



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Tobina Schubert

Optimierung der Drahtpositionierung bei der additiven Fertigung mit Laserschweißen zur Steigerung der Fertigungsqualität

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Mechanical Engineering and
Production Management*

Tobina Schubert

Optimierung der Drahtpositionierung bei der additiven Fertigung mit Laserschweißen zur Steigerung der Fertigungsqualität

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang Produktionstechnik und -management
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

In Zusammenarbeit mit:

Dinse Gmbh
Tarpen 36
22419 Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr. Shahram Sheikhi

Zweitprüfer: Michael Jürgens

Abgabedatum: 09.08.2019

Zusammenfassung

Tobina Schubert

Thema der Bachelorarbeit

Optimierung der Drahtpositionierung bei der additiven Fertigung mit Laserschweißen zur Steigerung der Fertigungsqualität.

Stichworte

Laser, Auftragschweißen, drahtförmiger Zusatzwerkstoff, Optimierung, additive Fertigung, Roboter

Kurzzusammenfassung

Laserdrahtauftragschweißen ist wegen vieler Vorteile gegenüber pulverbasierten Methoden ein potenzialreiches Verfahren zur additiven Fertigung mit Metallwerkstoffen. Die Herausforderung hier besteht in der prozesssicheren Positionierung des drahtförmigen Zusatzwerkstoffs relativ zum Laserstrahl. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Einfluss der Drahtpositionierung auf die Fertigungsqualität untersucht. Ziel der durchgeführten Versuche ist, zunächst mit dem Schweißen von Einzelraupen Toleranzfenster für die relevanten Parameter zu ermitteln und anschließend deren Gültigkeit für Beschichtungen und Wänden zu prüfen. Die Schweißergebnisse werden im Hinblick auf mögliche Ursachen und Implikationen für weitere Versuche diskutiert.

Bachelor Thesis title

Optimization of the filler wire position in additive manufacturing with laser welding for improvement of manufacturing quality.

Keywords

Laser, deposition welding, filler wire, optimization, additive manufacturing, robots

Abstract

Laser deposition welding with wire is a promising technique for additive manufacturing of metals due to multiple advantages over powder-based processes. The challenge here lies in the process reliability of positioning the filler wire relative to the laser beam. The present work investigates the impact of the wire position on manufacturing quality. The experiments aim at identifying the tolerance range of the relevant parameters by welding of single beads and subsequently testing for its validity with coats and walls. The results are discussed in terms of possible causes and implications for further research.

Inhaltsverzeichnis

I.	Abkürzungsverzeichnis	6
II.	Abbildungsverzeichnis	9
III.	Tabellenverzeichnis	14
1	Einleitung.....	15
1.1	DINSE GmbH.....	15
1.2	Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik	15
1.3	Kooperation zwischen DINSE und dem IWS.....	15
1.4	Motivation und Zielsetzung.....	16
2	Additive Fertigung mittels Laserauftragschweißen.....	17
2.1	Additive Fertigung	17
2.1.1	Vorteile der additiven Fertigung	18
2.1.2	AM-Verfahren.....	18
2.2	Werkzeug Laser	20
2.2.1	Entstehung von Laserlicht	20
2.2.2	Laserstrahlquellen	21
2.2.2.1	Betriebsarten.....	23
2.2.2.2	Leistung von Laserquellen	24
2.2.3	Eigenschaften Laserstrahlung.....	25
2.2.3.1	Rohstrahl	25
2.2.3.2	Strahlführung.....	26
2.2.3.3	Strahlformung und geformter Strahl.....	27
2.2.4	Einsatz beim Schweißen	29
2.3	Laserdrahtauftragschweißen.....	30
2.3.1	Draht vs. Pulver:	32
2.3.2	Drahtzuführung und -positionierung	33
2.3.2.1	Drahtzuführung	33
2.3.2.2	Drahtpositionierung	35
3	Anlagenkonfiguration.....	38
3.1	Laserstrahlquelle HAAS HL 4006D	39
3.2	KUKA-Roboter.....	39
3.3	Drehkipptisch zur Werkstückaufnahme	40
3.4	Bearbeitungsoptik von Trumpf.....	41
3.5	Laserscanner.....	43
3.6	Drahtförderanlage von DINSE	44
3.7	Positioniervorrichtung.....	46

3.8	Schutzgaszufuhr	46
3.9	Verwendete Werkstoffe	47
4	Studiendesign	48
4.1	Allgemeine Vorbereitung	48
4.1.1	Spot-Einstellung.....	48
4.1.2	Überprüfung der Drahtfördergeschwindigkeit	49
4.1.3	Überprüfung der Laserleistung am Bearbeitungsort	49
4.1.4	Roboterprogramm schreiben.....	50
4.1.5	Schweißparameter definieren.....	53
4.2	Versuchsdurchführung.....	54
4.2.1	Einzelraupen	54
4.2.1.1	Zufuhrwinkel α	55
4.2.1.2	Zufuhrrichtung β	56
4.2.1.3	Drahtabstand h	56
4.2.1.4	Stickout l	57
4.2.1.5	Position der Drahtspitze auf dem Laserspot: a und b	57
4.2.2	Beschichtungen – Raupen nebeneinander.....	60
4.2.2.1	Einfluss der Überlappungsrate	61
4.2.2.2	Automatisierte Stickout-Herstellung.....	62
4.2.2.3	Maßnahmen zur Herstellung der Prozess-Stabilität bei Beschichtungen	63
4.2.2.4	Überprüfung der Gültigkeit des Parameterfensters für Beschichtungen	68
4.2.3	Wände – Raupen übereinander	68
5	Auswertung der Schweißergebnisse	73
5.1	Einzelraupen.....	73
5.1.1	Drahtzufuhrrichtung β	74
5.1.2	Drahtabstand h	75
5.1.3	Stickout l	77
5.1.4	Auslenkung b in Anhängigkeit von a	79
5.2	Beschichtungen	83
5.2.1	Einfluss von Versatz auf Geometrie	84
5.2.2	Validierung der Toleranzfenster der Positionsparameter.....	85
5.3	Wände	88
5.3.1	Ermittlung der Lagenhöhe.....	89
5.3.2	Minimale Leistung pro Lage	91
6	Diskussion und Ausblick	94
6.1	Einzelraupen.....	94

6.1.1	Winkel β	95
6.1.2	Drahtabstand h	96
6.1.3	Stickout l	99
6.1.4	Auslenkung b in Abhängigkeit von Position a	100
6.2	Beschichtungen	102
6.3	Wände	104
7	Zusammenfassung und Fazit	107
7.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	107
7.2	Fazit	108
8	Quellen	109
9	Anhang.....	113
9.1	Einzelraupen	113
9.1.1	Versuchsreihe „ β “	113
9.1.2	Versuchsreihe „ h “	114
9.1.3	Versuchsreihe „ l “	116
9.1.4	Versuchsreihe „ ab “	117
9.2	Beschichtungen	121
9.2.1	Versuchsreihe „ V “	121
9.2.2	Versuchsreihe „ S “	125
9.3	Wände	127
9.3.1	Wand 1	127
9.3.2	Wand 2	129
9.3.3	Prozesssicherheit der lagenspezifischen Leistung.....	134

I. Abkürzungsverzeichnis

Symbol	Dimension	Bedeutung
a	-	Position im Spot auf der Schweißachse
a_{opt}	-	Optimale Position auf dem Spot in Schweißrichtung
α	°	Anstellwinkel des Drahts gegenüber dem Substrat
A_i	mm ²	Flächeninhalt eines Spots mit dem Durchmesser i
AM		Additive Manufacturing = additive Fertigung
b	mm	Abstand des Drahts von der Spotmittelachse
b_{ist}	mm	Ist-Position für b
b_{opt}	mm	Optimaler Abstand des Drahts von der Spotmittelachse
b_{soll}	mm	Eingestellte Soll-Position für b
β	°	Zufuhrrichtung des Drahts
β_{max}	°	Grenzwert der Zufuhrrichtung
β_{opt}	°	Optimale Zufuhrrichtung
B_n	mm	Breite der Beschichtung bei n Raupen
B_{Raupe}	mm	Breite der Einzelraupe
C		Kohlenstoff
$C_{Graphit}$	%	Kohlenstoffgehalt bei Graphitbeschichtung
C_{ohne}	%	Kohlenstoffgehalt bei nacktem Blech
CO ₂		Kohlenstoffdioxid
cw		continuous wave = Dauerstrich-Betrieb
D_B	mm	Dicke der Beschichtung
d_{Draht}	mm	Drahtdurchmesser
d_f	mm	Durchmesser des Laserstrahls im Fokus
$D_{Graphit}$	mm	Dicke der Beschichtung auf dem Graphit-Blech
d_k	mm	Kerndurchmesser des Faserkabels
D_{Ohne}	mm	Dicke der Beschichtung auf dem nackten Blech
d_{Spot}	mm	Spotdurchmesser auf dem Blech

D_W	mm	Wandstärke
E_i		Energieniveau im Atom
f	mm	Brennweite der Optik
f_c	mm	Brennweite des Kollimators
h	mm	Drahtabstand zum Substrat
h_{ist}	mm	Ist-Drahtabstand
h_{max}	mm	maximal zulässiger Drahtabstand
h_{min}	mm	minimal zulässiger Drahtabstand
h_{opt}	mm	Optimaler Drahtabstand zum Substrat
h_{soll}	mm	Soll-Drahtabstand
H_n	mm	Wandhöhe bei n Lagen
\bar{H}	mm	Durchschnittliche Höhe in der Wandmitte
H_{max}	mm	maximale Höhe in der Wandmitte
$H_{Scan,nach}$	mm	Vom Laserscanner ermittelte Wandhöhe nach dem Ebnen
$H_{Scan,vor}$	mm	Vom Laserscanner ermittelte Wandhöhe vor dem Ebnen
HAW		Hochschule für angewandte Wissenschaften
I_i	W/mm ²	Intensität bei einem Spot mit dem Durchmesser i
IWS		Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik
l	mm	Stickout des Drahts
l_{max}	mm	maximal zulässiger Stickout
l_{opt}	mm	optimaler Stickout
L_{min}	mm	notwendiger Stickout für die automatisierte Stickout-Herstellung
LMD		Laser Metal Deposition
M^2		Strahlkennzahl
MAG		Metall-Aktivgas-Schweißen
MIG		Metall-Inertgas-Schweißen
MSG		Metall-Schutzgas-Schweißen
Mn		Mangan

Nd:YAG		Neodym-dotierter Ytterbium-Aluminium-Granat
P		Phosphor
P_L	W	Eingestellte Laserleistung
$P_{mess,1}$	W	Laserleistung gemessen im optischen Aufbau
$P_{mess,2}$	W	Laserleistung gemessen mit dem Cube
P_{Pol}	%	Polarisationsgrad der Laserstrahlung
pw		pulse wave = Pulsbetrieb
R_a	μm	Oberflächenrauheit
S		Schwefel
Si		Silizium
SPP		Strahlparameterprodukt
SPS	-	Speicherprogrammierbare Steuerung
θ_f	$^\circ$	Divergenzwinkel des fokussierten Strahls
θ_c	$^\circ$	Grenzwinkel für die Totalreflexion
τ_i		Mittlere Verweildauer des Elektrons auf dem Energieniveau E_i
t_{delay_ende}	ms	Verzögerung zwischen Draht und Laser am Ende
t_{delay_start}	ms	Verzögerung zwischen Draht und Laser am Anfang
t_{Puls}	ms	Dauer des Laserpulses
TEM		Transversale elektromagnetische Mode
\dot{V}_{Gas}	l/min	Schutzgasmenge
v_{Draht}	m/s	Drahtfördergeschwindigkeit
$v_{Draht,mess}$	m/s	berechnete Fördergeschwindigkeit
$v_{Draht,sensor}$	m/s	vom Drahtförderer gemessene Fördergeschwindigkeit
$v_{Schweiß}$	mm/s	Schweißgeschwindigkeit
WEZ		Wärmeeinflusszone
WIG		Wolfram-Inertgas-Schweißen
Δx	mm	Versatz zwischen den Raupen bei Beschichtungen
Δz	mm	Versatz zwischen den Lagen bei Wänden

II. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Laserprozess im 3-N-System (links) und 4-N-System (rechts).....	21
Abbildung 2 Grundaufbau eines Lasers	22
Abbildung 3 Leistung über die Zeit im gepulsten (blau) und kontinuierlichen (orange) Betrieb	23
Abbildung 4 Intensitätsverteilungen transversaler Moden für kreisförmige (links; [19]) und rechteckige (rechts; [20]) Strahlen.....	26
Abbildung 5 Lichttransport in einem Glasfaserkabel mit Stufenindex durch Totalreflexion	27
Abbildung 6 Verhalten des Laserstrahls in der Bearbeitungsoptik.....	28
Abbildung 7 Intensitätsverteilung entlang der Strahlachse [12, S. 90]	29
Abbildung 8 Oberfläche nach Beschuss mit Laserimpuls	29
Abbildung 9 Temperaturverteilung und Oberflächenspannung: a) ruhender Spot mit divergenter Strömung, b) ruhender Spot mit konvergenter Strömung, c) bewegter Spot	31
Abbildung 10 Einfluss der Schweißgeschwindigkeit auf die Raupengeometrie [25].....	31
Abbildung 11 Schweißergebnis bei zu hoher (links) und zu niedriger (rechts) Streckenenergie	32
Abbildung 12 Drahtzuführung relativ zur Oberfläche (links) und zur Schweißrichtung (rechts)	33
Abbildung 13 Parameter der Drahtpositionierung in Draufsicht (links) und Seitenansicht (rechts)....	35
Abbildung 14 Auswirkungen durch Abweichung vom optimalen Abstand h (hier $dnom$) [44].....	37
Abbildung 15 Laserstrahlquelle am IWS	38
Abbildung 16 Bearbeitungseinrichtung zum Laserschweißen.....	38
Abbildung 17 Aufbau des Lasers HL 4006D (adaptiert aus [21], S.4-2)	39
Abbildung 18 Kühlplatte mit Zweipunkt-Anschlag	40
Abbildung 19 Drehkipptisch mit Nutenplatte und Spannstock	41
Abbildung 20 Bearbeitungsoptik der Laseranlage: schematisch (links [21]) und real (rechts)	42
Abbildung 21 Einfluss der Kollimatorposition auf die Fokusslage und Strahlgeometrie [21]	42
Abbildung 22 Laserscanner in seiner Vorrichtung.....	43
Abbildung 23 Höhenprofil vom Querschnitt einer Beschichtung mit Maximum im gesamten Bereich (links) bzw. Minimum in ausgewähltem Fenster (rechts)	43
Abbildung 24 Höhenprofil entlang einer Wand mit Maximum (blau) und Minimum (rot).....	44
Abbildung 25 Antriebseinheit DIX FD 100 LS im Detail.....	45
Abbildung 26 Pistolenkopf DIX LKTZ 50 R/55°	45
Abbildung 27 Drahtspulenhalter.....	45
Abbildung 28 Steuerungseinheit FDE 100 L.....	45
Abbildung 29 Ausschnitt aus dem Monitoring-Programm für den Drahtförderer.....	45
Abbildung 30 Drahtförderer und Positioniervorrichtung	46
Abbildung 31 Spots zur Ermittlung der für einen 3mm-Spot notwendigen Kollimation: a) Referenzspot, b) Kollimation +4, c) Kollimation +8, d) Kollimation +4.1	48
Abbildung 32 Kollimation für einen 3mm-Spot bei einem 318mm-Abstand	49
Abbildung 33 Laserleistungs-Messgerät	50
Abbildung 34 Schematischer Ablauf des Roboterprogramms.....	51
Abbildung 35 Schweißergebnis ohne Delay am Anfang und Ende	53
Abbildung 36 Schweißergebnis mit Delays von 100ms (Start) bzw. 300ms (Ende).....	53
Abbildung 37 Winkelmesser mit Nonius am Rohr	55
Abbildung 38 Überprüfung von $hist$ am Beispiel $hsoll = 0,1 mm$	56
Abbildung 39 Stahlmaß als Prüfmittel für die Stickouteinstellung.....	57
Abbildung 40 Überprüfen der Berührungsfreiheit zwischen Drahtdüse und Substrat/Schweißgut....	57
Abbildung 41 Live-Bild der Beobachtungskamera ohne und mit (rechts) Fadenkreuzgenerator	58
Abbildung 42 Validierung der Achsenskalierung mittels Stahlmaß.....	58

