der Verbindungsbreite gegenüber den statischen Ergebnissen auch bei höheren Vorschubgeschwindigkeiten ($> 3 \text{ m/min}$) mit Scanfrequenzen von 200 Hz erzielt werden konnte. Dies gelang zudem unter Einhaltung der Qualitätskriterien hinsichtlich glatter Oberflächengüten. Für die Bewertung des inneren Befundes wurden CT-Analysen durchgeführt (Abbildung 5.29).

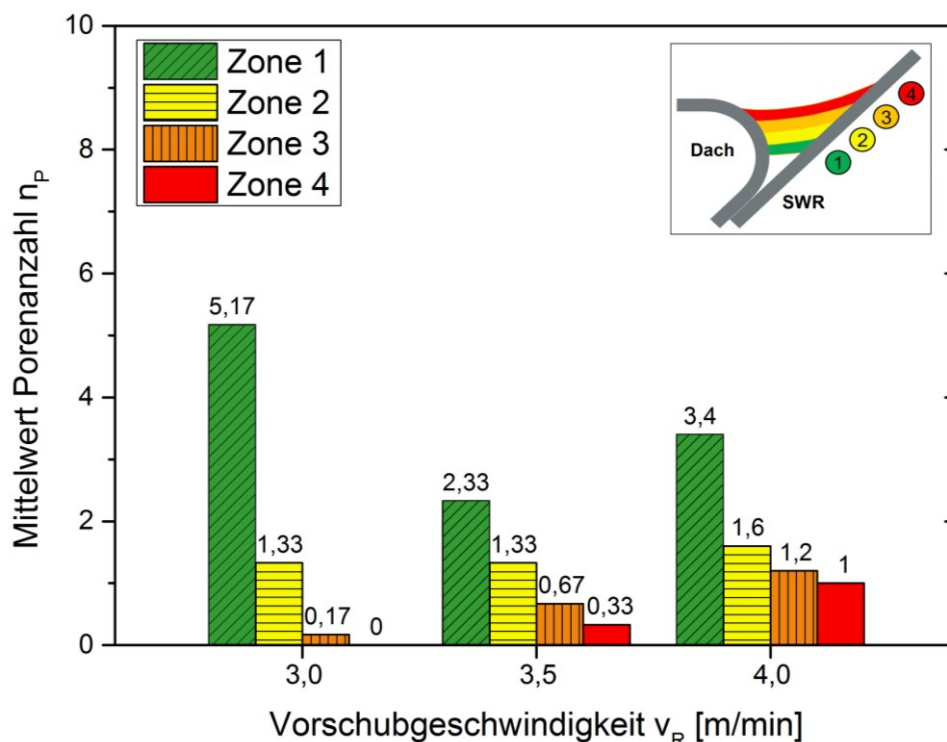


Abbildung 5.29 Porenanzahl für verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten ($\alpha = 0^\circ$; $\beta = 1^\circ$; $A_{ges} = 4,4 \text{ mm}$; $f = 200 \text{ Hz}$; weitere Parameter von Referenz ausgehend 1:1 skaliert siehe Tabelle 5.7

Die Analyse der Proben mittels CT-Aufnahmen, zeigte keine komplett „porenfreien“ Lötnahte. Allerdings findet im Mittel (Probenanzahl $n = 6$) eine Verschiebung der Häufigkeit der Poren zu den oberen Bereichen der Naht hin statt. Die Entstehungsursachen der einzelnen Poren konnten nicht voneinander getrennt werden. Eine mögliche Ursache für mehr Poren bei höheren Geschwindigkeiten ist die größere Dynamik beim Drahtabschmelz- sowie Benetzungsvorgang im oberflächennahen Bereich der Lötnaht. Aufgrund der kürzeren Erstarrungszeit könnten aber auch die im Lötgut verbleibenden Zinkausgasungen diese Poren in den kritischen Zonen verursachen.

5.4 Prozessüberwachung und -regelung beim Laserstrahlscanlöten

5.4.1 Prozessüberwachung (durch gezielte Datenerfassung)

Nach [Grim12] lassen sich beim Laserstrahlhartlöten unterschiedliche Emissionsniveaus bei Leistungsvariationen anhand der Intensität der vom Prozess detektierten Emissionsspektren erfassen. Nachfolgend sollen Untersuchungen zeigen, ob dies koaxial auch mit der eingesetzten Systemtechnik des Fraunhofer IWS möglich ist und diese somit für eine Prozessüberwachung dienen kann. Weiterhin sollen die Daten der durchgeführten Untersuchungen zeigen, welche Nahtimperfectionen bzw. Abweichungen vom „Idealprozess“ reproduzierbar detektiert werden können. Über das kamerabasierte Temperaturerfassungssystem lassen sich in Verbindung mit geeigneten Filtern von 740 nm orts aufgelöste Temperaturbilder aus dem Prozess erfassen (Abbildung 5.30).

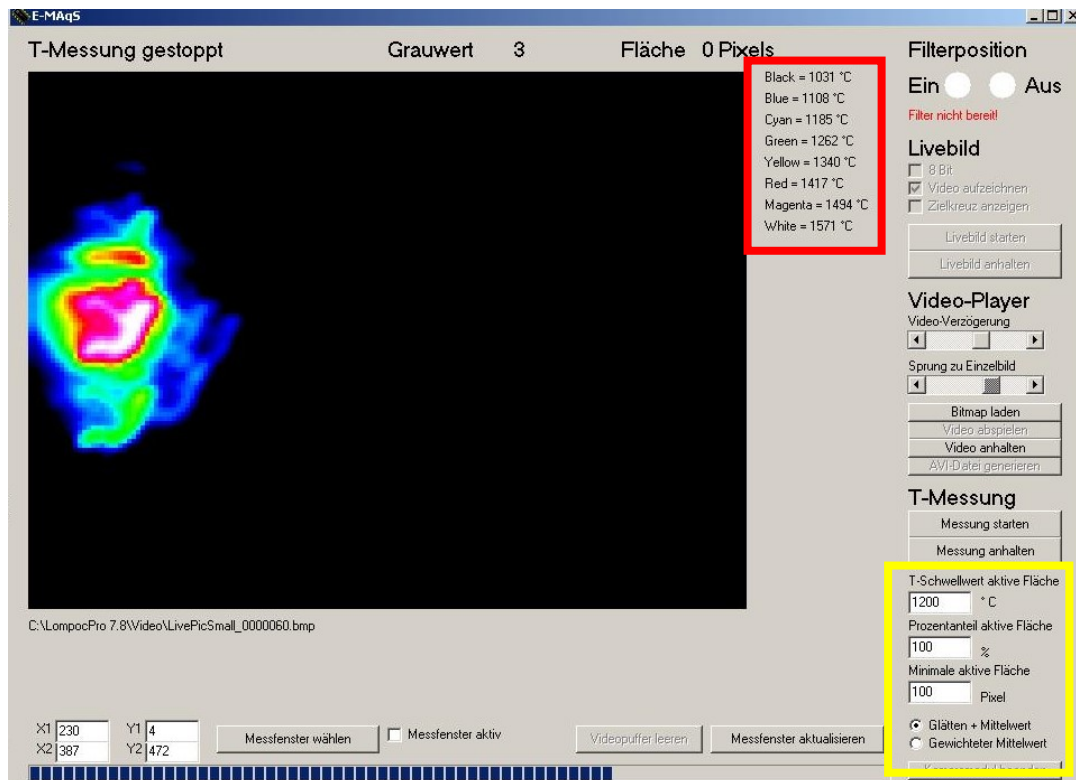


Abbildung 5.30 Exemplarisches Temperaturbild eines Laserstrahlötprozesses (E-MAqS-Aufnahme)

Die Temperaturen (rote Markierung) entsprechen dabei allerdings nicht den realen Prozesstemperaturen, da diese von den exakten Emissionskoeffizienten der Oberfläche abhängig sind. Diese sind sehr schwer zu bestimmen, da es sich einerseits um eine flüssige bzw. sich fortwährend bewegende Schmelzbadoberfläche handelt und andererseits unterschiedliche Materialien (Stahl, Zink, Kupfer) beteiligt sind. Dies wurde auch in [Grim12] beschrieben (siehe Abbildung 5.31). Erschwerend kommt hinzu, dass die zu erfassenden Emissions-signale durch die Geometrie des schrägen Bördelstoßes an der Dachnulfuge (verschiedene Winkel, Radien, Höhenversatz der Bleche) stark variieren. Die Einstellungen für die „aktive Detektionsfläche“ (gelber Rahmen) zur Laserleistungsregelung werden im Abschnitt 5.4.2 erläutert.

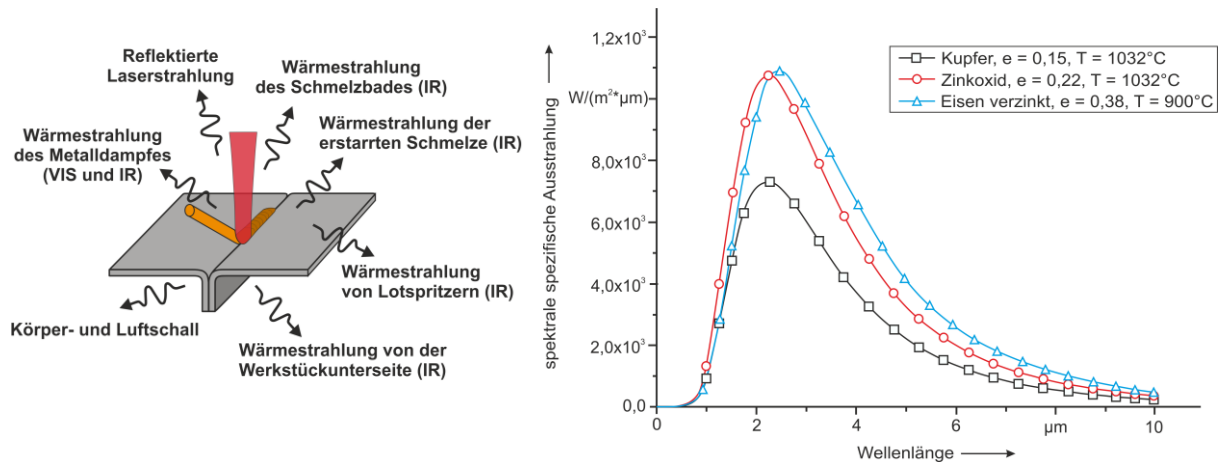


Abbildung 5.31 Auftretende Strahlungen beim Laserstrahllöten (links) und Emissionskoeffizienten unterschiedlicher Werkstoffe (rechts) [Grim12]

Aus den Temperaturbildern (Aufnahmefrequenz 200 Hz) lässt sich die jeweilige Maximaltemperatur oder die gemittelte Temperatur für jedes Einzelbild in einem vorher definierten Messfenster bestimmen. Diese Werte entsprechen abermals nicht den realen Temperaturen. Die Daten werden automatisch gespeichert und lassen sich anschließend als zeitlicher Signalverlauf darstellen. Beispielhaft zeigt Abbildung 5.32 eine derartige Datenkurve (schwarz) und die zugehörige Mittelwertkurve (rot). Der Anfangspeak bei ca. 8,2 s (Signal-Überschwinger) entsteht, da am Prozessbeginn das „Drahtabschmelzen“ unstetig einsetzt und sich dadurch eine Überhöhung des Temperaturfeldes ausbildet.