Abbildung 43 Positionierung für $b = 0,76 \text{ mm}$	59
Abbildung 44 Einteilung des Spotradius bzgl. des Parameters a	59
Abbildung 45 Positionierung für $a = 1$	59
Abbildung 46 Schematischer Aufbau einer Beschichtung	60
Abbildung 47 Messpunkte zur Ermittlung der Raupenbreite	61
Abbildung 48 Geometrie der Beschichtung auf der Startseite (links)	62
Abbildung 49 Zustände nach dem Durchtrenn-Prozess: keine (links), unvollständige (mittig) und vollständige Durchtrennung (rechts)	63
Abbildung 50 Typischer Fehler bei 10-Raupen-Beschichtungen	63
Abbildung 51 Beschichtung ($n=10, \Delta x = 1,9 \text{ mm}$) auf Graphit-Grundierung	64
Abbildung 52 Beschichtung ($n=10, \Delta x = 1,9 \text{ mm}$) auf sandgestrahltem Blech.....	65
Abbildung 53 Einzelraupe und Beschichtung ($n = 5, \Delta x = 1,5 \text{ mm}$) auf Kreide-Grundierung.....	66
Abbildung 54 Neigung des Laser-Draht-Systems und Versatzrichtung: Ausgangslage (links) und umgekehrte Richtung (rechts).....	66
Abbildung 55 Schweißung mit umgekehrter (1) und gewöhnlicher (2) Versatzrichtung	67
Abbildung 56 Soll-Lage des Drahts (links) und vermutete Ist-Lage beim Schweißen von Beschichtungen bei $h = 0,1 \text{ mm}$	67
Abbildung 57 Lage des Drahts bei $h = 0,5 \text{ mm}$	67
Abbildung 58 Schematischer Aufbau einer Wand (Querschnitt)	68
Abbildung 59 Fünfplagige Wand unter Standardbedingungen - Seitenansicht	69
Abbildung 60 Fünfplagige Wand mit veränderten Delay-Zeiten	69
Abbildung 61 Vierlagige Wand: Seitenansicht (links) und vom Laserscanner ermitteltes Höhenprofil	70
Abbildung 62 Messbereich für den Höhenmittelwert mit den Daten des Höhenprofils	71
Abbildung 63 Referenzraupe geschweißt mit der Optimalpositionierung	73
Abbildung 64 Querschnittsgeometrie von Raupen mit a) schleppender, b) seitlich-schleppender, c) seitlicher, d) seitlich-stechender und e) stechender Drahtzufuhr.	74
Abbildung 65 Raupen mit $h = 0,5 \text{ mm}$	76
Abbildung 66 Richtung der Auslenkung bei der Veränderung von b	79
Abbildung 67 Querschnittsprofil von Beschichtung V5 bei 25% (links) und 75% (rechts) der Raupenlänge.....	85
Abbildung 68 Beschichtung mit Optimalpositionierung (Set S0, Nr. 1; Referenz)	86
Abbildung 69 Beschichtungen mit $h = 0,5 \text{ mm}$ und $\Delta x = 1,5 \text{ mm}$ (oben) bzw. $\Delta x = 1,4 \text{ mm}$	87
Abbildung 70 In früheren Versuchen am IWS mit Laserdrahtauftragschweißen erzeugte Wand von oben und von der Seite aufgenommen.....	88
Abbildung 71 Mit dem Dremel bearbeitete Wandkuppe	89
Abbildung 72 Rohdaten des Laserscanners zum Höhenprofil	89
Abbildung 73 Änderung des Querschnitts entlang von Wand 2 (10 Lagen) im Abstand von 5mm	90
Abbildung 74 Detail von Wand 2 (mit 9 Lagen)	91
Abbildung 75 Schweißergebnis von Set P6 nach Lage 2	91
Abbildung 76 Schweißergebnis von Set P8 nach Lage 3	91
Abbildung 77 Schweißergebnis von Set P10 nach Lage 3	91
Abbildung 78 Toleranzfenster für den Parameter β	95
Abbildung 79 Toleranzfenster für den Drahtabstand h	97
Abbildung 80 Drahtposition bei $h = 1,4 \text{ mm}$ (links) und potenziell vergleichbare Positionierung (rechts) bei $\alpha = 21^\circ$	99
Abbildung 81 Toleranzfenster für den Stickout l und Anpassung von h bei l_{max}	99
Abbildung 82 Toleranzfenster für die Auslenkung b	100
Abbildung 83 Positioniervorrichtung in der Seitenansicht (links) und Basisplatte (rechts)	101
Abbildung 84 Einfluss des Raupenendes auf das Wandende	105

Abbildung 85 Raupe mit $\beta = 0^\circ$ (schleppend; Referenz).....	113
Abbildung 86 Raupe mit $\beta = 45^\circ$ (seitlich-schleppend)	113
Abbildung 87 Raupen mit $\beta = 90^\circ$ (seitlich)	113
Abbildung 88 Raupe mit $\beta = 135^\circ$ (seitlich-stechend).....	113
Abbildung 89 Raupe mit $\beta = 180^\circ$ (stechend).....	113
Abbildung 90 Raupen mit $h = 0,1 \text{ mm}$	114
Abbildung 91 Raupen mit $h = 0,3 \text{ mm}$	114
Abbildung 92 Raupen mit $h = 0,7 \text{ mm}$	114
Abbildung 93 Raupen mit $h = 1 \text{ mm}$	114
Abbildung 94 Raupen mit $h = 1,5 \text{ mm}$	115
Abbildung 95 Raupen mit $h = -0,2 \text{ mm}$	115
Abbildung 96 Raupen mit $h = 0 \text{ mm}$	115
Abbildung 97 Raupen mit $h = 1,2 \text{ mm}$	115
Abbildung 98 Raupe mit $h = 1,4 \text{ mm}$	115
Abbildung 99 Raupen mit $l = 5 \text{ mm}$ (Referenz, Set I0).....	116
Abbildung 100 Raupen mit $l = 7,5 \text{ mm}$ (Set I1).....	116
Abbildung 101 Raupen mit $l = 10 \text{ mm}$ (Set I2).....	116
Abbildung 102 Raupen mit $l = 12,5 \text{ mm}$ (Set I3).....	116
Abbildung 103 Raupen mit $l = 15 \text{ mm}$ (Set I4).....	117
Abbildung 104 Raupen mit $l = 12,5 \text{ mm}$ und $h = 0,7 \text{ mm}$ (Set I5)	117
Abbildung 105 Raupen mit $l = 12,5 \text{ mm}$ und $h = 1 \text{ mm}$ (Set I6)	117
Abbildung 106 Raupe mit $a = 1$ und $b = 0,5 \text{ mm}$ (Set ab0; Referenz).....	117
Abbildung 107 Raupe mit $a = 1$ und $b = 0,53 \text{ mm}$ (Set ab1).....	117
Abbildung 108 Raupe mit $a = 1$ und $b = 0,61 \text{ mm}$ (Set ab2).....	117
Abbildung 109 Raupen mit $a = 1$ und $b = 0,65 \text{ mm}$ (Set ab3).....	118
Abbildung 110 Raupen mit $a = 1$ und $b = 0,69 \text{ mm}$ (Set ab4).....	118
Abbildung 111 Raupen mit $a = 1$ und $b = 0,73 \text{ mm}$ (Set ab5).....	118
Abbildung 112 Raupen mit $a = 1$ und $b = 0,76 \text{ mm}$ (Set ab6).....	118
Abbildung 113 Raupe mit $a = 2$ und $b = 0,8 \text{ mm}$ (Set ab11).....	118
Abbildung 114 Raupe mit $a = 2$ und $b = 0,76 \text{ mm}$ (Set ab10).....	118
Abbildung 115 Raupe mit $a = 2$ und $b = 0,73 \text{ mm}$ (Set ab9).....	118
Abbildung 116 Raupen mit $a = 2$ und $b = 0,69 \text{ mm}$ (Set ab8).....	119
Abbildung 117 Raupe mit $a = 2$ und $b = 0,65 \text{ mm}$ (Set ab7).....	119
Abbildung 118 Raupe mit $a = 3$ und $b = 0,65 \text{ mm}$ (Set ab12).....	119
Abbildung 119 Raupe mit $a = 3$ und $b = 0,69 \text{ mm}$ (Set ab13).....	119
Abbildung 120 Raupen mit $a = 3$, $b = 0,65 \text{ mm}$ und $h = 1 \text{ mm}$ (Set ab14).....	119
Abbildung 121 Raupe mit $a = 2$, $b = 0,65 \text{ mm}$ und $h = 1 \text{ mm}$ (Set ab15).....	119
Abbildung 122 Raupe mit $a = 1$, $b = 0,65 \text{ mm}$ und $h = 1 \text{ mm}$ (Set ab16).....	119
Abbildung 123 Raupe mit $a = 1$, $b = 0,65 \text{ mm}$ und $h = 0,7 \text{ mm}$ (Set ab17).....	120
Abbildung 124 Raupe mit $a = 3$, $b = 0,65 \text{ mm}$, $h = 0,7 \text{ mm}$ und $l = 12,5 \text{ mm}$ (Set ab18)	120
Abbildung 125 Raupe mit $a = 2$, $b = 0,65 \text{ mm}$, $h = 0,7 \text{ mm}$ und $l = 12,5 \text{ mm}$ (Set ab19)	120
Abbildung 126 Raupe mit $a = 1$, $b = 0,65 \text{ mm}$, $h = 0,7 \text{ mm}$ und $l = 12,5 \text{ mm}$ (Set ab20)	120
Abbildung 127 Raupen mit $a = 1$, $b = 0,65 \text{ mm}$, $h = 0,7 \text{ mm}$ und $l = 10 \text{ mm}$ (Set ab21)	120
Abbildung 128 Raupe mit $a = 1$, $b = 0,65 \text{ mm}$, $h = 0,5 \text{ mm}$ und $l = 10 \text{ mm}$ (Set ab22)	120
Abbildung 129 Raupe mit $a = 1$, $b = 0,65 \text{ mm}$, $h = 0,5 \text{ mm}$ und $l = 12,5 \text{ mm}$ (Set ab23)	120
Abbildung 130 Raupe mit $a = 3$, $b = 0,65 \text{ mm}$, $h = 0,5 \text{ mm}$ und $l = 12,5 \text{ mm}$ (Set ab24)	120
Abbildung 131 Beschichtung mit $\Delta x = 1,5 \text{ mm}$ und $h = 0,5 \text{ mm}$ (Set V1)	121
Abbildung 132 Beschichtung mit $\Delta x = 1,6 \text{ mm}$ und $h = 0,5 \text{ mm}$ (Set V2)	121
Abbildung 133 Beschichtung mit $\Delta x = 1,7 \text{ mm}$ und $h = 0,5 \text{ mm}$ (Set V3)	121

Abbildung 134 Beschichtung mit $\Delta x = 1,8 \text{ mm}$ und $h = 0,5 \text{ mm}$ (Set V4)	121
Abbildung 135 Beschichtung mit $\Delta x = 1,4 \text{ mm}$ und $h = 0,5 \text{ mm}$ (Set V5)	121
Abbildung 136 Beschichtung mit $\Delta x = 1,4 \text{ mm}$ und $h = 1 \text{ mm}$ (Set V6).....	122
Abbildung 137 Beschichtung mit $\Delta x = 1,3 \text{ mm}$ und $h = 1 \text{ mm}$ (Set V7).....	122
Abbildung 138 Beschichtung mit $\Delta x = 1,9 \text{ mm}$ und $h = 0,5 \text{ mm}$ (Set V8)	122
Abbildung 139 Beschichtung mit $\Delta x = 2 \text{ mm}$ und $h = 0,5 \text{ mm}$ (Set V9)	122
Abbildung 140 Beschichtungen ($n=5$) mit $\Delta x = 1,5 \text{ mm}$ und $h = 0,1 \text{ mm}$	122
Abbildung 141 Beschichtungen ($n=5$) mit $\Delta x = 1,4 \text{ mm}$ und $h = 0,1 \text{ mm}$	123
Abbildung 142 Beschichtung ($n=10$) mit $\Delta x = 1,6 \text{ mm}$ und $h = 0,1 \text{ mm}$	123
Abbildung 143 Beschichtung ($n=10$) mit $\Delta x = 1,7 \text{ mm}$ und $h = 0,1 \text{ mm}$	123
Abbildung 144 Beschichtung ($n=10$) mit $\Delta x = 1,8 \text{ mm}$ und $h = 0,1 \text{ mm}$	123
Abbildung 145 Beschichtung ($n=10$) mit $\Delta x = 1,9 \text{ mm}$ und $h = 0,1 \text{ mm}$	124
Abbildung 146 Beschichtungen ($n=10$) mit $\Delta x = 2 \text{ mm}$ und $h = 0,1 \text{ mm}$	124
Abbildung 147 Beschichtungen mit Set S0 zur Überprüfung der Anlagenfunktionalität	125
Abbildung 148 Beschichtung mit $\alpha = 90^\circ$ (Set S1)	125
Abbildung 149 Beschichtung mit $h = 0,7 \text{ mm}$ (Set S2).....	125
Abbildung 150 Beschichtung mit $l = 12,5 \text{ mm}$ (Set S3)	125
Abbildung 151 Beschichtung mit $l = 10 \text{ mm}$ (Set S4)	126
Abbildung 152 Beschichtung mit $b = 0,7 \text{ mm}$ (Set S5).....	126
Abbildung 153 Beschichtungen mit $b = 0,66 \text{ mm}$ (Set S6)	126
Abbildung 154 Wand 1 nach dem Schweißen von Lage 3	127
Abbildung 155 Wand 1 nach dem Schweißen von Lage 4	127
Abbildung 156 Detailaufnahme von Wand 1 nach dem Schweißen von Lage 5	127
Abbildung 157 Wand 1 nach dem Schweißen von Lage 6	127
Abbildung 158 Wand 1 nach dem Schweißen von Lage 7	127
Abbildung 159 Höhenprofil von Wand 1 bei 4 Lagen	127
Abbildung 160 Höhenprofil von Wand 1 bei 4 Lagen nach dem Ebnen	128
Abbildung 161 Höhenprofil von Wand 1 bei 5 Lagen	128
Abbildung 162 Höhenprofil von Wand 1 bei 5 Lagen nach dem Ebnen	128
Abbildung 163 Höhenprofil von Wand 1 bei 6 Lagen	128
Abbildung 164 Höhenprofil von Wand 1 bei 6 Lagen nach dem Ebnen	128
Abbildung 165 Wand 2 nach dem Schweißen von Lage 2	129
Abbildung 166 Wand 2 nach dem Schweißen von Lage 3	129
Abbildung 167 Wand 2 nach dem Schweißen von Lage 5	129
Abbildung 168 Wand 2 nach dem Schweißen von Lage 7 von der Seite und von oben.....	129
Abbildung 169 Wand 2 nach dem Schweißen von Lage 9	129
Abbildung 170 Wand 2 nach dem Schweißen von Lage 10	129
Abbildung 171 Höhenprofil von Wand 2 nach dem Schweißen von Lage 1	130
Abbildung 172 Höhenprofil von Wand 2 nach dem Schweißen von Lage 2	130
Abbildung 173 Höhenprofil von Wand 2 mit zwei Lagen nach dem Ebnen	130
Abbildung 174 Höhenprofil von Wand 2 nach dem Schweißen von Lage 3	130
Abbildung 175 Höhenprofil von Wand 2 mit drei Lagen nach dem Ebnen	131
Abbildung 176 Höhenprofil von Wand 2 nach dem Schweißen von Lage 4	131
Abbildung 177 Höhenprofil von Wand 2 mit vier Lagen nach dem Ebnen.....	131
Abbildung 178 Höhenprofil von Wand 2 nach dem Schweißen von Lage 5	131
Abbildung 179 Höhenprofil von Wand 2 mit fünf Lagen nach dem Ebnen	132
Abbildung 180 Höhenprofil von Wand 2 nach dem Schweißen von Lage 6	132
Abbildung 181 Höhenprofil von Wand 2 mit sechs Lagen nach dem Ebnen.....	132
Abbildung 182 Höhenprofil von Wand 2 nach dem Schweißen von Lage 7	132