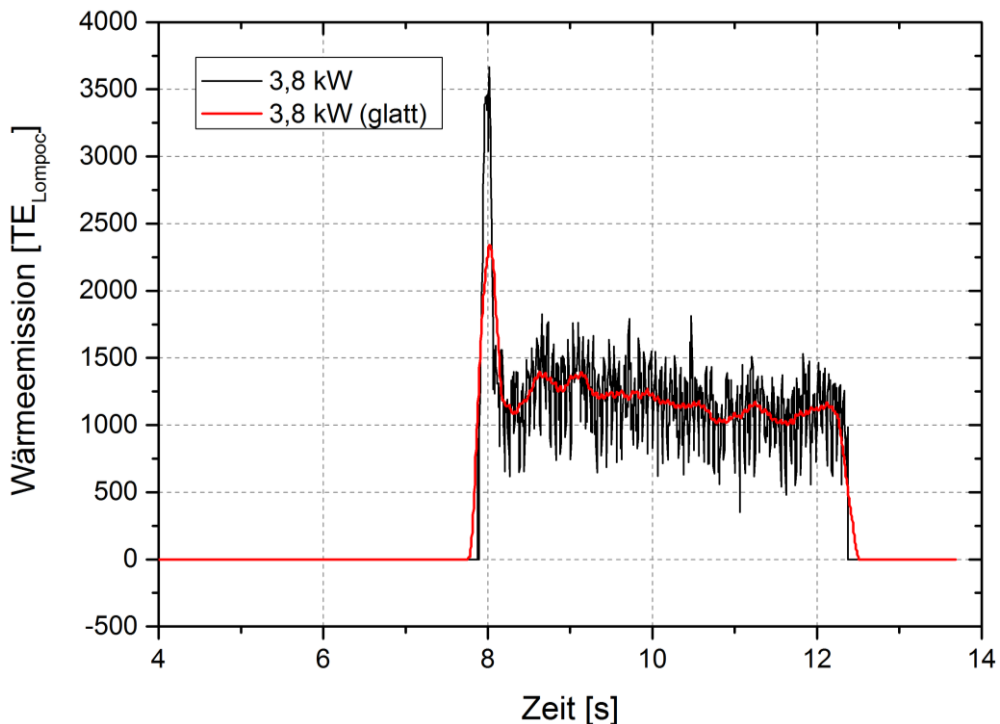


Abbildung 5.32 Exemplarische Datenkurven (generiert aus LompocPro-Daten)

Ausgehend von den Referenzparametern (3,6 kW; Kapitel 5.3.2) wurde gezielt die Laserleistung variiert, um die jeweiligen Temperatursignalverläufe zu erfassen. Aus den Mittelwertkurven in Abbildung 5.33 ist ersichtlich, dass eine Leistungsabweichung anhand der unterschiedlich ausgeprägten Temperaturniveaus detektiert werden kann. Beispielsweise könnte dies durch eine Schutzglasverschmutzung im Fertigungsprozess auftreten und die Nahtqualität entscheidend beeinflussen. Im oberen Bereich der Empfindlichkeit des Kamerasensors (vgl. Abbildung 5.5) werden die Abstände zwischen den Leistungsniveaus allerdings geringer, sodass zu Beginn der Datenerfassung für die jeweilige Applikation eine Belichtungszeit ausgehend von der Referenznaht gewählt werden sollte. Damit wird sichergestellt, dass auch bei größer werdenden Emissionen eine Detektion der Leistungsabweichungen möglich ist.

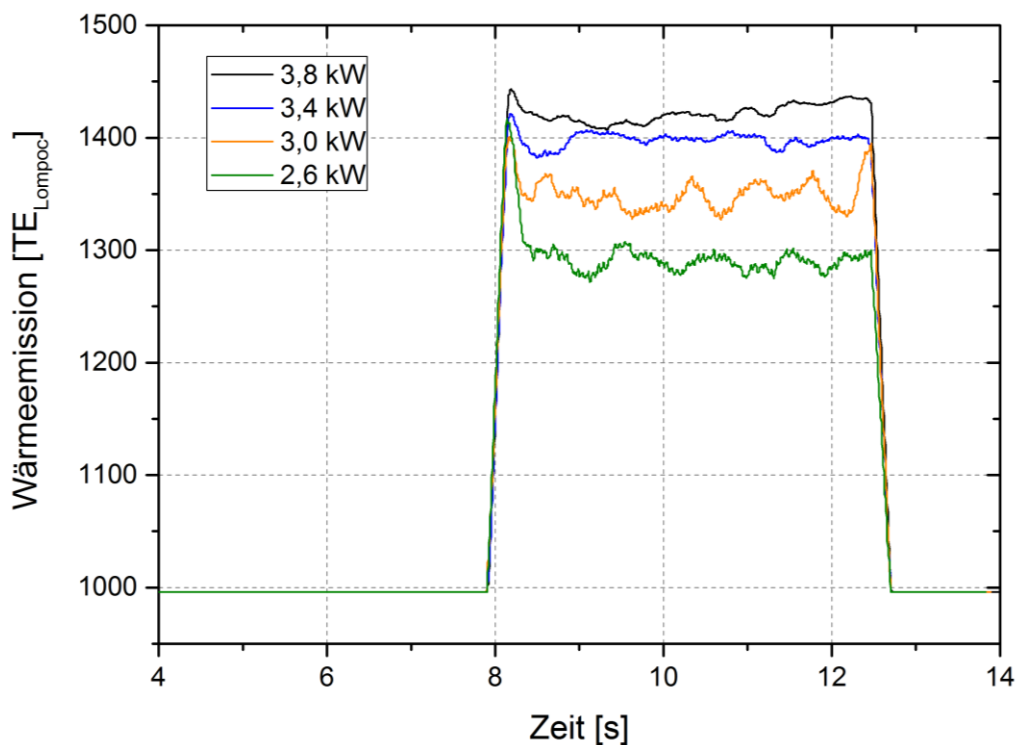


Abbildung 5.33 Vergleich der Datenkurven (Mittelwertkurven) unterschiedlicher Laserleistungen bei sonst konstanten Parametern ($v_R = 3$ m/min; $v_{Dr} = 3,2$ m/min; $\alpha = 0^\circ$; $\beta = 1^\circ$; $A_{ges} = 4,4$ mm; $f = 200$ Hz)

Nach [Grim12] können vor allem die laterale und vertikale Bahnabweichung durch Sensoren detektiert werden. Aus Abbildung 5.34 ist ersichtlich, dass dies auch mit dem in dieser Arbeit verwendeten Versuchsaufbau und dem integrierten kamerabasierten System (on-axis bzw. koaxial) möglich ist. Ausgehend vom Referenzprozess wurde eine Bahnabweichung von 2 mm in Vorschubrichtung (-x) und damit verbunden auch eine Verschiebung in z eingestellt, sodass das freie Drahtende wesentlich höher in das Schmelzbad hineinläuft und aufgrund des kürzeren Abstandes zum Seitenwandrahmen (SWR) zuerst auf dieser Seite benetzt. Weiterhin wird durch die Oberflächenspannung das nachfließende Material stärker auf die

SWR-Seite "gezogen" und somit kann es zur Entstehung von Benetzungsfehlern kommen. Der zugehörige zeitliche Verlauf des Temperatursignales zeigt deutliche Veränderungen im Bereich der Benetzungsfehler (siehe Teilbereich A und C).

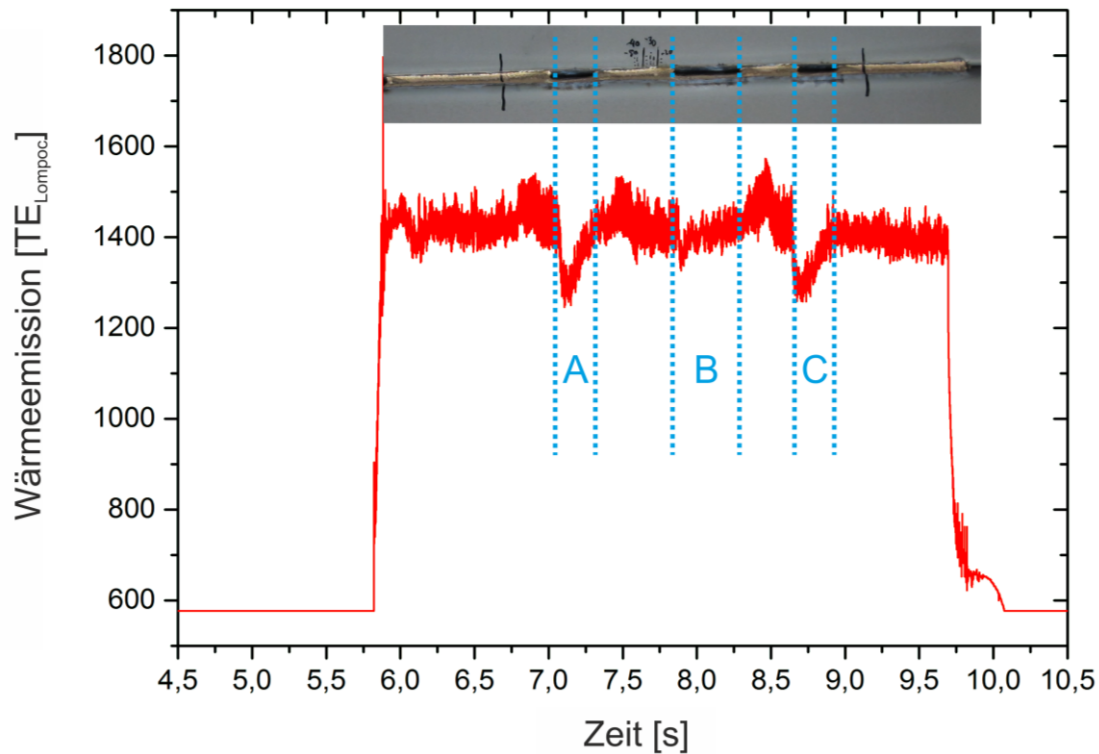


Abbildung 5.34 Probe mit 3 großen Benetzungsfehlern und zugehörigem zeitlichen Temperatursignal

Aus dem Signalverlauf ist ersichtlich, dass im Teilbereich B die Abweichung vom Temperaturniveau des benetzenden Prozesses gering ausfällt. Dies liegt daran, dass auch die nicht mit Lötgut benetzte Stahl- sowie die verzinkte Oberfläche im Messbereich Wärmestrahlung abgeben und diese gemittelt im Temperatursignal einbezogen wird. Das bedeutet eine Detektion der Benetzungsfehler ist möglich, sollte aber für eine robuste Prozessüberwachung während des Fertigungsprozesses durch weitere Auswerteverfahren unterstützt werden. Dafür eignen sich Grauwertanalysen des Temperaturfeldes (Abbildung 5.35, links) und daraus extrahierbare Schnittbilder (Abbildung 5.35, rechts).

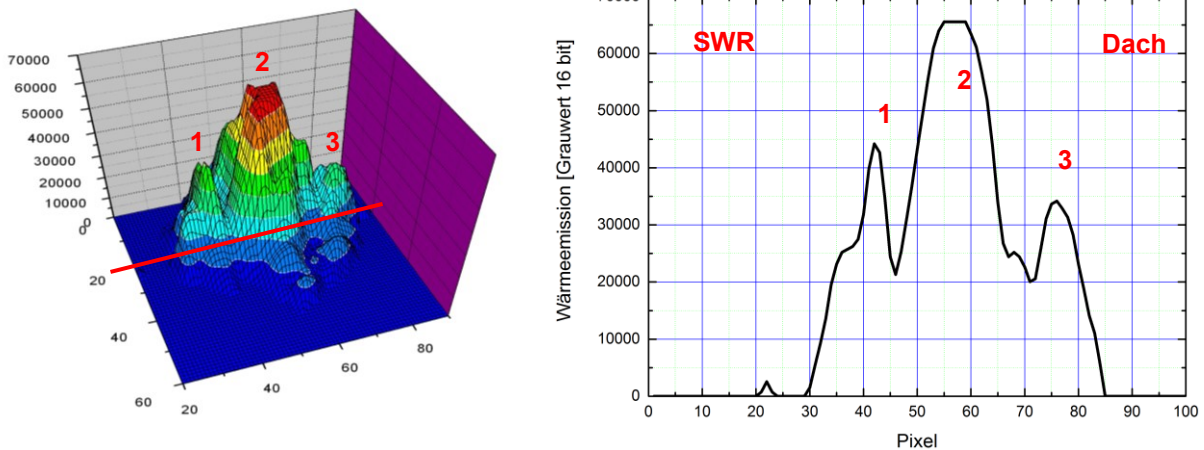


Abbildung 5.35 3D-Grauwertdarstellung des Temperaturfeldes vom Referenzprozess (links) und das Schnittprofil (rechts)

Bei der Analyse des Temperaturfeldes (3D-Verlauf) vom Referenzprozess fällt auf, dass 3 Temperaturbereiche existieren. Deutlicher wird dies im Schnittbild (rote Linie kennzeichnet die Lage der Schnittebene im 3D-Bild). Der größte Peak (2) bildet sich dabei in der Mitte aus und repräsentiert das Schmelzbad. Die zwei äußeren Peaks (1 und 3) werden durch die Benetzung des heißen Lötgutes an SWR und Dach hervorgerufen. Die beiden Minima dazwischen bilden sich aufgrund von Winkelabhängigkeiten der abgestrahlten Intensitäten der gewölbten Schmelzbadoberfläche im Übergang zum Grundwerkstoff aus. So erscheint bspw. der Übergang am Dachradius kälter. Anhand der Schnittdarstellungen lassen sich nun gravierende laterale Abweichungen detektieren. Dies verdeutlicht Abbildung 5.36.