Abbildung 183 Höhenprofil von Wand 2 mit sieben Lagen nach dem Ebenen	133
Abbildung 184 Höhenprofil von Wand 2 nach dem Schweißen von Lage 8	133
Abbildung 185 Höhenprofil von Wand 2 mit acht Lagen nach dem Ebenen.....	133
Abbildung 186 Höhenprofil von Wand 2 nach dem Schweißen von Lage 9	133
Abbildung 187 Höhenprofil von Wand 2 mit neun Lagen nach dem Ebenen	134
Abbildung 188 Höhenprofil von Wand 2 nach dem Schweißen von Lage 10.....	134
Abbildung 189 In Serie geschweißte Wände nach Lage 3, Draufsicht.....	134
Abbildung 190 In Serie geschweißte Wände nach Lage 3, Seitenansicht.....	135
Abbildung 191 In Serie geschweißte Wände nach Lage 4, Draufsicht.....	135
Abbildung 192 In Serie geschweißte Wände nach Lage 4, Seitenansicht.....	135
Abbildung 193 Höhenprofil von Wand a nach Lage 3	135
Abbildung 194 Höhenprofil von Wand a nach Lage 4	135

III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Hauptgruppen der Fertigungsverfahren gemäß DIN 8580.....	17
Tabelle 2 Klassifikation von metallverarbeitenden AM-Verfahren.....	19
Tabelle 3 Kennwerte der Bearbeitungsoptik am IWS.....	41
Tabelle 4 Chemische Zusammensetzung der verwendeten Werkstoffe in Massen-Prozent [%].....	47
Tabelle 5 Messreihe zur Überprüfung der Laserleistung am Bearbeitungsort.....	50
Tabelle 6 Schweißparameterset	53
Tabelle 7 Optimale Einstellungen der Drahtzufuhr und -positionierung.....	54
Tabelle 8 Parameterstudie zum laserbasierten Drahtdurchtrennen.....	63
Tabelle 9 Chemische Zusammensetzung des Schweißguts mit und ohne Graphit-Behandlung des Substrats.....	65
Tabelle 10 Parameter zum Schweißen der einzelnen Lagen von Wand 1	70
Tabelle 11 Parameter zum Schweißen der einzelnen Lagen von Wand 2	72
Tabelle 12 Versuchsreihe „ β “ zur Ermittlung des Toleranzfensters bei der Drahtzufuhrrihtung.....	74
Tabelle 13 Versuchsreihe „ h “ zur Ermittlung des Toleranzfensters bezüglich der Höhe h	75
Tabelle 14 Versuchsreihe „ l “ zur Ermittlung des Toleranzfensters bezüglich des Stickouts l	78
Tabelle 15 Versuchsreihe „ ab “ zur Ermittlung des Toleranzfensters von der Kombination aus den Parametern a und b	80
Tabelle 16 Fortsetzung der Messreihe „ ab “: Kombination mit h und l	82
Tabelle 17 Toleranzfenster der Drahtpositionierung bei Raupen	82
Tabelle 18 Bewertungscluster für Beschichtungen.....	83
Tabelle 19 Versuchsreihe „ V “ zum Einfluss des Versatzes auf Geometrie und Qualität	84
Tabelle 20 Versuchsreihe „ S “ zur Überprüfung der Gültigkeit der Toleranzfenster von Raupen	86
Tabelle 21 Toleranzfenster der Positionsparameter bei Beschichtungen	88
Tabelle 22 Versuchsreihe „ P “ zur Ermittlung der pro Lage minimal notwendigen Laserleistung	92
Tabelle 23 Überprüfung der Prozesssicherheit der Ergebnisse von Versuchsreihe P	93

1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen einer Kooperation der Firma Dinse GmbH mit dem Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik (IWS) der HAW Hamburg. Die Aufgabenstellung wurde gemeinsam mit Dinse erarbeitet unter Berücksichtigung aktueller, praxisrelevanter Fragestellungen. Die Versuche wurden am IWS durchgeführt, weil Dinse selbst nicht über eine Laseranlage verfügt.

1.1 DINSE GmbH

Die Firma DINSE GmbH ist ein 1954 gegründeter Hersteller von Schweißausrüstung mit Sitz in Hamburg. Mit mehr als 20 Auslandsvertretungen sowie der in den USA gegründeten Tochtergesellschaft DINSE Inc. agieren sie mittlerweile weltweit. Angefangen hat das Unternehmen mit der Entwicklung und Produktion von Schweißkabelkupplungen. Inzwischen reicht das Portfolio von Stromquellen über Garnituren bis hin zu Drahtförderern für manuelles sowie automatisiertes Schweißen (MIG/MAG und WIG). Mit speziell für laserbasierte Anwendungen entwickelten Drahtvorschubsystemen konnte auch der Markt des Laserschweißens erschlossen werden. Darüber hinaus können Unternehmen Dienstleistungen in Anspruch nehmen, angefangen bei der Planung, Umsetzung und Inbetriebnahme von Schweißsystemen bis hin zu auf Kundenbedürfnisse individuell zugeschnittene Sonderlösungen sowie Schulungen zur Produktintegration.

1.2 Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik

Das IWS beheimatet die Lehre und Forschung von u.a. Werkstoffkunde, Werkstoffprüfung und Füge-technik. Daneben arbeitet das IWS regelmäßig in Forschungsprojekten mit Partnern aus der Industrie und Wissenschaft zusammen. Die Laborausstattung bietet den Studierenden die Möglichkeit, in Lehrveranstaltungen sowohl traditionelle als auch „neuezeitliche“, hochmoderne Verfahren kennenzulernen und sich in Projekten selbstständig damit zu beschäftigen. Die Fragestellungen decken Grundlagenforschung und anwendungsorientierte Themen gleichermaßen ab. Mit der Umrüstung bestehender Anlagen und Investition in neue Technik erweiterte das IWS sein Verfahrensspektrum um die metallische additive Fertigung. In diesem Zuge wurde auch das roboterbasierte Laserschweißen mit Draht und Pulver ermöglicht.

1.3 Kooperation zwischen DINSE und dem IWS

Bereits in der Vergangenheit haben das IWS und Dinse zusammengearbeitet, z.B. bei Workshops zum Thema Schweißen und additive Fertigung. Zudem fanden am IWS Schulungen für Integratoren von Dinse-Produkten statt, um den Einsatz des Drahtfördersystems beim Laserauftragschweißen zu

demonstrieren. Aktuell wird in dem Projekt MeriTec die Mensch-Roboter-Interaktion für das ferngesteuerte Schweißen erforscht.

1.4 Motivation und Zielsetzung

Das Laserdrahtauftragschweißen steckt verglichen mit anderen Technologien der additiven Fertigung noch in den Kinderschuhen, gewinnt aber zusehends an Bedeutung. Draht hat gegenüber Pulver einige Vorteile wie eine bessere Oberflächenqualität des Endprodukts, einen effizienteren Materialeinsatz und eine höhere Auftragsrate. Andererseits spielen die Zuführung und Positionierung des Drahts relativ zum Laserstrahl eine entscheidende Rolle bei der Prozesssicherheit und Qualität des Produkts. Für einige der relevanten Parameter ist aus der Forschungsliteratur bereits ein Optimum bekannt. Einige Parameter wiederum finden kaum oder gar keine Beachtung in bisherigen Arbeiten. Für die Fertigung ist im Allgemeinen von Interesse, wie genau dieses jeweilige Optimum eingehalten werden muss, da eine exakte Positionierung aufwändig und dadurch teuer ist. Ziel dieser Bachelorthesis ist es, für die Drahtpositionierung und Drahtzuführung beim Laserauftragschweißen Parameterfenster empirisch zu ermitteln, mit denen sich reproduzierbar Raupen, Beschichtungen und Wände herstellen lassen. Die Studie soll Dinse dabei unterstützen, das Prozessverständnis bezüglich des Laserdrahtauftragschweißens zu vertiefen und die gewonnenen Erkenntnisse in die Produktentwicklung einfließen zu lassen. Zudem ermöglichen die Ergebnisse eine ausführlichere Kundenberatung und im Bedarfsfall die Einschätzung, ob Performanceeinbußen am Dinse-Produkt liegen oder z.B. an der Positionierung.

2 Additive Fertigung mittels Laserauftragschweißen

In der additiven (oder auch generativen) Fertigung (AM = Additive Manufacturing) entstehen dreidimensionale, endkonturnahe Komponenten, indem ein Werkstoff schicht- oder elementweise aufgetragen und mit der schon aufgebauten Substanz verbunden wird [1]. Ausgangspunkt ist ein CAD-Modell des Bauteils, welches virtuell in „Scheiben geschnitten“ wird, weshalb AM-Technologien auch Schichtbauverfahren heißen [2]. Eine Schicht setzt sich gegebenenfalls aus mehreren, nebeneinanderliegenden Bahnen (auch Raupen genannt) zusammen. Die Schichtdicke reicht abhängig von Verfahren und Werkstoff von einigen Mikrometern bis hin in den Milimeterbereich [3]. Grundsätzlich gilt, dass je dünner die Schicht ist, umso näher ist das gefertigte Bauteil an der Soll-Geometrie. Der Ursprung der additiven Fertigung liegt im 3D-Druck [4]. Den Grundstein bildete die bereits Anfang der 80er-Jahre erfundene Stereolithographie zur Verarbeitung von Kunststoffen, auf die bald weitere Verfahren folgten, die die Verarbeitung auch anderer Werkstoffe ermöglichten. In der Anfangszeit dienten die additiv gefertigten Komponenten primär als Prototyp, auch weil die Bauteile häufig noch eine vergleichsweise poröse Struktur aufwiesen [5] und sich daher nicht für den Einsatz unter Belastung eigneten. Durch stetige Weiter- und Neuentwicklungen von Verfahren wurde die Herstellung massiver Bauteilen nahezu jedweder Geometrie mit guten mechanischen Eigenschaften möglich. Mittlerweile hat die additive Fertigung Einzug gehalten in viele Verschiedene Branchen der Industrie wie Maschinenbau, Medizintechnik oder Raumfahrt.

2.1 Additive Fertigung

Im Hinblick auf die DIN 8580 [6] zur Klassifizierung von Fertigungsverfahren (Tabelle 1) werden AM-Technologien der Hauptgruppe 1 zugeordnet, zu der unter anderem auch das Gießen und Sintern gehört. „Urformen“ ist per Definition das „Fertigen eines festen Körpers aus formlosem Stoff durch Schaffen des Zusammenhaltes; hierbei treten die Stoffeigenschaften des Werkstückes bestimmbar in Erscheinung“ [6, S.4].

Tabelle 1 Hauptgruppen der Fertigungsverfahren gemäß DIN 8580

Schaffen der Form	Ändern der Form				Ändern der Stoffeigenschaften
	Zusammenhalt beibehalten	Zusammenhalt vermindern	Zusammenhalt vermehren		
Hauptgruppe 1 Urformen	Hauptgruppe 2 Umformen	Hauptgruppe 3 Trennen	Hauptgruppe 4 Fügen	Hauptgruppe 5 Beschichten	Hauptgruppe 6 Stoffeigenschaften ändern

Eine weitere Möglichkeit zur Beschreibung additiver Verfahren bietet die Abgrenzung von substraktiven und formativen Verfahren. Substraktive Verfahren, wie Drehen und Fräsen, zeichnen

sich dadurch aus, dass die Zielgeometrie durch Werkstoffabtrag aus einem bestehenden Volumen (Halbzeug) quasi herausgeschnitten wird. Formative Verfahren, wie Schmieden oder Tiefziehen, geben einem Halbzeug unter der Bedingung der Volumenkonstanz eine neue Geometrie. Additive Verfahren erzeugen die Geometrie demnach durch Hinzufügen und Verbinden einzelner Volumenelemente. Letztere können zusätzlich nach dem Zweck unterteilt werden in die Herstellung von Prototypen und Modellen (Rapid Prototyping), Produkten (Rapid Manufacturing) und Werkzeugen (Rapid Tooling) [2].

2.1.1 Vorteile der additiven Fertigung

Die Vorteile der additiven Fertigung gegenüber herkömmlichen subtraktiven und formativen Fertigungsverfahren zeigen sich in wirtschaftlichen, ökologischen und konstruktiven Aspekten. Im Allgemeinen bedeuten AM-Verfahren eine Reduzierung von Material- und Energieverbrauch sowie der Produktionszeit. Auch der CO₂-Fußabdruck ist häufig geringer [4]. Im Vergleich zur spanenden Herstellung, bei der das gesamte abgetragene Material entsorgt werden muss, fällt in der AM in der Regel kaum Abfall an [7]. Zudem kann auf Kühlschmierstoffe verzichtet werden. Im Gegensatz zum Gießen oder Schmieden braucht man keine Form, durch deren Herstellungskosten formative Verfahren im Prinzip nur für hohe Stückzahlen wirtschaftlich sind. Die additive Fertigung ist deswegen insbesondere für Einzelanfertigungen attraktiv, z.B. bei medizinischen Implantaten. Darüber hinaus herrscht bei der Gestaltung der Bauteile eine konkurrenzlose Freiheit [8], sodass mit AM-Technologien ausgeklügelte Geometrien realisiert werden können wie z.B. Komponenten mit komplizierten Kühlkanälen, deren Herstellung mit den herkömmlichen Methoden nicht möglich ist.

2.1.2 AM-Verfahren

Inzwischen existiert ein breites Spektrum an AM-Technologien, die sich hinsichtlich der Art und Form des Werkstoffs unterscheiden sowie in dem Bindemechanismus zwischen den einzelnen Volumenelementen und gegebenenfalls der Energiequelle. Mit den verschiedenen Verfahren lassen sich Metalle, Polymere, Keramiken, Verbundwerkstoffe und auch biologisches Gewebe verarbeiten [9]. Zu den für AM üblichen Metallen zählen unter anderem Stahl, Aluminiumlegierungen, Titan(-legierungen) und Nickelbasislegierungen (z.B. Inconel) [5]. Der Ausgangswerkstoff kann vor Prozessbeginn prinzipiell in allen drei Aggregatzuständen vorliegen. Wird der Werkstoff in fester Form zugeführt, gibt es verschiedene Methoden das Volumen schichtweise aufzubauen. Metallverarbeitende AM-Verfahren werden gemäß der ASTM-Norm F2792 (ASTM = American Society for Testing and Material) in vier Untergruppen eingeteilt [10], die in Tabelle 2 mit Beispielformen und Form des Ausgangswerkstoffs aufgeführt sind. Die meisten und bedeutendsten Verfahren kommen aus den Gruppen (1) und (2). Sie haben gemeinsam, dass der zugeführte Werkstoff örtlich begrenzt durch An- bzw. Aufschmelzen mit dem Untergrund verbunden wird. In Pulverbett-Verfahren

wird für jede neue Lage auf der gesamten xy-Ebene Pulver aufgetragen, unabhängig davon, wo tatsächlich Bedarf besteht.

Tabelle 2 Klassifikation von metallverarbeitenden AM-Verfahren

Klassifikation	Verfahren	Werkstoff
(1) Pulverbett-Verfahren (Powder bed fusion)	- Direct metal laser sintering (DMLS) - Electron/Laser beam melting (EBM/LBM)	Pulver
(2) Auftragschweißen (Directed metal deposition = DMD)	- Wire and arc additive manufacturing (WAAM) - Laser metal deposition (LMD) - Plasma-transferred-Arc (PTA)	Pulver oder Draht
(3) 3D-Druck (Binder Jetting)	- Powder bed and inkjet 3D printing (3DP)	Pulver
(4) Blechkaschierung (sheet lamination)	- Laminated object manufacturing (LOM)	Blech oder Folie

Solche Verfahren werden hauptsächlich bei kleinen Bauteilen eingesetzt, weil die Schichtdicke relativ klein ist (bis 200 µm) [5] und große Bauteile auf Grund der dadurch langen Fertigungszeit nicht wirtschaftlich herstellbar sind. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt darin, dass Bauteile in hoher Auflösung gefertigt werden können und Hohlräume möglich sind [9]. Nachteilig ist jedoch, dass es auch für letztendlich kleine Bauteile große Mengen an Pulver und entsprechend große Speicher braucht, um den kompletten Bearbeitungsraum zu füllen. Beim Auftragschweißen hingegen wird das Pulver oder der Draht über eine Düse nur direkt am Bedarfsort zugeführt. Dadurch sind solche Anlagen flexibler bezüglich der Anwendung und in verschiedenen Schweißpositionen einsetzbar. Mit Schichten von bis zu 1 mm Dicke können deutlich höhere Auftragsraten (bis zu 300 cm³/h) erreicht werden verglichen mit den Pulverbett-Verfahren. Deswegen eignen sich solche Verfahren insbesondere für große Bauteilvolumen (je nach Verfahren Kantenlängen im Bereich 1000mm und mehr möglich) [5, 9]. Technologien zum Auftragschweißen lassen sich zusätzlich hinsichtlich der eingesetzten Energiequelle (Laser, Lichtbogen, Elektronenstrahl, Plasma, ...) unterscheiden. Laserbasierte Anwendungen nehmen mittlerweile auf Grund der vielen Vorteile eine führende Rolle ein.

2.2 Werkzeug Laser

Seit in den 1960ern erstmalig die erfolgreiche Anregung verschiedener Lasertypen gelang, wurden Laserquellen stetig weiterentwickelt bzw. Methoden neu erfunden. Inzwischen ist Laserlicht aus der modernen Fertigung ebenso wenig wegzudenken wie aus anderen Bereichen wie Medizin, Messtechnik oder Unterhaltung. Trotz der vergleichsweise hohen Investitionskosten für Lasersysteme (Quelle, Kühlsystem, Bearbeitungszelle, usw.) überzeugt die Lasermaterialbearbeitung wegen ihrer Vorteile gegenüber herkömmlichen Fertigungstechniken. Das berührungslos arbeitende Werkzeug ermöglicht hohe Fertigungsgeschwindigkeiten und sehr gute Bearbeitungsqualitäten, unter anderem auch, weil die Notwendigkeit der Nacharbeit reduziert ist. Wegen der guten Zugänglichkeit lassen sich mit Lasern auch vielfältige, sonst schwer zugängliche Geometrien bearbeiten [11].

2.2.1 Entstehung von Laserlicht

Das Wort LASER ist ein Akronym und steht für **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation, bedeutet also Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung. Genauer genommen beschreibt der Name also schon den Prozess, wie Laserlicht entsteht. Licht im Allgemeinen entsteht, wenn ein Elektron eines Atoms aus dem angeregten, instabilen Zustand höherer Energie auf sein stabiles Ursprungsniveau zurückfällt. Die zuvor aufgenommene Energie (Absorption) wird dabei wieder freigesetzt (Emission) in Form eines Photons, dessen Frequenz proportional zur Energiedifferenz zwischen den Zuständen ist [12]. Aus der Frequenz und der Photonengeschwindigkeit ergibt sich die Wellenlänge des Lichts.

Man unterscheidet spontane und induzierte Emission. Spontane Emission ist im Wesentlichen dadurch gekennzeichnet, dass Zeitpunkt, Phase, Polarisation und Richtung des ausgesendeten Photons zufällig sind. Auf diese Weise entstandene Strahlung ist also immer inkohärent [13]. Bei der induzierten (oder auch stimulierten) Emission, welche die Grundlage für Laser-Prozesse bildet, wird die Rückkehr des Elektrons zu seinem Grundniveau durch ein auf das Atom treffende Photon ausgelöst – vorausgesetzt dessen Energie entspricht der Energiedifferenz zwischen den beiden Schalen E_m und E_n . Das emittierte Photon bewegt sich gemeinsam mit dem auftreffenden Photon weiter und hat dabei die identische Frequenz, Phasenlage sowie Ausbreitungs- und Polarisationsrichtung, d.h. der Lichtstrahl wurde verstärkt [12].

In einem Laser werden die Atome bzw. Moleküle in einem laseraktiven Medium gezielt durch Energiezufuhr – genannt „Pumpen“ – angeregt. Die emittierten Lichtstrahlen werden von einem Spiegelsystem – genannt Resonator – reflektiert, sodass sie das laseraktive Medium immer wieder durchlaufen und bei jedem Zusammentreffen mit einem angeregten Atom induzierte Emission auslösen können. Voraussetzung für einen erfolgreichen Laserprozess ist die Erfüllung der beiden Laserbedingungen [13]:

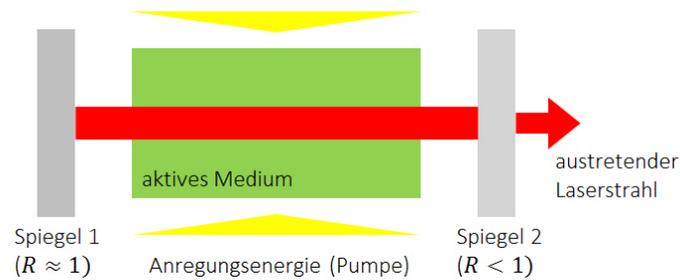


Abbildung 2 Grundaufbau eines Lasers

Die „Pumpe“ startet den Laserprozess. Sie hat die Aufgabe, die Elektronen der Atome im laseraktiven Medium auf höheres Energieniveau zu heben. Die Pumpenergie kann optischer, elektrischer oder chemischer Natur sein [12]. Anhand der sich daraus ergebenden Methoden der Anregung können Laser kategorisiert werden. In der Literatur finden sich verschiedene Klassifikationssysteme [1, 2, 14, 15]. Eichler & Eichler [15] schlagen in sieben Kategorien vor:

- optisch gepumpte Laser (Blitz-/kontinuierliche Lampe, anderer Laser, Leuchtdiode)
- elektronenstrahlgepumpte Laser (z.B. bei Sonderformen der Gas- und Halbleiterlaser)
- Gasentladungslaser (z.B. in Glimm-, Bogen-, Hohlkathodenentladungen)
- Injektionslaser oder Diodenlaser (Stromdurchgang in einem Halbleiter)
- chemische Laser (chemische Reaktion)
- gasdynamische Laser (Expansion eines heißen Gases)
- nuklear gepumpte Laser (Strahlung aus einem Atomreaktor oder einer Nuklearexplosion)

Das laseraktive Medium kann in verschiedenen Stoffen, Bauweisen, Aggregatzuständen und geometrischen Formen vorliegen. Meist unterscheidet man zwischen [15]:

- Festkörperlaser in Stab-, Scheiben- oder Faserform (z.B. Nd:YAG, Rubinlaser)
- Gaslaser (z.B. CO₂, Excimer)
- Flüssigkeitslaser (z.B. Farbstofflaser)
- Freie-Elektronen-Laser (auch Röntgenlaser genannt)
- Halbleiter- bzw. Diodenlaser werden zum Teil zu den Festkörperlaser gezählt und zum Teil als eigenständige Kategorie angeführt.

Das Medium legt die Wellenlänge des erzeugten Lichts fest, weil die Energiedifferenz zwischen den Laserniveaus stoffabhängig ist. Viele laseraktive Medien können verschiedenfarbiges Licht erzeugen, je nachdem zwischen welchen Energieniveaus der Laserprozess stattfindet. Beispielsweise kann ein He-Ne-Laser Licht im grünen (534 nm), roten (632 nm), nahen IR (1150 nm) und mittleren IR (3390 nm) Bereich produzieren [15]. Die Gesamtheit der in einem Medium erzeugbaren Wellenlängen heißt

Bandbreite. In der Regel spricht ein Medium allerdings besonders gut auf die Anregung mit einer Wellenlänge an, die als charakteristische Wellenlänge bezeichnet wird. Geschieht das Anschwingen auf mehreren Linien gleichzeitig, spricht man vom Mehrlinienbetrieb. Häufig ist dies unerwünscht und wird mit dem Einsatz von speziellen dielektrisch beschichteten Resonatorspiegeln unterbunden, die das Anschwingen nur einer Linie zulassen. Für kurze Laserimpulse hingegen ist der Mehrlinienbetrieb sogar notwendig [13].

Ein Resonator besteht aus zwei oder mehr Spiegeln, wobei deren Anordnung und Form maßgeblich Eigenschaften bestimmen wie die auskoppelbare Leistung, Kohärenz oder Intensitätsverteilung [13]. Zwischen den Spiegeln bildet sich eine stehende Welle, die zu charakteristischen räumlichen Schwingungsmustern führt, genannt Modenstruktur (vgl. Abschnitt 2.2.3.1). Resonatoren können stabil oder instabil sein. Stabilität ist gegeben, wenn ein parallel zur Mittelachse verlaufender Lichtstrahl auch nach unendlich vielen Reflexionen an den Spiegeln den Resonator nicht verlässt [14]. Hierbei bildet sich eine stehende Welle zwischen den Spiegeln. Die Auskoppelung des Laserstrahls wird nur dadurch möglich, dass ein Spiegel teildurchlässig ist (d.h. Reflektivität $R < 1$). Bei instabilen Resonatoren sind beide Spiegel hoch reflektiv ($R \approx 1$), allerdings so geformt und angeordnet, dass auch ein achsparalleler Laserstrahl nach n Reflexionen den Resonator verlässt. Diese Art von Resonatoren kommt typischerweise bei Hochleistungslasern zum Einsatz.

2.2.2.1 Betriebsarten

Die Betriebsart entscheidet darüber, wie sich der Laserleistung über die Zeit verhält (Abbildung 3). Im kontinuierlichen (cw = continuous wave, auch Dauerstrich) Betrieb wird ununterbrochen Laserstrahlung emittiert, deren Leistung nahezu konstant ist. Moderne Laser halten die Schwankungen unter 2% bezogen auf den Sollwert [13]. Dauerstrichlaser brauchen ein 4-N-System, um effizient die BI wie benötigt konstant aufrechtzuerhalten, sodass nicht jedes Medium einsetzbar ist [16]. Der Vorteil von Dauerstrich-Lasern liegt in der erreichbaren geringen Bandbreite und hohen Leistungs- und Frequenzstabilität [17].

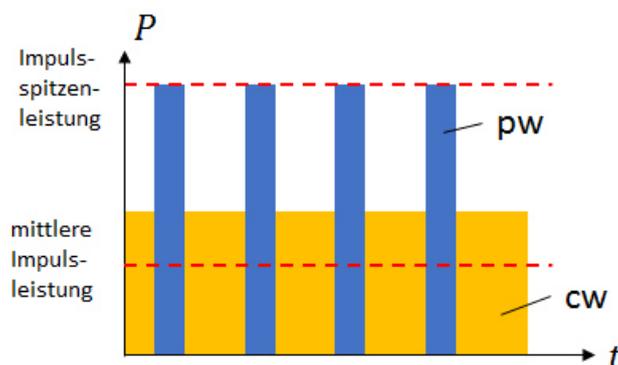


Abbildung 3 Leistung über die Zeit im gepulsten (blau) und kontinuierlichen (orange) Betrieb

Im Pulsbetrieb (pw = pulse wave) wird das aktive Medium nur in periodischen Abständen angeregt, dementsprechend wechselt die abgegebene Leistung zwischen 0W und der Impulsspitzenleistung. Ein 3-N-System ist dafür ausreichend. Die Impulsspitzenleistung kann zwar deutlich höhere Werte annehmen als die Leistung im kontinuierlichen Betrieb, die mittlere Leistung im Pulsbetrieb ist jedoch geringer. Mittlerweile lassen sich Pulsdauern von wenigen Femtosekunden (10^{-5} s) erzeugen [13]. Puls laser werden insbesondere dort eingesetzt, wo eine hohe Leistungsdichte erforderlich ist wie z.B. bei der Materialbearbeitung [18]. Einige Puls laser können auch quasi-kontinuierlich betrieben werden. Wenn die Pulsfrequenz der Pumpe hoch genug ist (einige 10.000 Hz), entsteht quasi keine Pause zwischen den Pulsen, sodass der Laserprozess aufrechterhalten wird [12].

2.2.2.2 Leistung von Laserquellen

Leistung ist Energie pro Zeit, auf den Laser bezogen also die kumulierte Energie aller Photonen, die innerhalb einer Sekunde den Laserquerschnitt passieren. Folglich ergibt sich die Laserleistung aus der Menge der Photonen und dem jeweiligen Energieinhalt dieser Photonen. Die Photonenenergie entspricht der Differenz zwischen den Energieniveaus, zwischen denen die Emission stattfindet, ist also abhängig von der Wellenlänge und somit vom Medium. Die Menge der Photonen ist abhängig von der Pumpenleistung und dem Volumen – insbesondere der Länge – des aktiven Mediums. Je größer die Pumpenleistung, umso mehr Atome können in den angeregten Zustand versetzt werden. Je länger die Strecke ist, die die Photonen im Medium zurücklegen, umso mehr Kollisionen mit angeregten Atomen können potenziell stattfinden, infolge dessen induzierte Emission auftritt. Bei Stablasern ist z.B. die Länge und damit auch die produzierbare Leistung eines Moduls begrenzt. Um dennoch höhere Gesamtleistungen erzeugen zu können, werden mehrere solche Module in Reihe geschaltet.

Das aktuell verfügbare Spektrum der Ausgangsleistung, d.h. der Summe der Einzelleistungen aller Module, reicht von unter einem Mikrowatt (10^{-6} W) bis zu über einem Terawatt (10^{12} W). Entscheidend für die Maximalleistung eines Lasers sind neben den oben genannten Aspekten auch die Betriebsart und das emittierbare Frequenzspektrum. Festfrequenzlaser z.B. können sehr hohe Ausgangsleistungen erzielen. Die Leistung eines Lasers darf nicht verwechselt werden mit der Leistungsdichte. Während erstere unabhängig von der Strahlgeometrie gleichbleibt, ändert sich letztere mit der Spotgröße. Der Wirkungsgrad, also das Verhältnis aus der aufgewendeten elektrischen Energie zur Speisung der Pumpe und der Ausgangsleistung, kann in Ausnahmefällen zwar bis zu 40 % betragen, liegt aber häufig unter 0,1 % [14]. Festkörperlaser haben für gewöhnlich einen schlechteren Wirkungsgrad als Gaslaser, weil der Löwenanteil der Pumpenenergie in Wärme umwandelt wird. Diese geht auf den Resonator und das Medium über und beeinträchtigt potenziell deren Funktionalität. Deswegen sind Kühlvorrichtungen essenziell, um einen stabilen Betrieb zu gewährleisten.