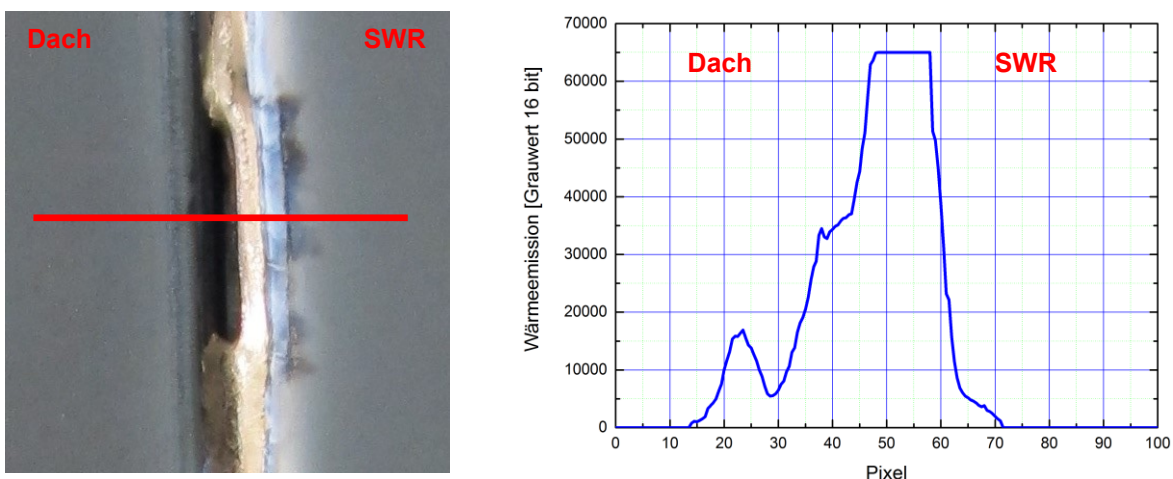


Abbildung 5.36 Vergleich der Oberfläche (links) mit zugehörigem Temperatursignal (Schnitt quer zur Vorschubrichtung, rechts) bei einseitiger Benetzung

Das Oberflächenbild dient der Veranschaulichung der Lötnahtqualität. In der Schnittdarstellung des Temperatursignales während des Prozesses ist eine deutliche Veränderung gegenüber dem Referenzprozess (vgl. Abbildung 5.35) zu erkennen. Es sind keine 3 lokalen Temperaturbereiche (Maxima) oder Minima ausgeprägt. Lediglich ein verschobenes

Temperaturmaximum lässt sich erkennen. Dieses Temperaturmaximum zeigt die Verschiebung des Prozesses auf die Seite des Seitenwandrahmens. Damit wurde die Möglichkeit einer Prozessüberwachung des Laserstrahlhartlötens mit dem in dieser Arbeit verwendeten koaxialen System am schrägen Bördelstoß demonstriert. Allerdings ist der Einfluss bspw. von veränderten Spanns Situationen vor allem an Realbauteilen weiterhin zu prüfen. Die Grenzen für die jeweiligen Prozesse müssen ohnehin für jede Applikation bzw. Geometrie separat ausgehend von den Referenzprozessen ermittelt werden.

5.4.2 Prozessregelung bei Geschwindigkeitsvariation

Neben der gezielten Prozessüberwachung (In-Prozess-Kontrolle) ist es bei immer komplexer werdenden Prozessen notwendig, kurze Regelstrecken für die Robustheit der Prozesse und damit auch für die Erfüllung der sehr hohen Qualitätsanforderungen, gerade bei großen Stückzahlen, zu entwickeln. Nachfolgend soll die im LASSY-System integrierte Möglichkeit der Laserleistungsregelung für das Laserstrahlscanlöten am schrägen Bördelstoß der Dachnulfuge untersucht werden. Möglich ist bei diesem System die Regelung der Laserleistung aufgrund der Auswertung des maximalen Soll-Temperatursignals (T_{\max}) oder mittels einer Soll-Flächengröße. Diese Flächengröße kann als "aktive Fläche" vor den Versuchen definiert werden. Abbildung 5.37 zeigt exemplarisch die Eingrenzung der aktiven Fläche. Dies geschieht über die Festlegung der Temperaturschwelle. Alle Pixel oberhalb dieser Temperaturschwelle werden danach zu einer Flächengröße („aktive Fläche“) zusammengefasst, welche wiederum konstant gehalten werden soll.

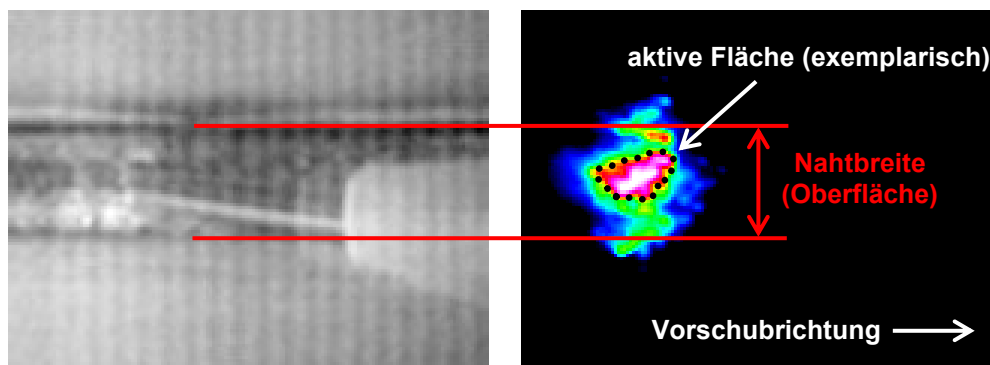


Abbildung 5.37 Maßstäblicher Vergleich Livebild (Referenznaht) und zugehöriges Thermografiebild im Prozess

Aus der Darstellung geht hervor, dass mit der Wahl geeigneter Flächenparameter auch ein "Konstanthalten" der Schmelzbadgröße möglich ist. Grundlage für die hinreichende Genauigkeit bzw. Reproduzierbarkeit der Messwerte ist allerdings die vorherige Kalibrierung der im Programm jeweils für die Spitzentemperatur- oder die Flächenregelung hinterlegten Kennlinien. Als Referenz für die Sollwerte dienen dabei die Prozesse, bei denen die best-

mögliche Nahtqualität (hier Referenzparameter für $A_{\text{ges}} = 4,4 \text{ mm}$, siehe Kapitel 5.3.4) erreicht wird.

Anhand von Geschwindigkeitsrampen lässt sich die Wirksamkeit der Laserleistungsregelung beim Laserstrahlscanlöten sehr gut nachweisen. Dies zeigten Ergebnisse an ebenen verzinkten Stahlblechen [Webe10]. Als Vergleich für die folgenden Untersuchungen wurde ausgehend von den Referenzparametern eine Laserlötnaht mit Konstantleistung erzeugt. Dies ist in Abbildung 5.38 dargestellt.

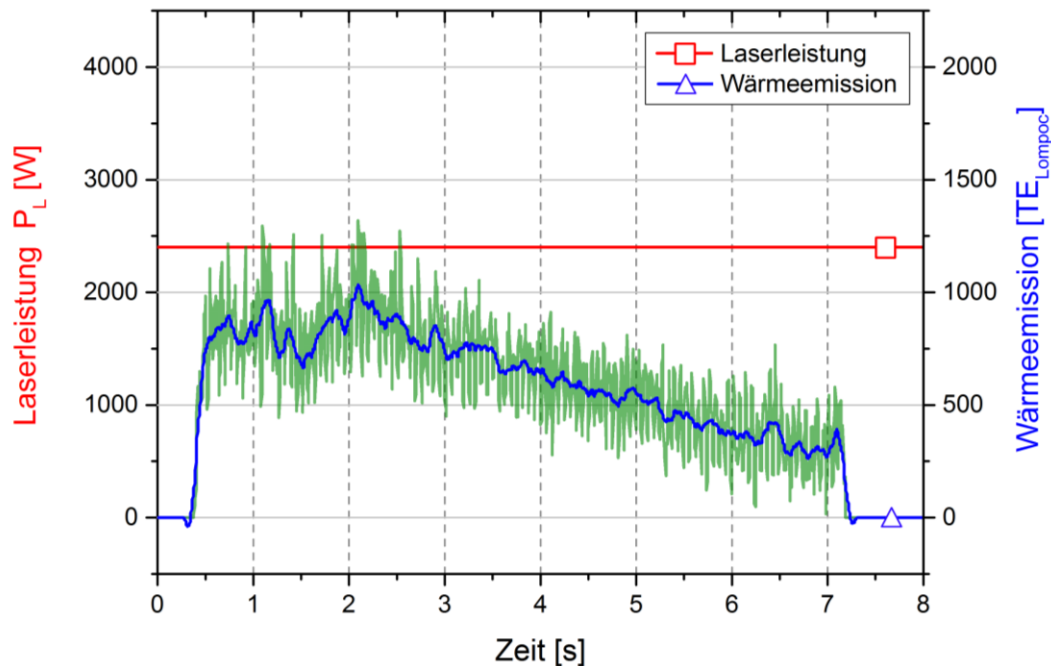


Abbildung 5.38 Signalverlauf bei einer Geschwindigkeitsrampe $v_R \approx v_{Dr}$ von 1 m/min auf 3 m/min bei konstanter Laserleistung ($P_L = 2,4 \text{ kW}$; $\alpha = 0^\circ$; $\beta = 1^\circ$; $A_{\text{ges}} = 0 \text{ mm}$; $f = 0 \text{ Hz}$)

Die Vorschubgeschwindigkeit des Roboters wurde dabei von 1 auf 3 m/min "gerampt". Die Drahtzufuhr wurde im gleichen Verhältnis gesteigert. Somit blieb das Verhältnis von Draht- zu Robotervorschubgeschwindigkeit über die gesamte Geschwindigkeitsrampe konstant. Die Erfassung des Messsignales für die Regelung erfolgte mit einer Frequenz von 200 Hz. Der Signalverlauf bei der Probe mit Konstantleistung zeigt einen deutlichen Trend des Temperatursignales über die Zeit. Die gemittelte Spitzentemperatur wird mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit und der damit verbundenen sinkenden Streckenenergie bei konstanter Laserleistung signifikant kleiner. Die Lötnahtqualität ist anhand der Sichtprüfung als n.i.O. zu bewerten. Weiterhin wurde die Laserleistungsregelung anhand einer vorher definierten Spitzentemperatur (T_{max}) untersucht. Aufgrund der sich ständig bewegenden „heißen“ Schmelzbadoberfläche kommt es zu einem sehr fluktuieren Temperatursignal (starke Hotspotbewegung und Größenänderung im Messfeld). Darauf reagiert die Regelung direkt und es stellt sich ein sehr rauschendes Regelsignal ein, welches für eine Auswertung hinsichtlich Nahtqualität ungeeignet ist.

Geeigneter ist dagegen die Regelung auf eine "aktive Fläche", bei der eine Anzahl an Pixel, welche den Temperaturschwellwert überschritten hat, mit Hilfe der Laserleistungsregelung konstant gehalten wird. Der große Vorteil dieser Flächenvariante ist, dass sich kleinere Schwankungen nicht gravierend auswirken und somit die Regelparameter dennoch sensitiv eingestellt werden können. Das bedeutet wiederum, dass die Regelung im Falle einer groben Abweichung vom idealen Referenzprozess direkt und ohne Verzögerung reagieren kann, sodass gerade bei höheren Geschwindigkeiten keine Fehlstellen entstehen. Ein derartiges Beispiel für einen Laserlötprozess mit Laserleistungsregelung auf eine aktive Fläche zeigt Abbildung 5.39.