2.2.3 Eigenschaften Laserstrahlung

Die Mechanismen im Laser führen unabhängig vom Lasertyp zu den grundlegenden Eigenschaften von Laserlicht, mit denen es sich von Licht aus herkömmlichen Quellen (Glühlampe) abhebt [12]:

- Das Licht ist hoch monochromatisch, d.h. (nahezu) alle Photonen haben dieselbe Wellenlänge.
- Das Laserstrahlenbündel hat einen vergleichsweise sehr geringen Divergenzwinkel, d.h. die Einzelstrahlen weiten sich bei der Ausbreitung kaum auf.
- Die Lichtwellen sind zeitlich und räumlich kohärent, d.h. die einzelnen Photonen schwingen in Phase. Kohärenz ist z.B. die Voraussetzung dafür, dass zwei Wellenzüge interferieren können [11].
- Der Laserstrahl verfügt über eine hohe Strahlintensität und -energie

Anhand der untenstehenden Parameter können Lasersysteme – bestehend aus Laserquelle, Strahlführung und Strahlformung – charakterisiert werden [13]. Bei Laserlicht wird zwischen Rohstrahl und geformtem bzw. fokussiertem Strahl unterschieden. Mit Rohstrahl bezeichnet man den Laserstrahl unmittelbar nach Verlassen des Resonators. Nach Durchlaufen der Komponenten zur Strahlführung und -formung heißt er geformter Strahl.

Rohstrahl:

- Strahldurchmesser
- Wellenlänge
- Divergenzwinkel
- Modenstruktur (vgl. Abschnitt zu Resonatoren)
- Polarisierung
- Pulsparameter
- Leistung

Geformter Strahl:

- Fokusdurchmesser
- Intensitätsverteilung
- RAYLEIGH-Länge
- Strahlqualität

2.2.3.1 Rohstrahl

Die Eigenschaften des Rohstrahls werden allein vom Laseraufbau (Resonator, Medium, Pumpe) bzw. dem daraus resultierenden Laserprozess bestimmt [13]. Seine Geometrie entspricht dem Querschnitt des laseraktiven Mediums, sofern diese nicht durch Blenden im Auskoppelspiegel modifiziert wurde. Die Wellenlänge ist wie oben beschrieben abhängig von dem laseraktiven Medium. Der Divergenzwinkel θ gibt an, wie stark sich der Laserstrahl hinter der Strahltaile aufweitet. Je kleiner er ist, umso höher ist die Strahlqualität, d.h. umso besser lässt sich der Strahl fokussieren. Um die kleinstmögliche Divergenz zu erhalten, darf der Laserstrahl nur die Grundmode haben [12].

Die Modenstruktur bezeichnet die Eigenschwingungen des Laserlichts, die bei der Ausbildung der stehenden Welle im Resonator entstehen. Transversale Moden (TEM = Transversale elektro-

magnetische Moden) verlaufen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung, d.h. von ihnen ist das Intensitätsmuster im Strahlquerschnitt abhängig. Abbildung 4 zeigt TEM-typische Intensitätsverteilungen. Die mit 00 bezeichnete Grundmode (TEM₀₀) hat eine gaussförmige Verteilung [13].

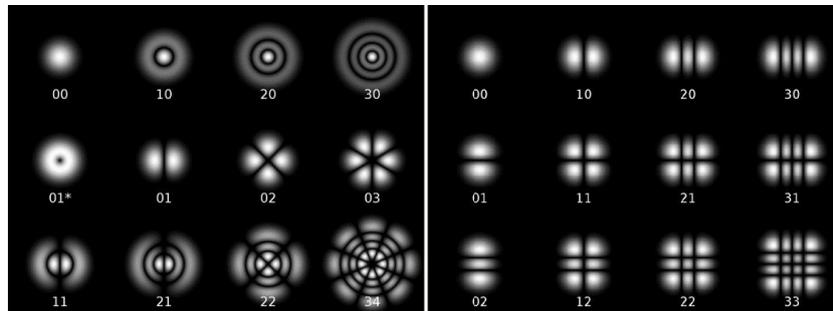


Abbildung 4 Intensitätsverteilungen transversaler Moden für kreisförmige (links; [19]) und rechteckige (rechts; [20]) Strahlen

Eigenschwingungen in Ausbreitungsrichtung heißen axiale Moden. Welche Wellenlängen theoretisch eine stehende Welle ausbilden können, ist abhängig von der Länge des Resonators (Resonanzbedingung). Um tatsächlich anzuschwingen, muss die Lichtfrequenz innerhalb der Bandbreite des Mediums liegen sowie die Laserschwelle (vgl. 2. Laserbedingung) überschritten werden. Der Bereich lässt sich zusätzlich einschränken durch speziell beschichtete Spiegel, die nur bestimmte Wellenlängen reflektieren [13].

Polarisation bedeutet, dass bei der Lichtstrahlenausbreitung die Teilchen auf einer bevorzugten Ebene schwingen, z.B. radial zum Strahlquerschnitt. Sie kommt erst durch den Resonator zustande, der nur bestimmte Schwingungsrichtungen verstärkt. Der Polarisationsgrad ($P_{Pol} < 100\%$) gibt das Verhältnis von polarisierter zur gesamten Strahlung an. Beim Schweißen ist es wichtig, Polarisationsrichtung und Schweißrichtung aufeinander abzustimmen. Für einachsige Schweißnähte sollten sie bei linear polarisiertem Licht parallel zueinander liegen. Wenn mehrachsiger gearbeitet wird, ist zirkular polarisiertes Licht zu bevorzugen, um eine Richtungsabhängigkeit zu vermeiden [13].

2.2.3.2 Strahlführung

Der Rohstrahl wird mit Hilfe von Spiegeln oder Glasfaserkabeln von der Laserstrahlquelle zur Bearbeitungsoptik am Bestimmungsort geführt. Glasfaserkabel haben gegenüber Spiegeln den Vorteil einer flexibleren Strahlführung und die Möglichkeit, Wege von mehr als 100 m zu überbrücken, wodurch sie insbesondere für roboterbasierte Anwendungen attraktiv sind. Allerdings sind sie nicht für jede Laserquelle geeignet. Das Quarzglas, aus dem die Glasfaser besteht, ist zum Beispiel nur für das Licht aus Festkörperlasern transparent. In Gaslasern entstandenes Licht wird deswegen als Freistrahler über ein Spiegelsystem gelenkt [12].

Der Lichttransport in dem Kabel basiert auf dem Prinzip der Totalreflexion am Grenzübergang zwischen zwei Medien. Der Laserstrahl tritt dabei nicht in die Mantelschicht über, sondern wird im

Optimalfall verlustfrei reflektiert, sodass er vollständig im Faserkern bleibt (Abbildung 5). Voraussetzung ist, dass der Faserkern einen höheren Brechungsindex hat als die Mantelschicht und der für die Totalreflexion notwendige Grenzwinkel θ_c erreicht wird. Bei kleineren Winkeln ist jede Reflexion an der Grenzschicht verlustbehaftet, sodass der Strahl nicht oder nur sehr geschwächt am Ziel ankommt.

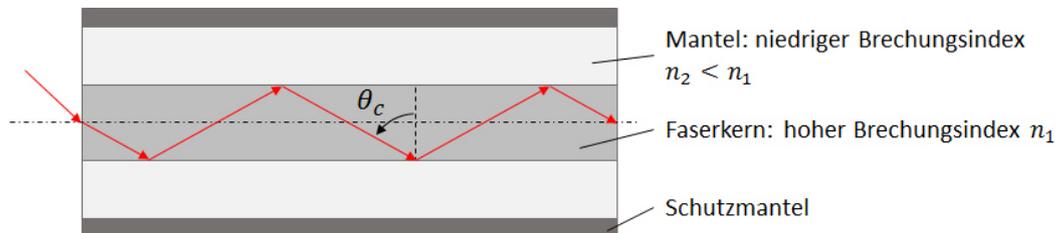


Abbildung 5 Lichttransport in einem Glasfaserkabel mit Stufenindex durch Totalreflexion

Während der Strahlführung wird lediglich die Richtung des Laserstrahls gesteuert, alle anderen Eigenschaften bleiben unbeeinflusst. Eine Ausnahme bildet die Modenstruktur. In Monomodefasern ist der Faserkern so dünn, dass nur die Grundmode (die TEM_{00} -Mode) geführt wird und die anderen verloren gehen. Neben dem bloßen Transport von A nach B gehört zur Strahlführung auch die Strahlteilung durch Spiegel, deren Reflexions- und Transmissionsgrad sich durch spezielle dielektrische oder metallische Beschichtungen quasi frei beliebig einstellbar sind [13]. Strahlteilung kommt z.B. bei Koaxialoptiken zum Einsatz.

2.2.3.3 Strahlformung und geformter Strahl

Mit der Strahlformung wird der Rohstrahl modifiziert, damit er den Anforderungen am Einsatzort entspricht. Die Maßnahmen können neben der Strahlgeometrie auch andere Eigenschaften wie die Wellenlänge oder Polarisation betreffen. Trotz der allein durch die Vielfalt der laseraktiven Medien bereits relativ großen Auswahl an Wellenlängen, wird für diverse Einsatzzwecke auch andersfarbiges Laserlicht benötigt als das natürlicherweise von den Medien erzeugt, z.B. weil Materialien bestimmte Wellenlängen besser absorbieren als andere. Dafür macht man sich die Methode der Frequenzverdopplung und -verdreifachung zu Nutze, bei der der Laserstrahl auf einen nichtlinearen Kristall gerichtet wird. Während ein Teil der eintretenden Strahlung unverändert wieder austritt, wird bei dem anderen Teil die Frequenz verdoppelt (SHG = second harmonic generation) oder verdreifacht (THG = third harmonic generation) [13]. Durch das Hintereinanderschalten mehrerer solcher Kristalle können mittlerweile Wellenlängen im Bereich von $0,1\mu\text{m}$ bis 3mm generiert werden [14].

Die Strahlformung kann durch Linsen, planparallele Platten und Spiegel erfolgen. Der wichtigste Aspekt der Strahlformung ist die Fokussierung des Laserstrahls, wodurch erst die für Laserlicht charakteristische Intensität (= Leistungsdichte, also Leistung pro Fläche) erreicht wird. Je nach Lasertyp und Betriebsart liegt die Intensität bei bis zu 10^{13} W/cm^2 (Nd:YAG im Pulsbetrieb). Eine 100W-

Glühlampe kommt dagegen nur auf Intensitäten von 10^{-2} W/cm^3 . Die Fokussierung geschieht in der Bearbeitungsoptik, deren Funktionsweise in Abbildung 6 schematisch dargestellt ist.

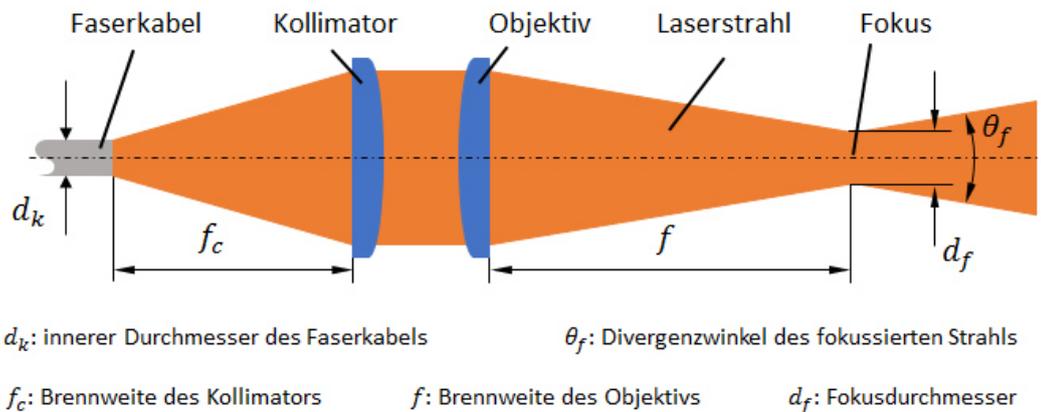


Abbildung 6 Verhalten des Laserstrahls in der Bearbeitungsoptik

Sobald der Laserstrahl aus dem Faserkabel ausgekoppelt wird, weitet er sich auf. Die Kollimatorlinse parallelisiert den Strahl, der anschließend von der Objektivlinse fokussiert wird. Die Divergenz hinter der Objektiv-Linse (θ_f) lässt sich auch mit der Rayleigh-Länge beschreiben. Diese bezeichnet den Abstand zur Fokuslage, nach welchem sich die Spotquerschnittsfläche verdoppelt hat. Die doppelte Rayleigh-Länge ist ein Maß für die Schärfentiefe [21].

Die Strahlqualität beschreibt die Fokussierbarkeit des Laserstrahls und lässt sich mit dem Strahlparameterprodukt (SPP) quantifizieren. Das Produkt aus dem Strahltaillendurchmesser und dem Divergenzwinkel bleibt unabhängig von der Fokussierung gleich. Je kleiner das SPP, desto besser ist die Strahlqualität. Um die Strahlqualität verschiedener Laserquellen mit unterschiedlichen Parametern (z.B. der Wellenlänge) vergleichen zu können, nutzt man die Strahlkennzahl (M^2 , mit $M^2 < 1$ bei realen Strahlen). Sie vergleicht das Strahlparameterprodukt des realen Laserstrahls mit dem eines idealen Gauß-Strahls, bei dem der Divergenzwinkel minimal ist [13].

Der Fokusdurchmesser d_f , also der kleinstmögliche Spotdurchmesser, befindet sich im Abstand f zum Objektiv. Er ist abhängig von den beiden Brennweiten und dem Durchmesser des Faserkerns [21]. Ein kleiner Fokusdurchmesser ist insbesondere dann gefragt, wenn das Material sehr fein bearbeitet werden soll, z.B. beim Gravieren. Wird ein größerer Spotdurchmesser benötigt, muss defokussiert werden. Dazu kann man den Abstand zwischen Werkstückoberfläche und Objektiv anpassen und/oder die Lage des Kollimators verändern, welcher die Geometrie des geformten Strahls und die Fokuslage beeinflusst (vgl. Kapitel 3.4).

Aus dem Spotdurchmesser und der Leistung ergibt sich die Leistungsdichte, genannt Intensität, die im Fokus am Größten ist. Dabei verteilt sich die Leistung jedoch nicht gleichmäßig über den Strahlquerschnitt, sondern folgt der Struktur der transversalen Moden. Der Rohstrahl kann daher über

mehrere Intensitätsminima und -maxima verfügen, welche jedoch in der Strahlführung wie oben beschrieben verloren gehen. Auf Grund der vielfachen Reflexion im Kabel homogenisiert sich die Leistungsdichte über den Querschnitt. Das resultierende gleichmäßige Intensitätsprofil des Strahls beim Austritt am Faserende wird durch die Bearbeitungsoptik möglichst scharf im Fokus abgebildet. Wegen der einem Hut ähnelnder Form heißt das Intensitätsprofil im Fokus „Top Hat“. Außerhalb der Fokusslage verhält sich die Leistungsdichte inhomogen. Sie ist nun nicht mehr konstant über den Querschnitt und folgt ab einem gewissen Abstand einer Gauß-Verteilung [12]. Wie sich die Intensitätsverteilung entlang der Strahlachse verhält ist in Abbildung 7 schematisch dargestellt. Das Intensitätsprofil eines Laserspots lässt sich abschätzen anhand der Oberflächenveränderung nach dem Einwirken eines Laserimpulses (Abbildung 8). Von der Defokussierungseinstellung war der Spotdurchmesser bekannt, sodass dieser auf der Werkstückoberfläche klar bestimmt werden konnte. Ohne dieses Wissen ist eine solche eindeutige Abgrenzung durch die bloße Betrachtung der Oberfläche nicht möglich, zumal das Bild auch durch die Impulsleistung und -dauer bestimmt wird. Wenn man den Laserstrahl wie beim Laserauftragschweißen defokussiert verwendet, ist die Intensität am Spotrand geringer als im Zentrum. Das genaue Profil sowie die maximale Intensität ist abhängig von der Laserstrahlquelle sowie Strahlführung und -formung. Die zumindest ungefähre Kenntnis der Intensitätsverteilung bei dem verwendeten Spotdurchmesser ist wichtig für eine prozesssichere Positionierung des Drahts. Wird der Draht zu weit außen angesetzt, reicht die dort vorhandene Leistung gegebenenfalls nicht aus, um den Zusatzwerkstoff (vollständig) aufzuschmelzen.