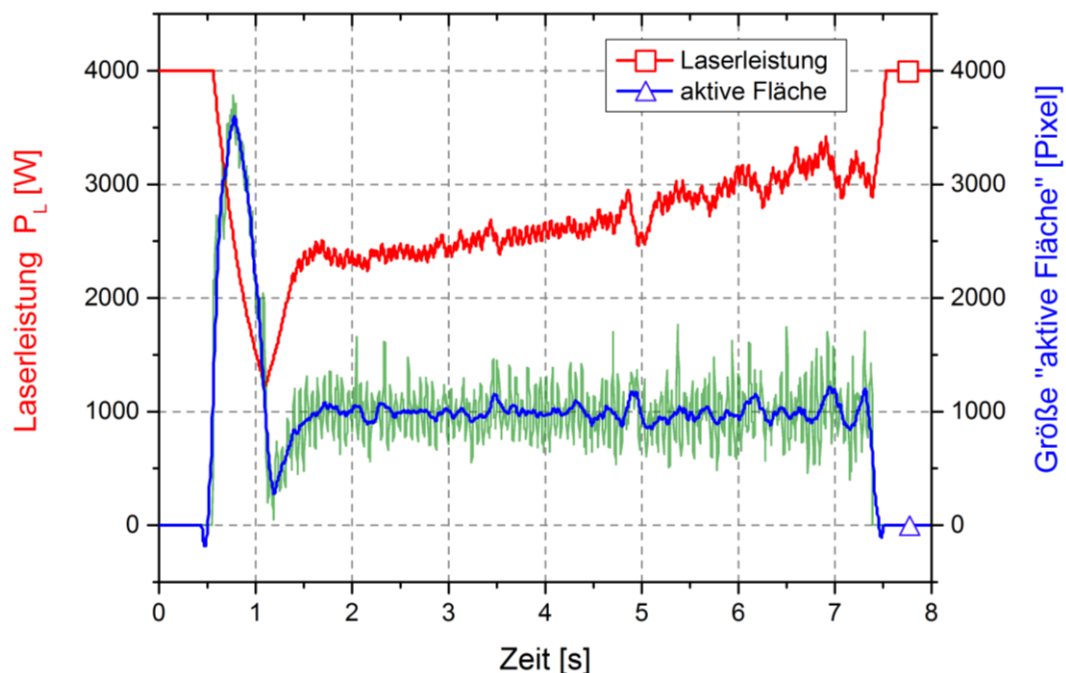


Abbildung 5.39 Signalverlauf bei einer Geschwindigkeitsrampe v_R von 1 m/min auf 3 m/min mit geregelter Prozess auf eine „aktive Fläche“ von 1000 ($\alpha = 0^\circ$; $\beta = 1^\circ$; $A_{ges} = 4,4$ mm; $f = 200$ Hz)

Die "aktive Fläche" wurde ausgehend vom Referenzprozess auf eine Pixelanzahl von 1000 mit einem Temperaturschwellwert von 1200 festgelegt. Die Erfassung der Temperaturdaten für die Laserleistungsregelung erfolgte erneut mit einer Frequenz von 200 Hz. Der Signalverlauf zeigt bei einer Geschwindigkeitsrampe von 1 auf 3 m/min ein sehr gutes Nachregeln der Laserleistung auf eine nahezu konstante Fläche von 1000. Lediglich im Anfangsbereich der Naht, wird durch das starke Überblenden des Temperaturfeldes beim Start des Lötvorganges und durch die Einschwingbewegung des Roboters eine Abweichung von der Referenznaht erzeugt (Laserleistung auf 1200 W reduziert, aktive Fläche fällt auf 300 Pixel). Allerdings bleibt festzuhalten, dass auch an dieser Stelle die Leistungsregelung selbst einwandfrei funktioniert. Nachfolgend soll die Verbesserung der Nahtqualität durch die Laserleistungsregelung anhand des inneren Befundes mittels Schliiffproben nachgewiesen werden.

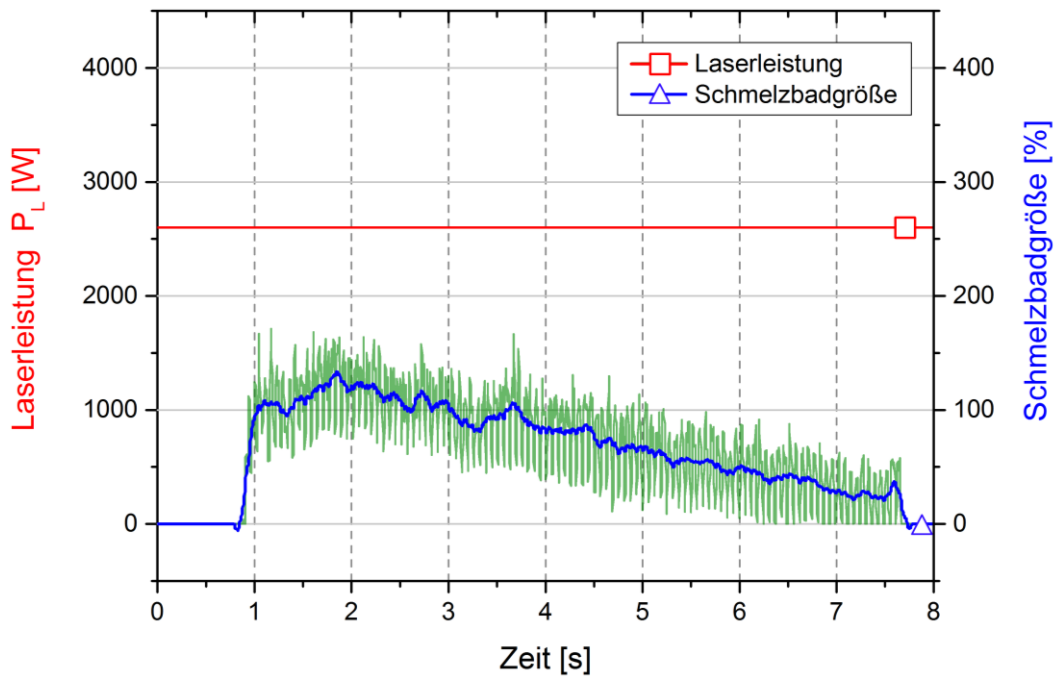


Abbildung 5.40 Signalverlauf bei einer Geschwindigkeitsrampe v_R von 1 m/min auf 3 m/min bei konstanter Laserleistung ($P_L = 2,6$ kW; $\alpha = 0^\circ$; $\beta = 1^\circ$; $A_{ges} = 4,4$ mm; $f = 200$ Hz)

Die Versuchsprobe (Abbildung 5.40) wurde analog der Einstellungen bezüglich der Laserleistungsregelung wie die vorhergehenden Untersuchungen und mittels einer Geschwindigkeitsrampe von 1 auf 3 m/min sowie mit einer Konstantleistung von 2,6 kW hergestellt. Der Signalverlauf wurde anhand der Referenzbilder normiert auf die Schmelzbadgröße, d.h. die Größe des Referenzschmelzbades beträgt 100%. Der Signalverlauf zeigt einen deutlichen Abfall der Schmelzbadgröße, d.h. die Größe des Temperaturfeldes an der Oberfläche sinkt mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit. Anhand der Schlifffbilder lässt sich nachweisen, dass sich der Energieeintrag in die Prozesszone verringert (Abbildung 5.41).

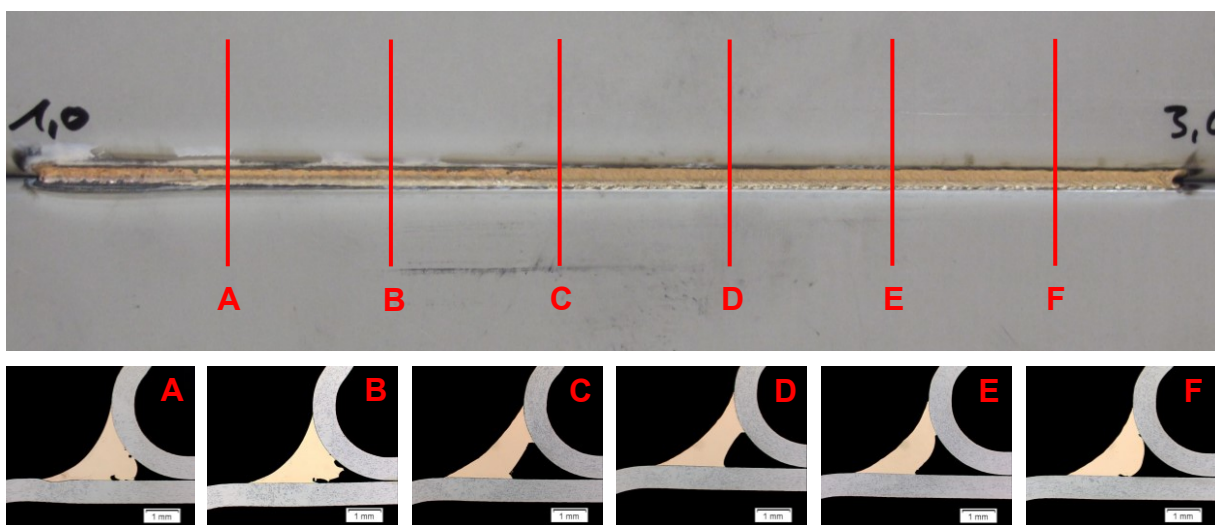


Abbildung 5.41 Oberflächenqualität der unregelmäßigen Probe mit zugehörigen Schlifffbildern

In dem Bild der Oberfläche ist zu erkennen, dass die Oberflächenqualität sich über die gesamte Lötnaht signifikant verändert. Die Entnahme der zugehörigen Schlißproben erfolgte aller 30 mm entlang der Laserlötnaht. Diese Schlißbilder wiederum zeigen den sich verändernden Querschnitt des angebondenen Lötgutes und damit die Änderung der Verbindungsbreite ("A-Maß"). Dabei ist der Prozess am Anfang deutlich zu "heiß" (Bereich A und B), d.h. der Prozesszone wird zu viel Energie zugeführt und die Naht bildet eine Form ähnlich der Heißdrahtvariante (vgl. Kapitel 4) aus. Zusätzlich erfolgt eine Anschmelzung des Grundwerkstoffes, überwiegend im Bereich des Seitenwandrahmens. Im mittleren Bereich der Naht entsteht eine Lotnahtbrücke (Bereich C und D), wie beim Kaltdrahtverfahren und die Lötnaht bindet über den gesamten Querschnitt an. Dieser Bereich mit einer Vorschubgeschwindigkeit von ca. 2 m/min zeigte mit der konstanten gemittelten Laserleistung von 2,6 kW die besten Ergebnisse bezüglich der Oberflächengüte bei noch ausreichender Verbindungsbreite. Am Ende der Naht (Bereich E und F) bei einer Geschwindigkeit von 3 m/min ist zu erkennen, dass die zur Verfügung stehende Energie nicht mehr ausreicht, um einerseits das Lötgut vollständig aufzuschmelzen und andererseits den Grundwerkstoff hinreichend vorzuwärmen. Der Grundwerkstoff wird nicht vollständig benetzt, d.h. die Naht bindet nicht mehr bis in die Tiefe des Bördelstoßes an. Dadurch wird die erforderliche Verbindungsbreite von 0,8 mm unterschritten. Ein Fehler dieser Art ist durch eine Sichtprüfung oder durch eine mehrere Stationen später folgende Oberflächenvermessung nicht verlässlich detektierbar, da der automatisierte Schleifprozess die Grobschuppigkeit der Nahtoberfläche größtenteils entfernt. Die Untersuchungen zur „geregelten Probe“ zeigen deutliche Unterschiede im Signalverlauf und in der Nahtausbildung.

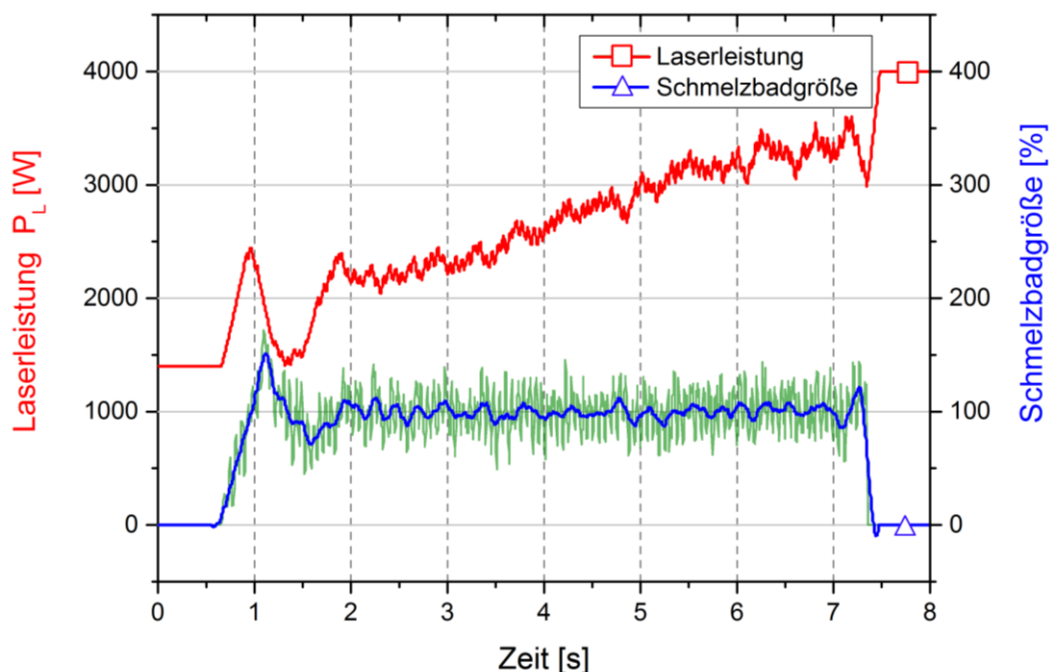


Abbildung 5.42 Signalverlauf bei einer Geschwindigkeitsrampe von 1 m/min auf 3 m/min mit Laserleistungsregelung auf 100% Schmelzbadgröße ($\alpha = 0^\circ$; $\beta = 1^\circ$; $A_{ges} = 4,4$ mm; $f = 200$ Hz)

In Abbildung 5.42 ist der zeitliche Signalverlauf der Laserleistung und der konstanten Schmelzbadfläche für eine Geschwindigkeitsrampe von 1 auf 3 m/min dargestellt. In der Laserleistungskurve (rot) ist die signifikante Nachregelung der Laserleistung erkennbar, um bei steigender Geschwindigkeit die Fläche konstant zu halten. Das "grüne" Signal zeigt den Ist-Wert der Schmelzbadgröße und die "blaue" Kurve den zugehörigen gemittelten Verlauf. Am Anfang und am Ende sind aufgrund des Einschwingverhaltens vom Prozess und damit auch von der Regelung die Abweichungen vom Soll-Wert (100%) am größten. Im restlichen Prozessverlauf lässt sich sehr gut auf eine konstante Schmelzbadgröße regeln. Dies bestätigen die Oberflächenaufnahme sowie die zugehörigen Schlifffbilder (Querschliffe) der Naht (siehe Abbildung 5.43).

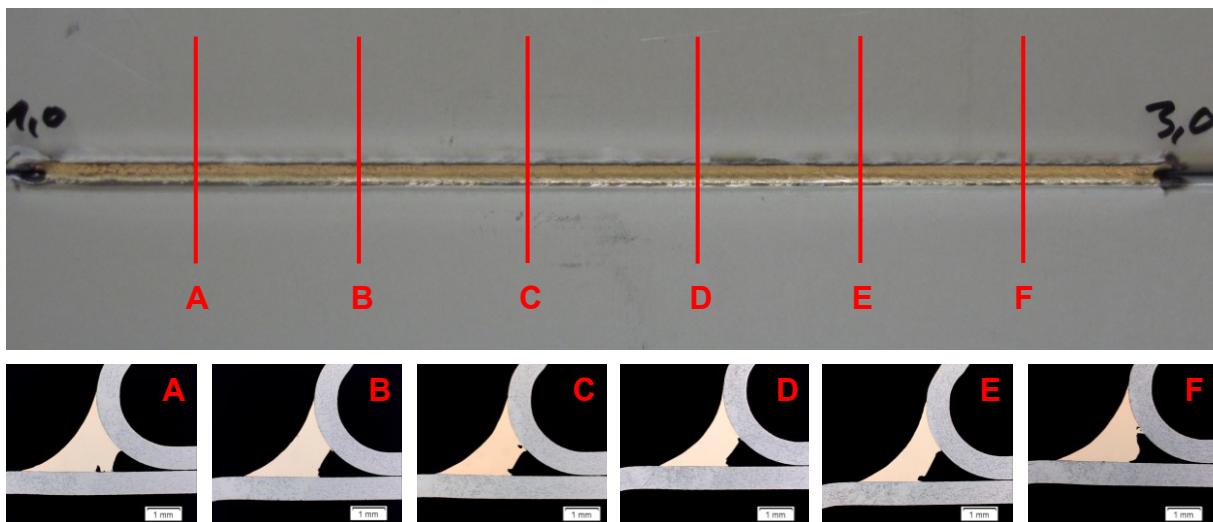


Abbildung 5.43 Oberflächenqualität der geregelten Probe mit zugehörigen Schlifffbildern

Der erste Teilbereich der Lötnaht (Anfang bis A) zeigt einen etwas zu heißen Verlauf, welcher auch an den Datensignalen erkennbar war. In diesem Bereich kam es zu einer "Einschwing"-Bewegung des Roboters bei der Beschleunigung (trotz fliegendem Start). Im Schnitt A ist zu sehen, dass der Grundwerkstoff nicht angeschmolzen wurde und das Lötgut die Fuge des Bördelstoßes sehr gut ausfüllt. In den weiteren Schlifffproben (Bereich B bis E) verändert sich der Nahtquerschnitt kaum. Dies ist auf den geregelten Prozess zurückzuführen. Im letzten Schlifffbild (F) ist eine leichte Einkerbung am Dach, welche zu einer kleinen Absenkung der Verbindungsbreite führt, zu erkennen. Abschließend sind die Daten der ausgemessenen Verbindungsbreite aus den Schlifffproben in Abbildung 5.44 zur besseren Veranschaulichung gegenüber gestellt. Es ist zu sehen, dass bei dem geregelten Prozess die Verbindungsbreite trotz leichter Einkerbung auf der Wurzelseite zu jeder Zeit die geforderte Mindestdicke von 0,8 mm übersteigt. Im Gegensatz dazu fällt die Verbindungsbreite beim unregelmäßigen Prozess deutlich unter diese Grenze ($s_{NL,min} = 0,52 \text{ mm}$) ab.

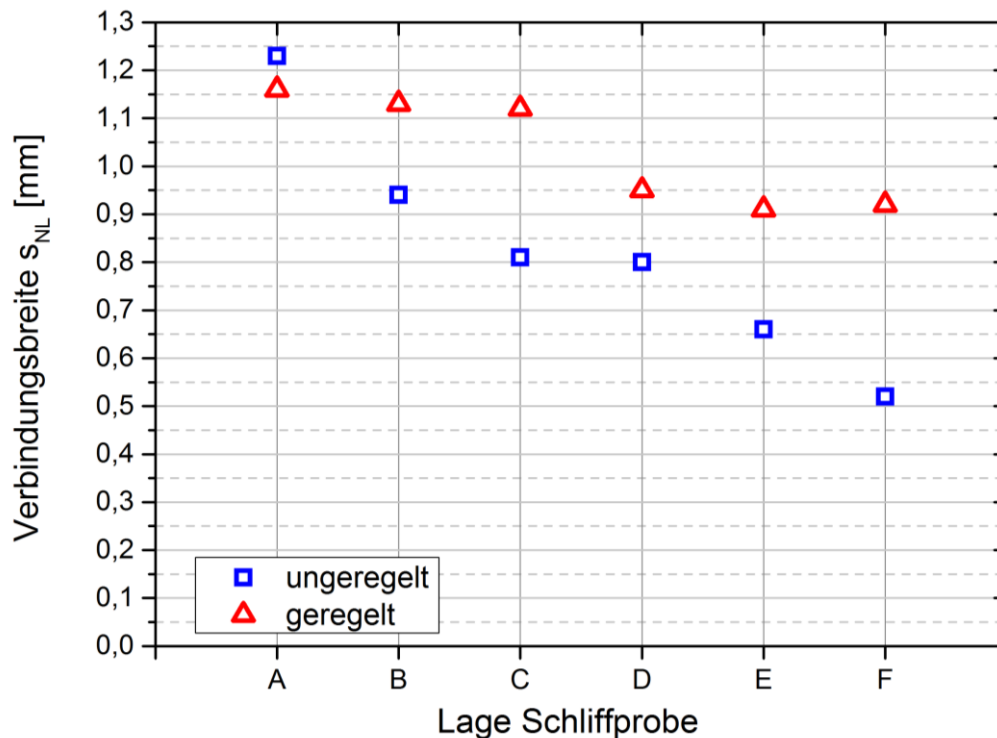


Abbildung 5.44 Vergleich der Verbindungsbreite aus den Querschliffen von geregelter und ungeregelter Probe

Durch die Laserleistungsregelung konnte eine signifikante Verbesserung der Nahtqualität gegenüber dem ungeregelten Prozess bei einer Geschwindigkeitsrampe von 1 auf 3 m/min erzielt werden. Dies ist ein realistischer Anwendungsfall an der Karosserie, wo nach dem Start der Lötung zwischen Dach und Seitenwandrahmen (Eckumlötung) im Übergang zum geraden Bereich (Strak) eine derartige Beschleunigung auf kurzer Strecke durchzuführen ist. Hier liegen die größten Vorteile dieser Prozessstrategie.

5.5 Synopsis zum Laserstrahlschweißen

Die Untersuchungen in dieser Arbeit zum Laserstrahlschweißen am schrägen Bördelstoß der Dachnaht zeigten eine Verbesserung der Nahtqualität gegenüber dem statischen Ansatz. Dies zeigt sich vor allem in der gesteigerten Verbindungsbreite (s_{NL}), welche nicht nur die Festigkeit der gesamten Fügeverbindung bestimmt, sondern auch die Sicherheiten für eine nachgelagerte automatisierte und/oder manuelle Schleifbearbeitung der Karosserie (Finish) beinhaltet. Zusätzlich konnte unter höchsten Qualitätsanforderungen die Lötgeschwindigkeit durch das Laserstrahlschweißen auf 4 m/min erhöht werden.

Für derzeit in der Großserie eingesetzte Vorschubgeschwindigkeit von 3 m/min ist in Abbildung 5.45 die Auswertung der wichtigsten Merkmale für die Nahtqualität (Verbindungsbreite, Konturradius, Nahttiefe und Porenanzahl) dargestellt.