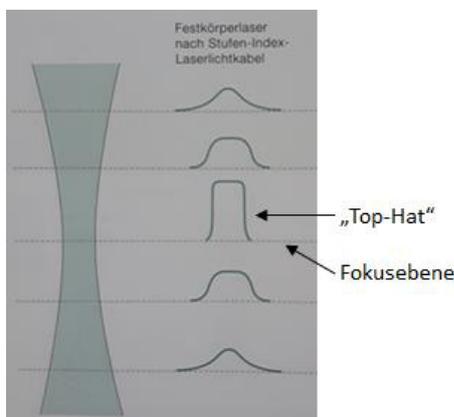


Abbildung 7 Intensitätsverteilung entlang der Strahlachse [12, S. 90]

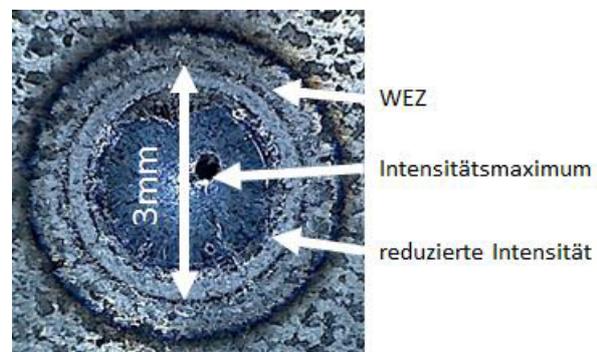


Abbildung 8 Oberfläche nach Beschuss mit Laserimpuls

2.2.4 Einsatz beim Schweißen

Ein bedeutender Vorteil von Laserlicht gegenüber beispielsweise dem Lichtbogen ist, dass die zum Aufschmelzen benötigte Energie zeitlich wie räumlich sehr präzise und mit hoher Intensität eingebracht werden kann. Die aus der Bearbeitungszone abfließende Energiemenge ist vergleichsweise gering, weshalb ein hoher Anteil der eingebrachten Energie für den tatsächlichen

Prozess genutzt werden kann. Folglich ist der Wärmeeintrag dadurch insgesamt geringer, was in einer verhältnismäßig kleinen Wärmeeinflusszone resultiert und den Verzug reduziert. Wieviel Wärme durch den Laserstrahl tatsächlich in das Werkstück eingebracht wird, ist abhängig von dem Einkoppelgrad, also wie effizient die Laserenergie in Wärme umgewandelt wird [13]. Dieser ergibt sich aus dem Absorptionsvermögen des jeweiligen Werkstoffes für die Wellenlänge des Lichtstrahls. Ein hoher Einkoppelgrad ist erstrebenswert, zum einen damit die von der Quelle zur Verfügung gestellte Energie maximal ausgenutzt wird. Zum anderen wird das nicht absorbierte Licht reflektiert und kann im ungünstigen Fall Schäden in der Bearbeitungsoptik anrichten. Dies verdeutlicht, wie wichtig es ist, die Laserquelle auf den Bearbeitungszweck abzustimmen.

Ein weiterer Vorteil von Laserlicht als Werkzeug besteht darin, dass sich damit die für Auftragschweißungen (insbesondere Beschichtungen) geforderten geringen Aufmischungsgrade am besten erreichen lassen. Hierfür sollte die Laserleistung möglichst klein gehalten werden, wohingegen sowohl eine höhere Schweißgeschwindigkeit als auch ein höherer Drahtvorschub den Aufmischungsgrad senken [22]. Hinzukommt, dass sich mit Laserauftragschweißen mehr Werkstoffe (z.B. auch Keramiken) sowohl artgleich als auch artfremd fügen lassen als mit anderen Schweißverfahren. Ein Grund für die breitere Einsatzmöglichkeit liegt darin, dass weder Substrat noch Zusatzwerkstoff elektrisch leitfähig sein müssen.

2.3 Laserdrahtauftragschweißen

Beim Laserauftragschweißen (LMD = Laser Metal Deposition) schmilzt ein Laserstrahl das Substrat und den als Draht oder Pulver zugeführten Zusatzwerkstoff auf und sorgt so lokal für eine stoffschlüssige Verbindung. Das auch als „Laser Cladding“ oder „Laser Deposition Welding“ bekannte Verfahren findet einerseits Anwendung in der klassischen additiven Fertigung. Die dabei generierten Geometrien können sowohl als eigenständiges Bauteil dienen oder aber direkt auf ein bestehendes Bauteil (z.B. eine Welle) aufgeschweißt werden. Des Weiteren wird die Technologie eingesetzt zur Beschichtung (z.B. panzern) und Rekonditionierung von Komponenten. Letzteres ist eine sehr attraktive Alternative zum Austausch verschlissener Bauteile, welcher mit deutlich höheren Kosten und einer längeren Wiederbeschaffungszeit und damit Ausfallkosten verbunden ist.

Laserauftragschweißen kann dem Wärmeleitungsschweißen zugeordnet werden. Das auf das Werkstück fokussierte Laserlicht wird in einer dünnen Oberflächenschicht absorbiert und dort in Wärme umgewandelt. Ist der Energieeintrag hoch genug, entsteht ein Schmelzbad, das sich über Wärmeleitung ausbreitet. Typischerweise ist die Schmelzzone maximal halb so tief wie breit. Die Temperatur im Schmelzbad ist nicht homogen verteilt, sondern nimmt zum Rand hin ab. Wegen der Temperaturabhängigkeit der Oberflächenspannung treten dadurch Scherspannungen auf, die bewirken, dass die Schmelze von wärmeren Bereichen geringer Oberflächenspannung zu kälteren

Bereichen mit hoher Oberflächenspannung fließt [23]. Einige oberflächenaktive Elemente wie Mangan, Schwefel oder Sauerstoff können die Strömungsrichtung umkehren, indem sie den Zusammenhang zwischen Temperatur und Oberflächenspannung beeinflussen [24]. Die Form der Strömung - divergent versus konvergent (Abbildung 9 a und b) - bestimmt die Richtung des Wärmetransports und somit die Geometrie des Schmelzbads.

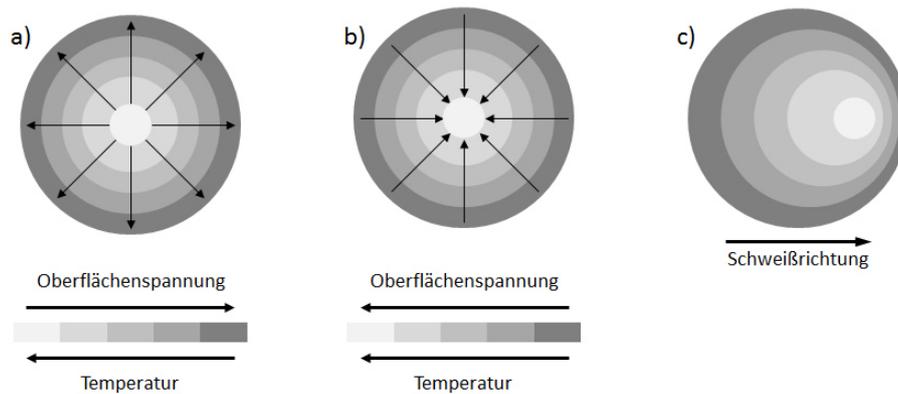


Abbildung 9 Temperaturverteilung und Oberflächenspannung: a) ruhender Spot mit divergenter Strömung, b) ruhender Spot mit konvergenter Strömung, c) bewegter Spot

Bewegt sich der Laserstrahl relativ zum Werkstück, liegen die Isothermen nicht mehr konzentrisch um den Laserstrahl, sondern stauchen sich an der Front (Abbildung 9c). Der Temperaturgradient und dadurch auch die Scherspannungen sind deswegen in Schweißrichtung größer als zu den Seiten oder nach hinten. Die eigentlich oberflächlich stattfindende Strömung setzt sich auf Grund der geringen Viskosität der Schmelze auch in die Tiefe fort. Diese sogenannte Marangoni-Strömung bewirkt die Durchmischung von Grund- und Zusatzwerkstoff [23].

Beim Laserdrahtauftragschweißen (LMD-w = Laser Metal Deposition with wire) wird der Draht dem Schmelzbad lateral oder koaxial zum Laserstrahl zugeführt. Die wesentlichen festzulegenden Parameter sind der Spotdurchmesser, die Laserleistung, die Schweißgeschwindigkeit und der Drahtvorschub. Der Spotdurchmesser sollte für eine gewisse Prozessstabilität größer sein als der Drahtdurchmesser und legt die Raupenbreite fest. Die Raupenhöhe wiederum ist unter ansonsten gleichen Bedingungen abhängig von der Schweißgeschwindigkeit (Abbildung 10).

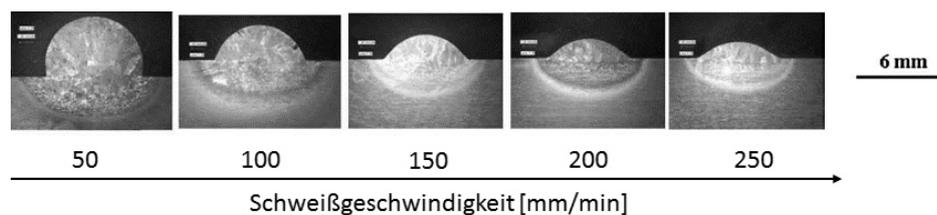


Abbildung 10 Einfluss der Schweißgeschwindigkeit auf die Raupengeometrie [25]

Um prozesssicher einwandfreie Raupen zu generieren, müssen die einzelnen Parameter aufeinander abgestimmt werden. Ist die Streckenenergie, also das Verhältnis von Laserleistung zu

Schweißgeschwindigkeit, zu groß, wird der Draht schneller abgeschmolzen als nachgefördert. Dadurch entstehen zopfartige oder sogar lückenhafte, unvollständige Raupen (Abbildung 11, links). Im umgekehrten Fall wird mehr Draht gefördert als von der eingebrachten Energie aufgeschmolzen werden kann, sodass der mitunter noch feste Draht die Werkstückoberfläche stößt. Dort wird er gegebenenfalls soweit abgelenkt, dass er den Laserspot sogar verlässt. Die Konsequenz sind unregelmäßige Raupen, die mit Drahtstummeln gespickt sein können (Abbildung 11, rechts).



Abbildung 11 Schweißergebnis bei zu hoher (links) und zu niedriger (rechts) Streckenenergie

Im folgenden soll auf die Charakteristika und Vorteile von Laserlicht eingegangen werden als auch auf die Chancen und Herausforderungen von drahtförmigem Werkstoff in der additiven Fertigung.

2.3.1 Draht vs. Pulver:

Anfangs wurde beim Laserauftragschweißen nur mit Pulver gearbeitet, weshalb solche Verfahren elaborierter sind und bis dato mehr Beachtung in der Forschung gefunden haben. Drahtförmiger Zusatzwerkstoff wurde ursprünglich nur im klassischen (Füge-)Schweißen eingesetzt, ist aber in den letzten Jahren – nicht zuletzt auf Grund einiger Vorteile – auch in der additiven Fertigung salonfähig geworden. Beispielsweise können mit Draht bessere Festigkeiten im aufgetragenen Material erzielt werden als mit Pulver [26], welches eine höhere Porosität in der Naht verursacht [27]. Ebenso ist die Oberflächenqualität von aus Draht gefertigtem Schweißgut besser. Bei pulverbasierten Verfahren führen anhaftende Partikel wie halbgeschmolzene Körner zu einer um 20-30% höheren Rauigkeit. Außerdem ist das Schmelzbad bei Draht stabiler, weil der Werkstoff konstant zugeführt wird. Bei Pulver hingegen schwanken die Größe, Form und Anzahl der in das Schmelzbad eintretenden Werkstoffpartikel räumlich und zeitlich [28]. Des Weiteren ermöglicht Draht höhere Ablagerungsraten, d.h. in derselben Zeit kann mehr Bauteilvolumen aufgebaut werden [29]. Anders als Pulver, das durch das Fördergas auch in einem größeren Radius um den Spot herum verteilt wird und dort ungenutzt liegen bleibt, wird der Draht direkt dem Schweißbad zugeführt und geht dadurch bis zu 100% in das Schweißgut ein. Folglich sinken (Umwelt-)Verschmutzung und Gesundheitsrisiken. Die geringere Materialverschwendung reduziert die ohnehin schon niedrigeren Anschaffungskosten von Draht.

Nachteilig ist, dass im Vergleich zu pulverbasierten Prozessen meist umfangreichere spanende Nacharbeit erforderlich ist [9], u.a. weil die größeren Schichtdicke mit einer ungenaueren Abbildung der Sollgeometrie einhergeht. Außerdem muss der Draht über die gesamte Dauer des Schweißvorgangs direkt in das vom Laser erzeugte Schmelzbad geführt werden, weil ein Kontaktverlust den Prozess stören oder sogar ganz abbrechen würde [30]. Unebene Substrate, wie sie z.B. bei der

Rekonditionierung verschlissener Bauteile vorkommen, stellen deswegen eine Herausforderung dar wegen des sich ständig ändernden Abstands zwischen Werkzeug und Oberfläche. Die Zuführung und Positionierung des Drahts relativ zum Laserspot spielen also eine entscheidende Rolle bei der Prozesssicherheit und der Qualität des gefertigten Teils.

2.3.2 Drahtzuführung und -positionierung

Anders als bei Pulver, das in der Regel koaxial zum Laser mit z.B. Dreistrahl-Düsen zugeführt wird, gibt es für Draht viele verschiedene Möglichkeiten, aus welcher Richtung, unter welchem Winkel und an welcher Stelle er in das Schmelzbad eintritt. Die verschiedenen Parameter und ihre Bedeutung für das Schweißergebnis sollen an dieser Stelle unter Berücksichtigung bisheriger Forschungsergebnisse vorgestellt werden.

2.3.2.1 Drahtzuführung

Mit Drahtzuführung ist an dieser Stelle gemeint, unter welchem Winkel relativ zum Substrat (α , bzw. darüber zum Laserstrahl) und zur Schweißrichtung (β) der Draht dem Laserspot zugeführt wird. Die Variationsmöglichkeiten sind in Abbildung 12 dargestellt:

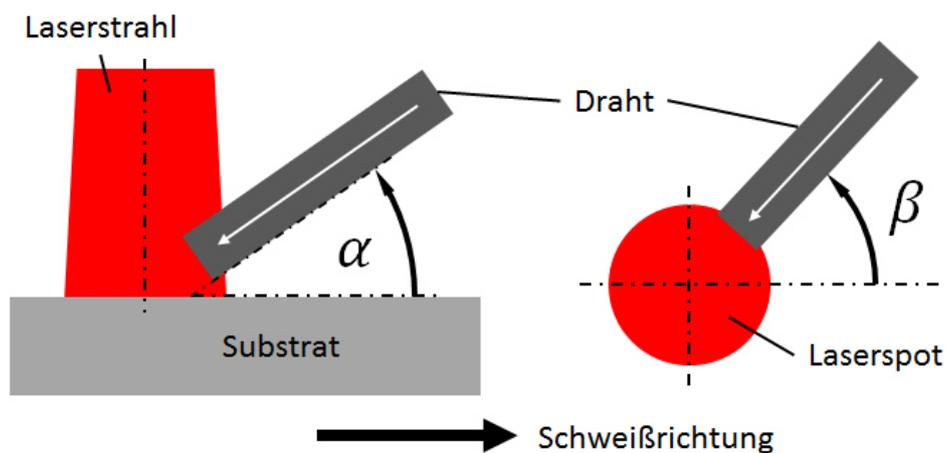


Abbildung 12 Drahtzuführung relativ zur Oberfläche (links) und zur Schweißrichtung (rechts)

Der Anstell-Winkel α gilt unter der Annahme, dass der Laserstrahl senkrecht¹ auf das Substrat trifft. Bei $\alpha = 90^\circ$ spricht man von „koaxialer“ Drahtzufuhr. Hierbei wird der Laserstrahl über spezielle optische Systeme zunächst aufgeteilt in drei (oder mehr) Einzelstrahlen, die um eine zentrische Achse im gleichen Winkel zueinander angeordnet sind, sodass in der Mitte der Draht geführt werden kann. Anschließend werden die Teilstrahlen wieder zu einem gemeinsamen Tripelfokus auf der Werkstückoberfläche zusammengeführt [31]. Diese Methode erlaubt richtungsunabhängiges Schweißen, allerdings ist die dafür notwendige Technik verhältnismäßig teuer.