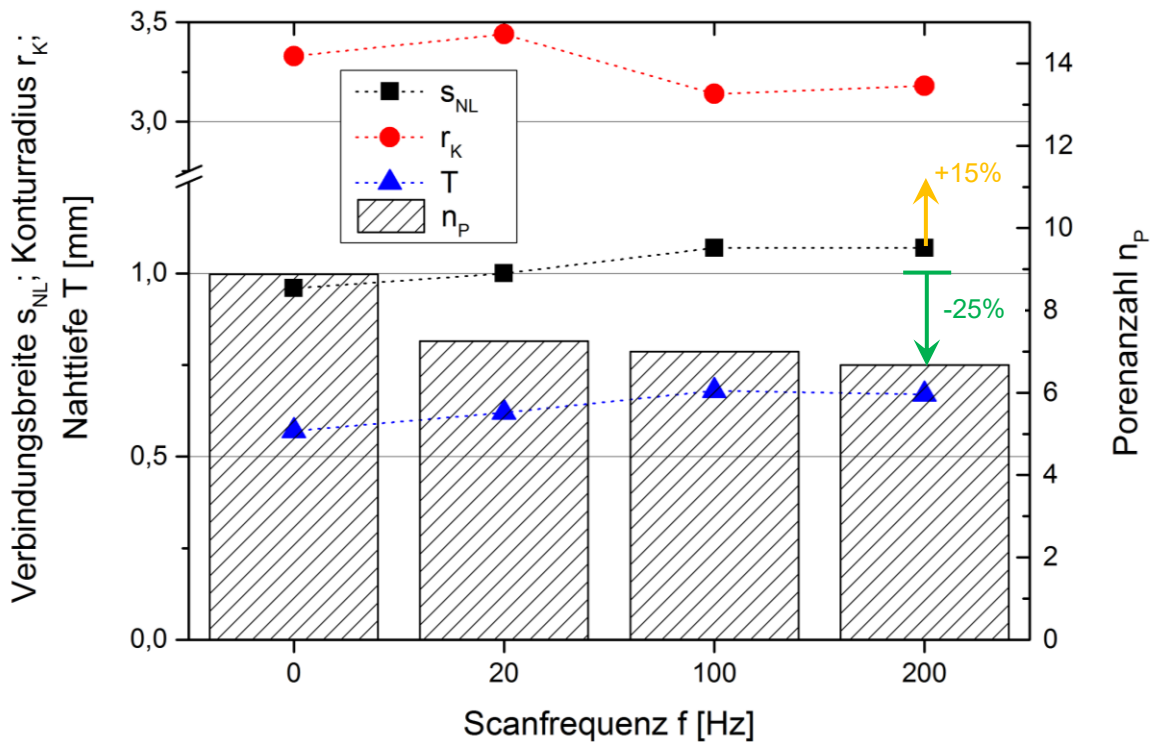


Abbildung 5.45 Zusammenfassender Vergleich der wichtigsten Merkmale zur Nahtqualität in Abhängigkeit der Scanfrequenz für eine Vorschubgeschwindigkeit von $v_R = 3$ m/min (weitere Parameter $P_L = 3,6$ kW; $v_R = 3$ m/min; $v_{Dr} = 3,2$ m/min; $A_{ges} = 4,4$ mm; f variiert)

Die Steigerung der Verbindungsbreite (ca. +15%) resultiert hauptsächlich aus der Anbindung der kompletten Nahtwurzel bis in die Tiefe des Bördelstoßes. Dies konnte durch eine bessere Vorwärmung der Grundwerkstoffe und die damit verbundene bessere Benetzung erreicht werden. Der Konturradius wurde leicht verringert, während die Nahttiefe etwas vergrößert wurde. Dies deutet ebenfalls auf die etwas tiefere Lage der Lötnaht in der Fuge des Bördelstoßes trotz Kaltdrahtvariante beim Laserstrahlscanlöten und somit auf die gewünschten tangentialen Übergänge zum Grundwerkstoff hin. Weiterhin wurde die Porenanzahl bzw. die Häufigkeit der Poren in der Naht reduziert (ca. - 25%), was wiederum bei nachgelagerten Schleifprozessen weniger Nacharbeit und damit weniger Kosten verursacht. Zusätzlich soll an dieser Stelle erwähnt werden, dass die detektierten Poren bei den gescannten Lötnahten fast ausschließlich im Wurzelbereich zu finden waren, was ebenfalls wesentlich positiver zu bewerten ist.

Zusätzlich lässt sich mit dem in der Scanoptik integrierten kamerabasierten System eine Prozessüberwachung durchführen. Diese detektiert Prozessschwankungen der Temperaturfeldgröße und damit verbunden der Laserleistung am Bearbeitungsort sowie laterale Abweichungen, wie sie bspw. bei einseitiger Benetzung vorkommen. Gleichzeitig sollten allerdings das Verhältnis von Draht- zu Vorschubgeschwindigkeit sowie der Offset in Vorschubrichtung (x-Offset) im zuvor bestimmten Referenzbereich gehalten werden, um Fehlinterpretationen des Systems zu vermeiden. Damit wäre auch ein Verändern der gleichmäßigen Eingangsbedingungen in den Datensignalen zu erkennen, wie es z. B. bei

einer zu stark beöhlten Oberfläche auftreten kann. In jedem Falle muss das System mit dem idealen Referenzprozess auf die jeweilige Applikation bzw. Geometrie "angelern" sowie noch akzeptierbare Grenzen der Abweichungen vom Sollsignal definiert werden, um nicht einen Anlagenstopp bei guter Nahtqualität zu provozieren.

Außerdem wurden in dieser Arbeit die koaxial ermittelten Temperatursignale für die Entwicklung von Regelstrategien hinsichtlich Schmelzbadgröße auf den Bördelstoß, speziell auf die ungleichmäßige schräge Dachnullfugengeometrie, nachgewiesen. Somit konnte erstmalig neben der Qualitätssteigerung durch das Laserstrahlscanlöten im Vergleich zum statischen Verfahren auch der Nachweis für die Funktionalität einer Laserleistungsregelung beim Laserstrahlscanlöten für diese komplexe Geometrie nachgewiesen werden. Zusätzlich zur Prozessregelung wäre eine in [Grim12] erwähnte Bahnkorrektur des Roboters über die Erfassung der Temperatursignale aus Abschnitt 5.4.1 oder ein in [Unge13] vorgeschlagenes Regeln der Drahtzuführgeschwindigkeit im konstanten Verhältnis zur Robotervorschubgeschwindigkeit ergänzend denkbar. Für eine robuste Prozessregelung ist bei dieser anspruchsvollen Geometrie und dem daraus resultierenden komplexen Laserstrahlötprozess besonders bei höheren Vorschubgeschwindigkeiten ($> 3 \text{ m/min}$) eine Kombination aus mehreren Regelansätzen empfehlenswert.

6 Zusammenfassung

Die Entwicklungen hinsichtlich konsequenter Leichtbaus mittels ressourceneffizienter Herstellungsverfahren unter verschärften weltweiten wirtschaftlichen Gesichtspunkten stellen immer neue Herausforderungen an Laserprozesse im modernen Karosseriebau. Dies betrifft insbesondere die Anforderungen an das Laserstrahlhartlöten. Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, die Robustheit des Laserstrahlhartlötprozesses hinsichtlich der Vermeidung von Nahtimperfectionen, bei gleichzeitiger Steigerung der Prozessgeschwindigkeit, zu erhöhen. Die Anforderungen an die Nahtqualität sind dabei die höchsten im gesamten Karosseriebau (Außenhautbereich, Class-A).

Durch die Analyse der wichtigsten Einflussfaktoren für die Lötnahtqualität beim Laserstrahlhartlöten konnten die Prozessgrenzen, besonders hinsichtlich der Verbindungsbreite (s_{NL}) bei Verwendung des Standardequipments, aufgezeigt werden. Demnach konnte die Verbindungsbreite selbst unter Idealbedingungen nicht über 1,01 mm gesteigert werden. Im Mittel lagen die Verbindungsbreiten sowohl bei Heiß- als auch bei Kaltdraht deutlich unter diesem Wert (0,94 mm bei Kaltdraht, 0,87 mm bei Heißdraht). Aufgrund des nachfolgenden Materialabtrages durch Schleifprozesse mit einem Abtrag von bis zu 0,2 mm nach der Laserlötstation (manuell und automatisiert) ist dieses Maß als äußerst kritisch zu bewerten. Die Einstrahlwinkel (Orientierung der Löt Optik) haben ebenfalls einen Einfluss auf die Ausbildung der Naht. Dadurch wird die Energieeinkopplung und damit Vorwärmung im Grundwerkstoff verändert. Dies hat direkten Einfluss auf die Benetzungsbedingungen des Zusatzwerkstoffes, da die Benetzung nur in ausreichend vorgewärmte Bereiche, nach Abtrag der Zinkschicht, erfolgen kann. Ist dies nicht der Fall, erhöht dies die Rissgefahr, durch die Korngrenzenpenetration des Zinkes und die damit verbundene Lötbrüchigkeit im Grundwerkstoff. Eine erhöhte Abschattung des Laserstrahls durch den schleppend zugeführten Drahtwerkstoff verschlechtert die Benetzungsbedingungen zusätzlich. Bei zu stark veränderten Lateralwinkeln bezüglich der senkrechten Anstellung können sich so verstärkt Fehlstellen ausbilden.

Durch die zusätzliche Drahtvorwärmung kann der Lotwerkstoff tiefer in die Fuge des Bördelstoßes eingebracht werden. Hierdurch können die Nahtübergänge zum Grundwerkstoff „modelliert“ bzw. beeinflusst werden. Allerdings erfolgt ab einem gewissen Punkt keine Anbindung zu den Grundwerkstoffen und das Verbindungsmaß verringert sich wieder. Die Laserleistung selbst bzw. die Streckenenergie bei den erzielbaren Geschwindigkeiten ist limitiert, da es dann zu verstärkter Riss- und Porenbildung sowie zu nicht zulässigen Anschmelzungen des Grundwerkstoffes kommt.

Durch den neuartigen Ansatz des Laserstrahlscanlötens ist es gelungen die Vorteile der beiden aktuell in Großserie eingesetzten Verfahren (Plasmatron und Laserstrahlhärten) zu

vereinen. So ließen sich die Verbindungsbreiten bei zusätzlicher Steigerung der Lötgeschwindigkeit (s_{NL} bis zu 1,3 mm bei 3 m/min und bis zu 1,1 mm bei 4 m/min) erhöhen. Dabei stellte sich besonders die Verwendung von kleinen Auslenkungen ($A_{ges} = 4,4$ mm) und höheren Frequenzen (200 Hz) als vorteilhaft zur Steigerung der Nahtqualität heraus. Die Modellierung der Energieverteilung über den gesamten Pendelbereich zeigte keine deutlichen Effekte bei diesen kleineren Auslenkungen. Mittels High-Speed-Aufnahmen und High-Speed-Pyrometer ließ sich zudem die positive Beeinflussung auf das Drahtabschmelzverhalten beobachten. Beim statischen Prozess stellt sich demnach durch das Abschmelzverhalten des Drahtes, welches durch den Energieeintrag und die Vorschubgeschwindigkeiten erzeugt wird, eine Eigenfrequenz der benetzenden Schmelzbadfront ein. Dies ist aus der Literatur bekannt. Nun lassen sich aber mit dem neuartigen Ansatz die Schmelzbadvolumina verringern und es stellt sich eine Benetzungsfrequenz der Schmelzbadfront nahe der Scanfrequenz ein. Durch die geringere Dynamik der kleineren Volumina und das damit verbundene gleichmäßigere Benetzungsverhalten lassen sich sehr gute Oberflächenqualitäten erzeugen. Weiterhin konnte die Nahtlage tiefer in der Fuge des Bördelstoßes verschoben werden. Dies ist vergleichbar mit den Ergebnissen bei Verwendung von Heißdraht, allerdings mit kompletter Anbindung der Nahtwurzel. Dadurch wird kein „ungenutztes“ Schmelzgut in die Fuge eingebracht und der komplette Querschnitt trägt zur Verbindung bei.

Zusätzlich konnte die in der Scanoptik integrierte Thermokamera für die Erfassung der Prozesssignale genutzt werden. Mit Hilfe von geeigneten Messfeldern und hinterlegten Kennlinien ausgehend vom Idealprozess konnten somit Nahtfehler an der Oberfläche wie bspw. einseitige Benetzung der Grundwerkstoffe detektiert werden. Mit Hilfe dieser Prozessdatenerfassung können unterschiedliche Leistungsniveaus bzw. Schwankungen in der Durchschnittsintensität der zurückgestrahlten Wärme vom Schmelzbad erfasst werden. Dies ist für eine Großserienproduktion sehr hilfreich, da dadurch bspw. eine Verringerung der Laserleistung durch verschmutzte Schutzgläser detektiert werden kann.

Die ins System implementierte Laserleistungsregelung konnte genutzt werden, um den Laserstrahlötprozess zu stabilisieren. Ausgehend vom Idealprozess und mit den ermittelten Kennlinien der Prozessdatenerfassung wurden die Schmelzbadgrößen des Realprozesses bestimmt und für den Regelansatz herangezogen. Um die Stabilität der Laserleistungsregelung gegen Prozessschwankungen zu erhöhen mussten geeignete Regelparameter bestimmt werden. Über die Festlegung der Regelung auf eine bestimmte Flächengröße (Anzahl Pixel einer vordefinierten Signalstärke = „aktive Fläche“) konnte die Schmelzbadgröße konstant gehalten werden. Für eine konstante Vorschubgeschwindigkeit des Roboters und des Zusatzwerkstoffes konnten durch diesen Regelansatz reproduzierbare Ergebnisse hinsichtlich Verbindungsbreite und Nahtqualität erzielt werden.

Als Anwendungsfall wurde eine Geschwindigkeitsrampe (von 1 auf 3 m/min) mit einem festen Verhältnis von Draht- zu Robotergeschwindigkeit programmiert. Die Schmelzbadgröße wurde über den Regelansatz der „aktiven Flächenregelung“ und die damit verbundene Laserleistungsregelung konstant gehalten. Dadurch konnten auch über die Geschwindigkeitsrampe reproduzierbare Ergebnisse hinsichtlich der Verbindungsbreite und Oberfläche erzielt werden. Die Schwankungen waren dabei etwas größer als bei den Untersuchungen zur konstanten Vorschubgeschwindigkeit. Allerdings ist dies auch von der Synchronität der Geschwindigkeitsrampen von Roboter- zu Drahtvorschub abhängig. Dies sollte für zukünftige Entwicklungen berücksichtigt werden. Beispielsweise könnte dies mit einer Online-Regelung der beiden Vorschübe in einem vordefinierten Verhältnis zueinander kompensiert werden. Da die Laserleistungsregelung dem Scannen übergeordnet ist, lassen sich die zuvor geschilderten Vorteile der beiden neuen Ansätze miteinander kombinieren und die Laserstrahlscanlötprozesse weiter hinsichtlich Ihrer Robustheit gegenüber dem statischen Verfahren verbessern.

Das Laserstrahlscanlöten zeigte für die Applikation der schrägen Dachnullfuge Steigerungen der Verbindungsbreite, Verbesserung der Oberflächen und Verringerungen der Porenanzahl. Diese Vorteile des geregelten Laserstrahlscanlötprozesses könnten zukünftig besonders bei weiter reduzierten Blechdicken, höheren Prozessgeschwindigkeiten und markanteren bzw. engeren Radien zum Tragen kommen.

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik (IWS) Dresden im Kooperationsprojekt „Nahtimperfectionen beim Laserstrahlhartlöten“ mit der Audi AG Ingolstadt.

Ich danke herzlich allen Menschen, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Göbel, Herrn Prof. Dr. B. Brenner und Herrn Dr. rer. nat. M. Graudenz für die zahlreich anregenden Diskussionen sowie die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. E. Beyer danke ich für die konstruktiven Anregungen und die Bereitschaft zur Betreuung der Arbeit an der Technischen Universität Dresden. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. U. Füssel für die Übernahme des Zweitgutachtens und die stete Diskussionsbereitschaft bei der Anfertigung dieser Arbeit.

Bedanken möchte ich mich herzlich bei allen Mitarbeitern des Fraunhofer IWS, vor allem in der Abteilung Füge- und Randschichttechnologie, und der Audi AG, da besonders bei der Technologieentwicklung Fügen, für die erfolgreiche Zusammenarbeit und die wohlthuend freundliche Atmosphäre. Ebenso gilt mein Dank allen Studenten, die im Rahmen ihrer Praktika, sowie Diplom- und Studienarbeiten einen wichtigen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben.

Der größte Dank gilt meiner Familie und meinen Freunden für ihr unermessliches Verständnis und die fortwährende Unterstützung während der Erstellung dieser Arbeit. Ohne ihren wohlthuenden Beistand, ihre Liebe und Motivation wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Ihnen sei die vorliegende Arbeit von ganzem Herzen gewidmet.

Dresden, den 11.11.2014

Marco Heitmanek

Literaturverzeichnis

- [Barg08] H.-J. Bargel, Prof. G. Schulze: Werkstoffkunde; 10. bearbeitete Auflage; Springer-Verlag; Berlin, Heidelberg 2008
- [Beye95] Beyer, E.: „Schweißen mit Laser – Grundlagen“; Springer Verlag; Berlin, Heidelberg 1995
- [Beye98] Beyer, E.; Wissenbach, K.: „Oberflächenbehandlung mit Laserstrahlung“; Springer Verlag; Berlin, Heidelberg 1998
- [Bonß06a] Bonß, S.: „Dynamisches Strahlformungssystem LASSY zur industriellen Laserrandschichtveredelung“; Fraunhofer IWS Dresden, 2006
- [Bonß06b] Bonß, S.: „»LASSY« - dynamisch adaptierbare Härteoptik“; 6. Workshop »Industrielle Anwendungen von Hochleistungsdiodenlasern«, Fraunhofer IWS Dresden, 08./09. November 2006
- [Bonß07] Bonß, S. et al.: „Variable Bearbeitungsoptik zum Laserstrahlhärten – Strahlformungssysteme mit Scannerspiegeln erlauben flexible Bearbeitung“; Wiley-VCH Verlag GmbH und Co. KGaA; Laser Technik Journal (2007), Nr. 2, S. 39-42
- [Bonß08] Bonß, S.: „Mess- und Regelsysteme für industrielle Laserprozesse“; 7. Workshop »Industrielle Anwendungen von Hochleistungsdiodenlasern« Dresden, 24./25. Juni 2008
- [Bran03] Brandner, M.: „Steigerung der Prozesseffizienz beim Löten und Kleben mit Hochleistungsdiodenlasern“; Laser in der Materialbearbeitung - Forschungsberichte des IFSW; Dissertation eingereicht an der Universität Stuttgart; Herbert Utz Verlag GmbH; München 2003
- [Brau03] Braumöller, J.: „Beitrag zum flussmittelfreien Laserstrahlhartlöten von Aluminiumwerkstoffen“; Dissertation eingereicht an der TU Dresden; Dresden 2003
- [Brun09] Brunke, O. et al.: „Defektanalyse und Dimensionelles Messen mit hochauflösender Computer-Tomographie“; GE Sensing & Inspection Technologies GmbH; Wunstorf 2009
- [Demm08] Demmer, A.: „LasTiLot – Entwicklung der Laserstrahl-Technologie zum Fügen korrosionsbeständiger Bauteilkomponenten aus Titanwerkstoffen mit minimaler Werkstoffbeeinflussung“; Abschlussbericht; Aachen 2008
- [Dilt00] Diltthey, U.; Bachem, H.: „MSG-Löten von verzinkten und legierten Stählen als alternative Fügetechnik im Fahrzeugbau“; DVS-Berichte Band 209, Große Schweißtechnische Tagung Nürnberg; 27. bis 29. September 2000
- [Dilt06] Diltthey, U.: „Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1 – Schweiß- und Schneidtechnologien“; 3. bearbeitete Auflage; Springer Verlag; Berlin, Heidelberg 2006

- [DIN 8505-1] Norm: „Löten; Allgemeines, Begriffe“; Beuth Verlag GmbH; Berlin; Mai 1979
- [DIN 8505-3] Norm: „Löten; Einteilung der Verfahren nach Energieträgern, Verfahrensbeschreibungen“; Beuth Verlag GmbH, Januar 1983
- [DIN 8514] Norm: „Lötbarkeit“; Beuth Verlag GmbH; Berlin; Mai 2006
- [DIN EN ISO 18279] Norm: „Hartlöten - Unregelmäßigkeiten in hartgelöteten Verbindungen“; Beuth Verlag GmbH; Berlin; April 2004
- [DIN EN 12797] Norm: „Zerstörende Prüfverfahren von Hartlötverbindungen“; Beuth Verlag GmbH; Berlin; Dezember 2000
- [DIN EN 12799] Norm: „Zerstörungsfreie Prüfverfahren für Hartlötverbindungen“; Beuth Verlag GmbH; Berlin; Dezember 2000
- [DIN ISO 857-2] Norm: „Schweißen und verwandte Prozesse - Begriffe - Teil 2: Weichlöten, Hartlöten und verwandte Begriffe“; Beuth Verlag GmbH; Berlin; März 2007
- [Dons09] Donst, D. et al.: „On-line quality control system for laser brazing“; Congress Proceedings; ICALEO 2009; S. 420-429
- [Dorn07] L. Dorn et al.: „Hartlöten und Hochtemperaturlöten – Grundlagen und Anwendung“; Kontakt & Studium Band 677; expert verlag; Renningen 2007
- [Ebbi98] M. Ebbinghaus, H.D. Prinz: „Lichtbogen-Löten von Stahlbauteilen mit Kupfer-Basis-Zusatzwerkstoffen“; DVS-Berichte Band 192, 5. Internationales Kolloquium: Hart- und Hochtemperaturlöten und Diffusionsschweißen; Aachen; 16. bis 18. Juni 1998
- [Ehm08] Ehm, A.: Einfluss der Schweißparameter beim thermischen Fügen von neuen, hochfesten Mn-legierten Stählen auf deren Festigkeitseigenschaften bei quasistatischer, schlagartiger und zyklischer Beanspruchung“; Diplomarbeit; eingereicht an der TU Bergakademie Freiberg; Januar 2008
- [Eich10] Eichler, J., Eichler, H.: „Laser: Bauformen, Strahlführung, Anwendungen“; 7. Auflage; Springer Verlag; Berlin, Heidelberg 2010
- [EQOS11] Forschungsvorhaben EQOS: „Entwicklung und Qualifizierung eines einfachen Online-Qualitätsüberwachungssystems für das industrielle Laserstrahlhartlöten“; Abschlussbericht zum InnoNet-Forschungsvorhaben IN 7023; Aachen, Braunschweig 2011
- [Fahr09] Fahrenwaldt, H. J.; Schuler, V.: „Praxiswissen Schweißtechnik“; Werkstoffe, Prozesse, Fertigung; 3. aktualisierte Auflage; Vieweg+Teubner; GWV Fachverlage GmbH; Wiesbaden 2009
- [Fanu14] Technisches Datenblatt R-2000iB/125L; FANUC Robotics Europe SA; http://www.fanucrobotics.de/de/products/a_industrial-robots/r-2000_series/r-2000ib%20125l (Stand Juli 2014)

- [Feng08] Fenggui Lu et al.: „Study on influencing factors and joint performance of laser brazing on zinc-coated steel plate“; International Journal of Advanced Manufacturing Technology; Springer Verlag; 2008
- [Frit10] Fritz, A. H.; Schulze, G.: „Fertigungstechnik“; 9. Neu bearbeitete Auflage; Springer Verlag; Berlin, Heidelberg 2010
- [Fron14] Technisches Datenblatt TPS4000; Fronius INTERNATIONAL GMBH; http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-34C0B10E-7E64B0B7/fronius_uk/4000062261_0110_TS_TPS3200_9000_DE_46620_snapshot.pdf (Stand Juli 2014)
- [Fuen07] Fuentes Munoz, J. E.: „Experimental possibilities of gas tungsten arc analysis“; Welding and Cutting 2007, Band 6, S. 282-287
- [Goed07] Goede, M.: „Karosserieleichtbau als Baustein einer CO2-Reduzierungsstrategie“; 16. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik; Aachen 2007
- [Grau12] Graudenz, M.; Heitmanek, M.: „Laser Tools in the Manufacturing Process - Joining technology trends in body manufacturing at Audi“ Wiley-VCH Verlag GmbH und Co. KGaA; Laser Technik Journal (2012), Nr. 4, S. 24-27
- [Grim07] Grimm, A. et al.: „Investigations towards extended stability in laser brazing“; Proceedings of LANE 2007; 5th International Conference on Laser Assisted Net Shape Engineering LANE 2007; S. 1033-1041; Bamberg, Meisenbach 2007
- [Grim08] Grimm, A.: „Temperaturgeregeltes Laserstrahlhartlöten mit Hochleistungsdiodenlasern“, Jenaer Lasertagung 2008, DVS Verlag Band 253
- [Grim09] Grimm, A.; Schmidt, M.: „Possibilities for online process monitoring at laser brazing based on two dimensional detector systems“; Congress Proceedings; ICALEO 2009; S. 537-544
- [Grim10] Grimm, A. et al.: „Laserstrahlhartlöten mit koaxialer Drahtzuführung“; DVS Berichte Band 267; DVS Congress; Große Schweißtechnische Tagung; Nürnberg; 27. und 28. September 2010
- [Grim12] Grimm, A.: „Prozessanalyse und –überwachung des Laserstrahlhartlötens mittels optischer Sensorik“ Fertigungstechnik Erlangen; 229.; Dissertation eingereicht an der Universität Erlangen – Nürnberg; Meisenbach Verlag Bamberg; 2012
- [Haar08] von der Haar, C.: „Laserstrahllöten von Stahl-Aluminium-Mischverbindungen - Ansätze für den Leichtbau mit Multi-Material-Design“; Vortrag EALA 2008
- [Haar10] von der Haar, C.: „Laserstrahllöten von umformfähigen hybriden Platinen aus Stahl-Aluminium-Mischverbindungen“; Dissertation eingereicht an der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2010