¹ Häufig wird nicht tatsächlich im exakten Lot geschweißt, sondern in den zwei Ebenen senkrecht zum Substrat um wenige Grad gekippt, um ein Reflektieren des Laserstrahls zurück in die Optik zu vermeiden

Wenn $\alpha \neq 90^\circ$ ist, handelt es sich um „laterale“ Drahtzufuhr, bei der Laserstrahl und Drahtförderanlage unabhängige Systeme sind und zueinander ausgerichtet werden müssen. Nur hier kommt der Winkel β zum Tragen, der die Zufuhrrichtung beschreibt. Es gibt drei klassische Typen: schleppendes ($\beta = 0^\circ$), stechendes ($\beta = 180^\circ$) oder seitliches ($\beta = 90^\circ$) Zuführen. Theoretisch ist auch jeder andere Winkel möglich, was dann Mischformen aus seitlich und schleppend ($0^\circ < \beta < 90^\circ$) bzw. stechend ($90^\circ < \beta < 180^\circ$) entspricht. Der Einfluss der Zufuhrrichtung auf das Schweißergebnis wurde bereits in diversen Studien untersucht. Zum Beispiel sind Abschmelzleistung und Maßgenauigkeit bei schleppendem Schweißen besser als bei stechendem. Zudem wiesen mehrlagige Auftragsschweißungen mit stechender Drahtzufuhr Poren auf, solche mit schleppender Zufuhr hingegen nicht [32]. Dieser Qualitätsvorteil von schleppender gegenüber stechender oder seitlicher Drahtzufuhr deckt sich mit den Ergebnissen anderer Arbeiten [28, 33, 34]. Ein weiterer Grund, der für schleppendes Schweißen spricht, ist das vergleichsweise größte Prozessfenster bzgl. der Kombination aus Drahtvorschub und Laserleistung bei konstanter Schweißgeschwindigkeit [35]. Genauer gesagt lässt sich bei gleicher Leistung ein höherer Drahtvorschub und damit die höchste Abscheidungsrate realisieren. Auf Grund der oben beschriebenen Überlegenheit wird im Folgenden bei der Betrachtung der Einflüsse anderer Parameter auf das Schweißergebnis nur auf die Erkenntnisse unter schleppender Drahtzufuhr eingegangen.

Bei der lateralen Drahtzufuhr hat auch der Zufuhrwinkel α maßgeblichen Einfluss auf das Fertigungsergebnis. Auch wenn α grundsätzlich jeden Wert im Intervall $0 < \alpha < 90^\circ$ annehmen könnte, werden kontinuierliche Raupen laut einer Studie nur bei Winkeln zwischen $10^\circ \dots 75^\circ$ erzeugt. Der Bereich für qualitativ hochwertige Raupen lag sogar nur bei $20^\circ \dots 60^\circ$ [28]. Einen Konsens hinsichtlich eines konkreten Optimums für α gibt es in der Literatur nicht, allerdings werden in Studien meist Winkel kleiner als 50° gewählt [28, 33, 34, 36, 37, 38]. Dies mag unter anderem daran liegen, dass mit zunehmendem Winkel α die Oberflächenrauheit R_α steigt. Die Autoren vermuten die Ursache in einer Zunahme von vertikalen Strömungen in der Schmelze bei größeren Winkeln, die die Welligkeit verursachen [32]. Auf der anderen Seite nimmt die Raupenbreite mit sinkendem Winkel zu [39], was bei konstantem Raupenvolumen gleichzeitig bedeutet, dass die Raupenhöhe abnimmt.

Vor dem Hintergrund sind also eher größere Winkel sinnvoll in der additiven Fertigung, wenn es darum geht, mit möglichst wenigen Raupen die geforderte Höhe zu erreichen. Brandl et al. [39] schlagen daher einen Winkel von $\alpha = 55^\circ$ als Kompromiss zwischen Aufbaurrate und Oberflächengüte vor. Abioye et al. wählten α beispielsweise so, dass die am Spotrand positionierte Drahtspitze zum Spotmittelpunkt wies [22]. Dementsprechend müsste sich α auch nach Faktoren wie Spotdurchmesser und Positionierung der Drahtspitze im Laserspot richten. Zusammengefasst sollte die Wahl des Zufuhrwinkels also von dem verfolgten Zweck (Oberflächengüte vs. Aufbaurrate) abhängig gemacht

werden. Sofern die Vorrichtung der Drahtzufuhr es zulässt, könnte der für eine gute Oberfläche erforderliche Winkel gegebenenfalls auch nur für die oberste Lage einer Wand eingestellt werden.

Eine Sonderform der lateralen Drahtzufuhr besteht darin, den Draht im Lot zur Werkstückoberfläche zuzuführen und den Laser lateral. Somit ist zwar die Drahtzufuhr richtungsunabhängig, allerdings nimmt bei dieser Anordnung der Laserspot auf dem Werkstück eine elliptische Form an. Dadurch ergibt sich eine richtungsabhängige Intensitätsverteilung über die Fläche.

2.3.2.2 Drahtpositionierung

Bei der lateralen Drahtzuführung ist für das Schweißergebnis auch die Positionierung der Drahtspitze relativ zum Laserspot auf der Werkstückoberfläche von zentraler Bedeutung. Die einzelnen Parameter der Drahtpositionierung beim schleppenden Schweißen sind in **Abbildung 13** dargestellt:

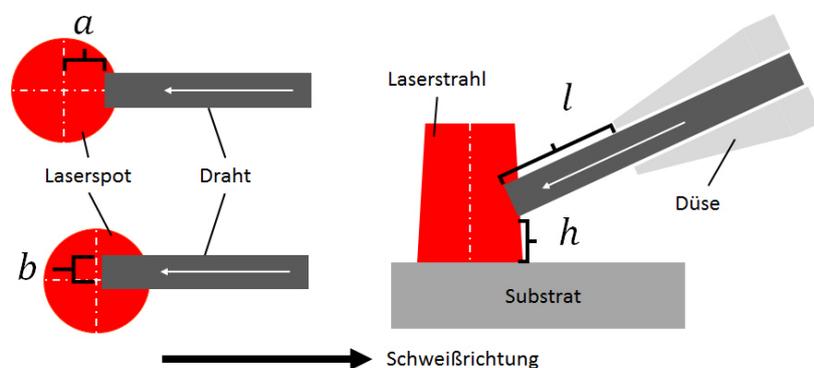


Abbildung 13 Parameter der Drahtpositionierung in Draufsicht (links) und Seitenansicht (rechts)

Der Parameter a beschreibt den Abstand der Drahtspitze vom Spotmittelpunkt in Schweißrichtung und kann Werte zwischen $0 \dots \pm 0,5 \cdot d_{Spot}$ annehmen. Der Einfluss von a auf die Schweißqualität wurde schon in diversen Studien untersucht. In der Regel wurden dabei die Positionen Vorderkante (vgl. **Abbildung 13** links oben), Mittelpunkt und Hinterkante verglichen bezüglich der Eigenschaften der Raupen. Die besten Ergebnisse hinsichtlich Oberflächenrauheit werden demnach erzielt, wenn der Draht am vorderen äußersten Rand positioniert wird [32]. Dies liegt laut den Autoren zum einen daran, dass das Schmelzbad auf die Weise nur minimal beeinträchtigt wird. Zum anderen kann der Draht den Laserstrahl nicht reflektieren und dadurch die Aufschmelzleistung senken, weil der Draht den Laserstrahl quasi nicht berührt [40]. Die Energie, um den Draht zu schmelzen, kommt vielmehr aus dem Schmelzbad.

Der Parameter b beschreibt die Position des Drahts quer zur Schweißrichtung. Er ist hier definiert als (größter) Abstand der Drahtaußenkante von der Mittelachse des Spots (**Abbildung 13**, links unten). Der Wertebereich liegt zwischen $0,5 \cdot d_{Draht} \dots 0,5 \cdot d_{Spot}$, wobei davon ausgegangen wird, dass die Positionierung in der Mitte ($b = 0,5 \cdot d_{Draht}$) ideal ist. In einer Bachelorarbeit wurde bereits

festgestellt, dass bei verschiedenen Spotdurchmessern auch dann zufriedenstellende Raupen geschweißt werden können, wenn der Draht ganz am Rand platziert wird, sofern die Laserleistung entsprechend erhöht wird [41]. Bei einem 3mm-Spot konnte die Drahtachse bei gleichbleibenden Schweißparametern ohne Qualitätseinbußen bis zu 0,5mm (entspricht $b = 1 \text{ mm}$) von der Mittelachse ausgelenkt werden.

Die Notwendigkeit der Leistungserhöhung ab einer gewissen Auslenkung ist bedingt durch die ungleichmäßige Leistungsverteilung über den Spot. Die hier gestellte Frage nach dem Toleranzfenster für den Parameter b mit der oben genannten Arbeit beantworten zu wollen, ist nur bedingt sinnvoll. Zum einen wurden jeweils vier Positionen relativ zum Spotdurchmesser (25%...100%) dahingehend untersucht, ob das für die 0%-Position identifizierte Schweißparameterset noch gültig war. Somit lässt sich für die Werte zwischen den diskreten Positionen keine Aussage treffen bzw. darüber, wie weit der Draht von der Mittelachse abweichen darf, ohne dass es einer Anpassung der Schweißparameter bedarf. Zum anderen wurde der Draht stets mittig vom Spot ($a = 0 \text{ mm}$) platziert. Folgt man der Empfehlung, den Draht an der Vorderkante zuzuführen, muss die Gültigkeit der Ergebnisse überprüft werden, allein weil sich ab einer gewissen Auslenkung ein Teil des Drahts außerhalb des Spots befindet.

Auf den ersten Blick scheint dem Stickout l (Abbildung 13, rechts) keine große Bedeutung zuzukommen, da dieser Parameter in Studien bisher kaum Beachtung gefunden hat und in der Regel nicht einmal erwähnt wird im Studiendesign. Im Gegensatz zum MIG/MAG-Schweißen, bei dem eine größere freie Drahtlänge mit einem größeren Spannungsabfall einhergeht, beeinträchtigt ein längerer Stickout die Schweißleistung nicht per se. Allerdings lässt sich die Drahtspitze umso leichter auslenken von der Sollposition je länger das freie Drahtende ist. Die Prozessunsicherheit wird zusätzlich verstärkt durch den Umstand, dass der Draht aufgrund des Aufwickelns auf der Spule bzw. im Fass noch eine leichte Biegung hat, sofern er nicht durch spezielle Vorrichtungen gerichtet wurde. Grundsätzlich ist ein möglichst kurzer Stickout also zu präferieren.

Der Parameter h bezeichnet den Abstand zwischen der Unterkante der Drahtspitze und der Werkstückoberfläche (Abbildung 13, rechts). In den meisten Studien zum Laserdrahtauftragschweißen wird ebenso wie beim Stickout nicht darauf eingegangen, welcher Wert für diese Größe gewählt wurde. Aus den jeweiligen prozessbeschreibenden Abbildungen lässt sich jedoch schließen, dass die Drahtspitze auf dem Substrat (nahezu) aufliegt. Erfahrungen aus dem IWS-Labor legen nahe, dass mit einem sehr kleinen Abstand („ein Blatt Papier“, entspricht etwa $h = 0,1 \text{ mm}$) gute Schweißergebnisse erzielt werden. Es ist anzunehmen, dass sich bei größer werdendem Abstand das Schweißergebnis verschlechtert, weil der Draht dann nicht mehr wie erwünscht vom Schmelzbad aufgeschmolzen wird, sondern vom Laserstrahl.

Unabhängig von dem eingestellten Sollwert sollte dieser über den gesamten Schweißweg konstant gehalten werden. Durch Unregelmäßigkeiten im Substrat oder in zuvor geschweißten Lagen ist das aber nicht immer gewährleistet. Bei einem zu kleinen Abstand (Abbildung 14, mittig) sticht der Draht quasi in das Substrat und stört das Schmelzbad. In beiden Fällen leidet die Qualität des Schweißergebnisses. Die Steuerung kann dem entgegenwirken, indem sie die Position des Laser-Draht-Systems entsprechend anpasst. Die dafür notwendigen Informationen über den Ist-Abstand können z.B. von Laserscannern gewonnen werden, die das tatsächliche Höhenprofil erfassen [42, 43]. Alternativ ist es auch möglich, aus Widerstandsmessungen auf den Abstand zu schließen [30, 44].

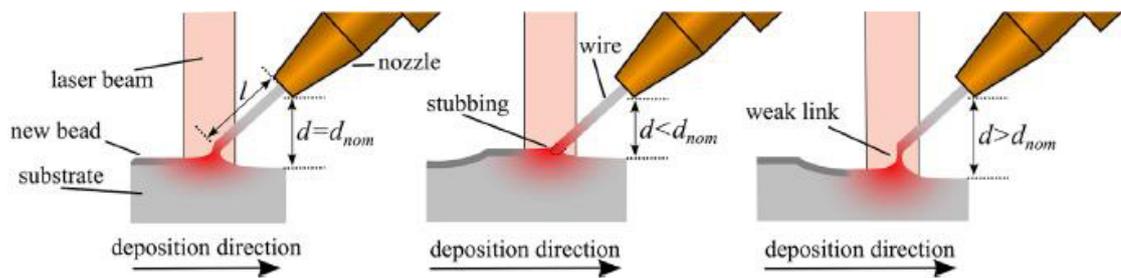


Abbildung 14 Auswirkungen durch Abweichung vom optimalen Abstand h (hier d_{nom}) [44]

3 Anlagenkonfiguration

Die Lasermaterialbearbeitungsanlage am IWS besteht aus einer Laserquelle (Abbildung 15), von wo die Laserstrahlung in Glasfaserkabeln zur Bearbeitungseinrichtung (Abbildung 16) geführt wird. Sie setzt sich zusammen aus einem Drehkipptisch zur Werkstückaufnahme und einem Knickarmroboter, der auf einer Nutenplatte die Bearbeitungsoptik und den Drahtförderer sowie einen Laserscanner trägt. Aus Arbeitsschutzgründen befindet sich die Bearbeitungseinrichtung in einer separierbaren Zelle, deren Tor mit Laserlicht filterndem Spezialglas versehen ist, um den Schweißprozess beobachten zu können. Ebenso in der Laserzelle vorhanden sind die Schutzgasversorgung und eine Absauganlage, da beim Schweißen gesundheitsschädliche Dämpfe, Stäube und Rauch entstehen können. Alle Elemente der Anlage sind in eine übergeordnete SPS eingebunden und lassen sich von außerhalb der Zelle bedienen, sei es direkt (manuell) und unabhängig voneinander mit der jeweiligen geräteeigenen Software bzw. Bedienpanel oder indirekt (automatisiert) über entsprechende Befehle im Rahmen eines Roboterprogramm.