- [Hafe95] Haferkamp, H. et al.: „Erste Untersuchungen zum Hochtemperaturlöten von Nickel- und Kobaltbasislegierungen mit Nd:YAG-Laserstrahlung“; DVS-Berichte Band 192; 4. Internationales Kolloquium: Hart- und Hochtemperaturlöten und Diffusionsschweißen; Aachen; 27.-29.06.1995
- [Hane96] Hanebuth, H.: „Laserstrahllöten mit Zweistrahltechnik“; Fertigungstechnik Erlangen; 55.; Dissertation eingereicht an der Universität Erlangen – Nürnberg; Meisenbach Verlag Bamberg; 1996
- [Heit12] Heitmanek, M.; Graudenz; M.: „Joining trends in the body-in-white construction at Audi“; International Symposium "Tailored Joining" 2012; Dresden 17.-18.10.2012
- [Heit14] Heitmanek, M. et al.: „Laser brazing with beam scanning: Experimental and simulative analysis“; Proceedings of LANE 2014; 8th International Conference on Laser Assisted Net Shape Engineering LANE 2014; S. 259-262; Bamberg, Meisenbach 2014
- [Herr02] Herrmann, A.: „Fertigungsorientierte Verfahrensentwicklung des Weichlötens mit Diodenlasern“; Laser in der Materialbearbeitung - Forschungsberichte des IFSW; Dissertation eingereicht an der Universität Stuttgart; Herbert Utz Verlag GmbH; München 2002
- [Hill98] Hillen, F. et al.: Neue Möglichkeiten zum flussmittelfreien Löten schwer ffügbarer Werkstoffe“; DVS-Berichte Band 192, 5. Internationales Kolloquium: Hart- und Hochtemperaturlöten und Diffusionsschweißen; Aachen; 16. bis 18. Juni 1998
- [HKS14] Technisches Datenblatt WeldQAS-System; HKS-Prozesstechnik GmbH; http://hks-prozesstechnik.de/fileadmin/uploads/Downloads/flyer_weldqas_de.pdf (Stand Juli 2014)
- [Hoff02] Hoffmann, H. et al.: „Laserstrahlhartlöten – Systemtechnik, Anwendungen und Potentiale“; Bias, Bremer Institut für Angewandte Strahltechnik; Laserstrahlfügen: Prozesse, Systeme, Anwendungen, Trends; Beiträge zum 4. Laser-Anwenderforum; Bremen; 12. - 13. September 2002
- [Hoff03] Hoffmann, H. et al.: „Laser Brazing with High Power Solid State Lasers – Systems and Applications in Automotive Industry“; WLT-Conference; Proceedings, München 2003
- [Hoff04a] Hoffmann, H. et al.: „Prozess- und Systemtechnik für das Laserstrahllöten“, DVS Schweißen und Schneiden 56; 7. Internationales Kolloquium: Hart- und Hochtemperaturlöten und Diffusionsschweißen; Aachen; 15.-17. Juni 2004
- [Hoff04b] Hoffmann, H. et al.: „Twin spot technology for an advanced laser brazing process“; Proceedings of LANE 2004; S.259-262; Bamberg, Meisenbach 2004
- [Hoff06] Hoffmann, P., Schwab, J.: „Neuere systemtechnische Entwicklungen für den beherrschten Laserstrahlhartlötprozess“; 5. Laser-Anwenderforum; Bremen, 13.-14.09.2006; Strahltechnik Band 28; S. 113-121, BIAS Verlag, Bremen, 2006

- [Horn06] Hornig, H.: „Praxis des Laserstrahlhartlötens im Fahrzeugbau“; 5. Laser-Anwenderforum; Bremen, 13./14.09.2006; Strahltechnik Band 28; S. 123-137, BIAS Verlag, Bremen, 2006
- [Hueb10] Hübner, M. et al.: „Neue Schweißverfahren im Karosseriebau als kostengünstige Alternative zum Laserstrahllöten“; DVS Berichte Band 267; DVS Congress; Große Schweißtechnische Tagung; Nürnberg; 27. und 28. September 2010
- [Hueg09] Hügel, H.; Graf, T.: „Laser in der Fertigung: Strahlquellen, Systeme, Fertigungsverfahren“; 2. Auflage; Vieweg + Teubner; Wiesbaden 2009
- [Ishi98] Ishida, T.: „Dissolution of solid metal into molten metal and migration of molten metal into solid metal in brazing“; DVS-Berichte Band 192, 5. Internationales Kolloquium: Hart- und Hochtemperaturlöten und Diffusionsschweißen; Aachen; 16. bis 18. Juni 1998
- [IWS10] Fraunhofer IWS: „Betriebs- und Montageanleitung LASSY“; Dresden; 2010
- [Jahn11] Jahn, A.: „Umformbarkeit laserinduktionsgeschweißter Strukturen aus höherfesten Stahlfeinblechen“; Dissertation; eingereicht an der TU Dresden 2011
- [Kais09] Kaiser, T.: „Einsatz eines Diodenlasers zum Löten und Schweißen im Stahlkarosseriebau“; Diplomarbeit; eingereicht an der TU Dresden März 2009
- [Kall02] Kallabis, M.; Schwankhart, G.: „Plasmatronfügen – der Star im Karosseriebau“; Blech InForm 42 September 2002
- [Kimu06] Kimura, S. et al.: „Laser brazing phenomena of galvanized steel and pit formation mechanism“; Congress Proceedings; ICALEO 2006; S. 346-354
- [Kloc07] Klocke, F.; König, W.: „Fertigungsverfahren: Abtragen, Generieren und Lasermaterialbearbeitung“; 4. Auflage; Springer Verlag; Berlin, Heidelberg 2007
- [Kolt10] Koltsov, A. et al.: „Wetting and laser brazing of Zn-coated steel products by Cu-Si filler metal“; Journal of Material Science, Vol. 45, Nr. 8; Springer Verlag, 2010
- [Koen03] König, H.; Busch, D.: „Die neue Audi A3 Karosserie“; EuroCarBody 2003; Internationaler Expertenkreis Karosseriebau; Bad Nauheim; 21. – 23. Oktober 2003
- [Kreu97] Kreutzburg, K.: „Aspekte des Laserstrahllöten von metallisch-keramischen Verbindungen“; Fortschritt-Berichte VDI; Reihe 2: Fertigungstechnik Nr. 421; VDI Verlag; Düsseldorf; 1997
- [Krin11] Krink, V. et al.: „InFocus – Schweißen und Löten mit selbstkonzentrierendem Lichtbogen“; DVS-Berichte Band 275, Große Schweißtechnische Tagung; Hamburg; 26.-29. September 2011

- [Kuka14] Technisches Datenblatt KR-100; <http://www.robots.com/kuka/kr-100-ha>; (Stand Juli 2014)
- [Lieb13] Liebowitz, J.: „Automotive Applications for Ultra-High Brightness Direct Diode Lasers“; EALA – European Automotive Laser Applications 2013; Bad Nauheim; 19. – 20. Februar 2013
- [LiLi08] Li, Li-Q. et al.: „Influence of laser energy input mode on joint interface characteristics in laser brazing with Cu-base filler metal“; Transactions of the Nonferrous Metals Society of China; Band 18; 2008
- [Lase14] Technisches Datenblatt LDF-5000-30; Laserline GmbH; <http://www.laserline.de/fasergekoppelte-diodenlaser-ldf-serie-produktueberblick.html> (Stand Juli 2014)
- [Math10] Matthes et al.: „Ursachen und Bewertung von Unregelmäßigkeiten lichtbogengelöteter Verbindungen“; AIF-Forschungsbericht; TU Chemnitz 2010
- [Merk110] Merkblatt 110: „Schnittflächenschutz und kathodische Schutzwirkung von schmelztauchveredeltem und bandbeschichtetem Feinblech“; Stahl-Informations-Zentrum; Ausgabe 2008, Düsseldorf 2008
- [Merk235] Merkblatt 235: „Weich- und Hartlöten von Bandverzinktem Feinblech“; Stahl-Informations-Zentrum; 2. Auflage, Düsseldorf 2003
- [Orli96] Orlick, H.: „Laserstrahl-Hartlöten mittels Nd:YAG-Laser“; Forschungsberichte SLV Halle; 1996
- [PV1602] Prüfvorschrift des VW-Konzerns
- [Rose08] Rose, S. et al.: „Konzepte für Schweißbrennerkühlungen“; DVS-Berichte Band 250, Große Schweißtechnische Tagung Dresden; 17. bis 19. September 2008
- [Ruet12] Rütering, M.; Luft, A.: „Diode Lasers and Aluminum – A Success Story on the Rise - a reliable tool, not only in the automotive industry“; Wiley-VCH Verlag GmbH und Co. KGaA; Laser Technik Journal (2012), Nr. 3, S. 42-45
- [Ruge07] Ruge, J; Wohlfahrt, H.: „Technologie der Werkstoffe“; 8. Auflage; Vieweg; Wiesbaden 2007
- [Scan14] Technisches Datenblatt: „Adaptive Löt Optik ALO3“; Scansonic IPT GmbH; http://www.scansonic.de/files/downloads/scansonic_alo3_datasheet_v2.0_de.pdf (Stand Juli 2014)
- [Schn10] Schnick, M.: „Numerische und experimentelle Verfahrens- und Brennerentwicklung beim Plasmalichtbogenschweißen“; Dresdner Fügetechnische Berichte, Band 20; Dissertation eingereicht an der TU Dresden; Dresden 2010
- [Seif04] Seifert, M. et al.: „Dynamische Strahlformung für Hochleistungs-Diodenlaser bis 4 kW“; Vortrag aus der Reihe „Industrielle Anwendungen von Hochleistungsdiodenlasern“; Fraunhofer IWS Dresden 22.10.2004

-
- [Seif14] Mehrere Persönliche Gespräche mit dem Entwickler der „LompocPro“-Software Herrn M. Seifert vom Fraunhofer IWS Dresden, 2011 bis 2013
- [SLV07] SLV München: „Untersuchungen zur Entstehung von Lötrissen von verzinkten Stahlblechen beim Löten mit Schutzgasverfahren“; Abschlussbericht 5141600 zum Forschungsvorhaben AiF-Nr. 14.429, DVS 01.042; München, September 2007
- [Steil2] Steiger, W.: „Rahmenbedingungen zukünftiger Mobilität – Strategie des Volkswagen Konzerns“; Vortrag AutoUni-VDI; Ingolstadt; November 2012
- [Trae05] Tränkle, G.: „Laserdioden – Komplexe Bauelemente mit vielen Vorteilen“; Laser Technik Journal 2 (2005), Nr. 1, S. 50-53
- [Tuer04] Türpe, M.: „Wechselwirkung Löttechnik – Werkstoff, Bedeutung und Potential“; Habilitationsschrift; Dresdener Fügetechnische Berichte; w.e.b. Universitätsverlag; Dresden 2004
- [Thys13] Produktbroschüre ThyssenKrupp: „Tiefziehstähle DD, DC und DX – für Bauteile höchster Umformkomplexität“; ThyssenKrupp Steel Europe AG; Stand Februar 2013
- [Unge10] Ungers, M. et al.: „In-Situ Quality Monitoring During Laser Brazing“; Physics Procardia 2010, S. 493-503
- [Unge13] Ungers, M. et al.: „Hardware based analysis and process control for laser brazing applications“; Lasers in Manufacturing Conference 2013; München 2013
- [VDI3822] VDI-Richtlinie 3822: „Schadensanalyse - Grundlagen und Durchführung einer Schadensanalyse“; VDI-Gesellschaft Materials Engineering, Fachbereich 1, "Werkstofftechnik"; November 2011
- [Webe10] Weber, J.: „System- und prozesstechnische Untersuchungen zum Laserstrahllöten metallischer Verbindungen“; Diplomarbeit; eingereicht an der TU Dresden; November 2010