Abbildung 15 Laserstrahlquelle am IWS



Abbildung 16 Bearbeitungseinrichtung zum Laserschweißen

3.1 Laserstrahlquelle HAAS HL 4006D

Am IWS wird ein „HAAS HL 4006D“ der Firma Trumpf (Baujahr 1999) eingesetzt. Es ist ein Bogenlampen-gepumpter Festkörperlaser mit stabförmigem Medium aus Nd:YAG - also ein mit Neodym versetzter Yttrium-Aluminium-Granat. Die emittierte Strahlung liegt mit einer Wellenlänge von 1064 nm im unsichtbaren infraroten Bereich des Lichtspektrums. Bei Stahl können damit Absorptionsgrade im Bereich von 40 % erreicht werden. Die Strahlquelle ist als Dauerstrichlaser (cw) ausgewiesen, gepulster Betrieb ist aber ebenso möglich. Die insgesamt acht Kavitäten können zusammen eine Maximalleistung von 4 kW bereitstellen. Abbildung 17 zeigt die Anordnung der drei Resonatorhöhlen (1-3) und fünf Verstärkerhöhlen (4-8). Im optischen Aufbau wird der Laserstrahl in das Glasfaserkabel eingekoppelt und darüber zur Bearbeitungsoptik geleitet.

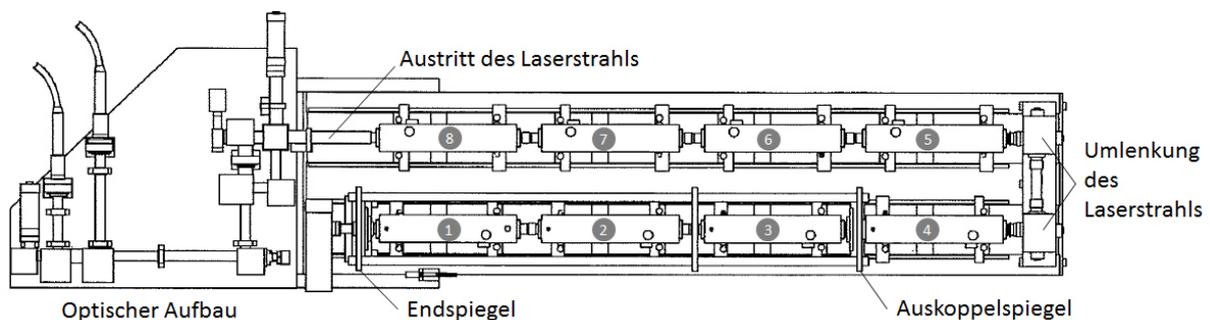


Abbildung 17 Aufbau des Lasers HL 4006D (adaptiert aus [21], S.4-2)

Mit der zum Laser gehörigen Software (LASEEDIT) lässt sich der Systemstatus überwachen. Dort ist auch die manuelle Bedienung des Lasers in verschiedenen Betriebsmodi möglich, indem die notwendigen entsprechenden Parameter wie z.B. Leistung und Pulsdauer im Falle eines Rechteckpuls direkt im Panel eingegeben werden. Alternativ kann der Laser über die SPS angesteuert werden, wobei dann die Parameter im Roboterprogramm definiert werden. Im manuellen wie auch automatisierten Betrieb meldet sich der Laser erst dann bereit, wenn die Steuerung das Signal bekommt, dass das Tor zur Laserzelle geschlossen ist und verriegelt wurde. Diese Sicherheitsmaßnahme ist notwendig, weil bei der vorliegenden Laserklasse 4 nicht nur der Laserstrahl selbst sondern auch dessen Reflexion gefährlich für Auge und Haut sind.

3.2 KUKA-Roboter

Die Werkzeughandhabung und Realisierung der Relativbewegung zwischen Werkstück und Laserstrahl erfolgt durch einen KUKA KR30 sechsachsigen Knickarmroboter. An dessen Kopf (Achse 6) ist eine Nutenplatte befestigt, auf der die Bearbeitungsoptik, die Positionier-Vorrichtung mit Drahtförderer und der Laserscanner montiert sind. Dadurch werden alle drei Komponenten gleichermaßen bewegt und ihre relative Position zueinander bleibt konstant. Bis zu einer Last von 30kg an der schwächsten Achse (Achse 6) erreicht der Roboter Positioniergenauigkeiten von $\pm 0,06\text{mm}$.

Mit dem Handgerät (smartPAD) lassen sich der KR30 wie auch die anderen Elemente der Anlage (Laserquelle, Drahtförderer und Gas) sowohl manuell bedienen als auch Programme zur Automatisierung schreiben und starten. Die Bewegungen des Roboters können absolut von Punkt zu Punkt erfolgen oder relativ um einen bestimmten Betrag auf einer oder mehreren Achsen. Für gewöhnlich werden die einzelnen Programmzeilen chronologisch ausgeführt, wobei der vorangegangene Befehl abgeschlossen sein muss, um den nächsten zu starten. Mit der TRIGGER-Funktion können Befehle (z.B. Laser oder Drahtvorschub) jedoch simultan zu Bewegungen ausgeführt werden, vorausgesetzt es handelt sich um eine absolute Bewegung.

Um einen Punkt zu definieren, kann das Teach-In-Verfahren genutzt werden, das die Koordinaten der momentanen Ist-Position automatisch auf den Zielpunkt in dem Bewegungsbefehl schreibt. Alternativ kann eine Positions-Variable (*POS Name*) eingeführt und in einer Programmzeile mit den entsprechenden Koordinaten belegt werden. Dieses Vorgehen muss bei Beschichtungen und Wänden angewendet werden, bei denen die Koordinaten von Start- und Endpunkt für jede neue Raupe in einer Schleife um einen zuvor definierten oder vom Laserscanner übergebenen Wert verändert werden.

3.3 Drehkipptisch zur Werkstückaufnahme

Zur Werkstückaufnahme wurde ein Drehkipptisch von Kuka genutzt. Die Bedienung erfolgte durch die Steuerkonsole des anderen in der Laserzelle befindlichen Roboters. Eine Einbindung in das Schweißprogramm ist daher aktuell nicht möglich. Im Laufe der Studie erfuhr der Aufbau einige Umbaumaßnahmen. Bei Studienbeginn war auf den Drehtisch eine Kühlplatte montiert aus einem Aluminium-T-Nuten-Profil. Anfänglich wurde das Blech lediglich auf eine markierte Startposition gelegt ohne Befestigung. Dies erwies sich jedoch als nachteilig, sodass mit Schrauben in einer der Nuten ein Zweipunkt-Anschlag (Abbildung 18) eingerichtet wurde, damit das Blech nicht vom Draht weggeschoben werden konnte.



Abbildung 18 Kühlplatte mit Zweipunkt-Anschlag

Zwischenzeitlich wurde die Kühlplatte entfernt und auf dem „nackten“ Tisch gearbeitet. Zum einen, weil sich die Kühlplatte nach einem Zusammenstoß mit dem Roboter auf Grund der geringen Steifigkeit

etwas verformt, weswegen die notwendige waagerechte Unterlage nicht mehr gegeben war. Zum anderen war die Stahl-T-Nutenplatte, die die Kühlplatte ersetzen sollte, noch nicht verfügbar. Auch auf dem Tisch wurde ein Anschlag eingerichtet, der das Blech am Verrutschen hindern sollte.

Schließlich wurde die Stahlnutenplatte auf dem Tisch montiert (Abbildung 19), die die Nutzung eines fest positionierten Schraubstocks zur Werkstückaufnahme erlaubt. Dadurch ist das Blech in jede Richtung fixierbar. Für jeden Aufbau wurde vor Inbetriebnahme entsprechend die Basis, auf die sich die Koordinaten und Bewegungen beziehen, für den KR30 neu eingeteacht.



Abbildung 19 Drehkiptisch mit Nutenplatte und Spannstock

3.4 Bearbeitungsoptik von Trumpf

Wie oben beschrieben hat die Bearbeitungsoptik die Aufgabe, den Laserstrahl zu fokussieren. Aus den Kenndaten der Bearbeitungsoptik (Tabelle 3) ergibt sich ein Fokusbrenndurchmesser von 0,9mm [21].

Tabelle 3 Kennwerte der Bearbeitungsoptik am IWS

Größe		Wert	
Objektivbrennweite	f	300mm	} $d_f = \frac{f}{f_c} \times d_k = 0,9 \text{ mm}$
Kollimatorbrennweite	f_c	200mm	
Kerndurchmesser des Kabels	d_k	0,6mm	

Die Bearbeitungsoptik der Laseranlage am IWS (Abbildung 20) verfügt zusätzlich über eine koaxiale Beobachtungskamera, die das Überwachen des Schweißprozesses und die Drahtpositionierung auf dem Spot ermöglicht (siehe Abschnitt 3.7).

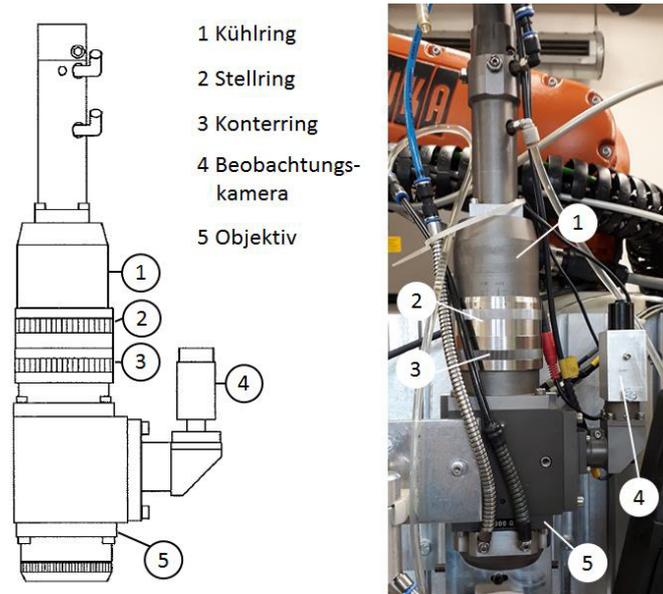


Abbildung 20 Bearbeitungsoptik der Laseranlage: schematisch (links [21]) und real (rechts)

Die Kamera selbst lässt sich nicht fokussieren, sodass für ein scharfes Bild der Abstand zur Werkstückoberfläche entsprechend eingestellt werden muss. Weil der Abstand zwischen Objektiv und Werkstück folglich ebenfalls festgelegt ist, kann die Defokussierung nur über das Verschieben der Kollimatorlinse erfolgen. Steht die Kollimatorlinse auf der „0-Position“, befindet sich der Fokus im Abstand von der Objektivbrennweite. Die Auswirkungen des Verstellens des Kollimators auf die Fokussierung und Divergenz des fokussierten Strahls sind in Abbildung 21 dargestellt. Bei der hier vorliegenden Anlagenkonfiguration beträgt der für ein scharfes Bild erforderliche Abstand zwischen Werkstückoberfläche und Objektiv 318mm, ist also größer als die Objektivbrennweite. Wenn eine Spotvergrößerung das Ziel ist, ist also die Verschiebung des Kollimators in Richtung Objektiv (in negative Richtung auf Abbildung 21) sinnvoller, weil sich durch die resultierende Verschiebung der Fokussierung der Strahl stärker aufweitet.

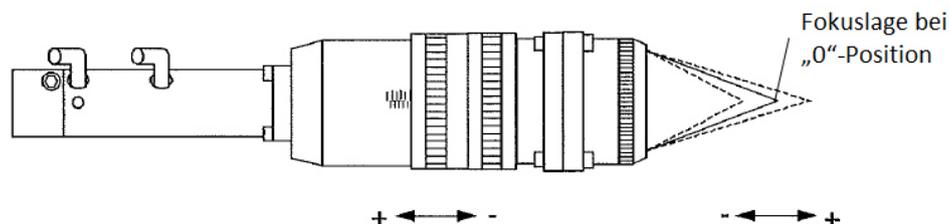


Abbildung 21 Einfluss der Kollimatorposition auf die Fokussierung und Strahlgeometrie [21]

3.5 Laserscanner

Der Laserscanner scanCONTROL 2910-100 (Abbildung 22) von $\mu\epsilon$ erfasst mit dem Prinzip der Triangulation das Höhenprofil entlang einer auf das Werkstück projizierten Laserlinie. In der dazugehörigen Software können zum Beispiel im gesamten Bereich oder in einem definierten Fenster die Extremwerte (Maximum/Minimum) entlang des Profils ermittelt werden (Abbildung 23). Des Weiteren ist es möglich, sich mit einer gewissen Pulsrate die interessierenden Werte an der Ist-Position ausgeben zu lassen, sodass ein Diagramm wie in Abbildung 24 entsteht. Sind Pulsrate und die Geschwindigkeit, mit der der Scanner das Objekt abfährt, aufeinander abgestimmt (z.B. alle 0,1mm eine Messung), dann lässt sich ein Messwert einem genauen Punkt zuordnen. Diese erfassten Daten können in einer Excel-Datei exportiert werden, um dort beispielsweise die tatsächliche Höhe zu berechnen. Vorher müssen die Daten gegebenenfalls von „Peaks“ bereinigt werden, die z.B. bei hochreflektiven Oberflächen entstehen können. Der Laserscanner ist über eine Schnittstelle mit der Robotersteuerung verbunden und lässt sich so auch in das Schweißprogramm einbinden. Die Daten zum Höhenprofil können dadurch direkt weiterverwertet werden, zum Beispiel um den notwendigen Höhenversatz bei Wänden zu berechnen (Abschnitt zu Wänden).

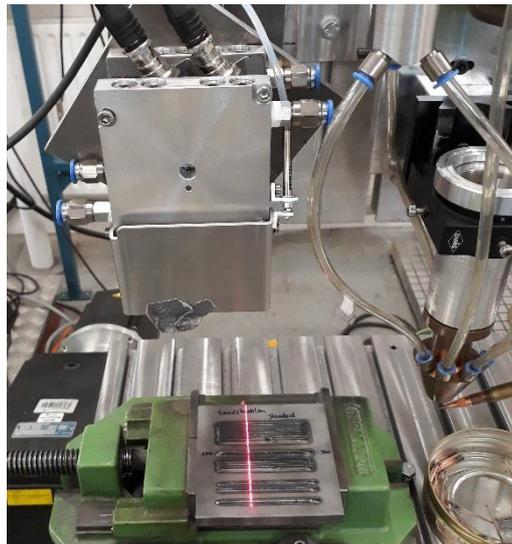


Abbildung 22 Laserscanner in seiner Vorrichtung



Abbildung 23 Höhenprofil vom Querschnitt einer Beschichtung mit Maximum im gesamten Bereich (links) bzw. Minimum in ausgewähltem Fenster (rechts)

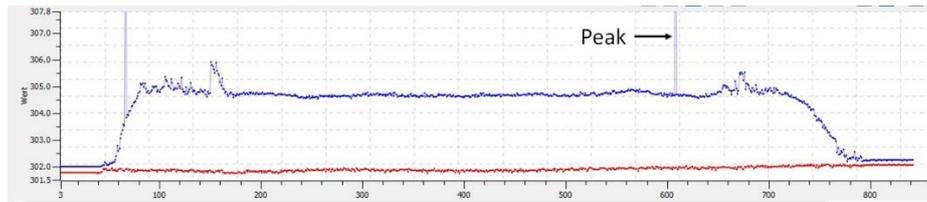


Abbildung 24 Höhenprofil entlang einer Wand mit Maximum (blau) und Minimum (rot)

3.6 Drahtförderanlage von DINSE

Die Drahtförderanlage besteht aus der Antriebseinheit mit auswechselbarem Pistoleneinsatz, der Steuerungseinheit, dem Drahtspulhalter und der Monitoring-Software. Die speziell zum Laserschweißen und -löten entwickelte Antriebseinheit DIX FD 100 LS (Abbildung 25) arbeitet mit einem Vier-Rollen-System, bestehend aus zwei Antriebsrollen und zwei Profilrollen. Der 90W-Motor ermöglicht Drahtfördergeschwindigkeiten von $0,3 \dots 24 \text{ m/min}$. Der Drahtlaufsensor misst mit einer Auflösung von 1600 Impulse/Umdrehung die Drahtfördergeschwindigkeit. Falls diese vom Soll abweicht, kann die Steuerung sie regulieren oder den Prozess abbrechen. Die Drahtbremse gewährleistet, dass Stickout und Drahtposition über den Schweißprozess hinweg konstant sind.

An die Antriebseinheit ist der Pistoleneinsatz DIX LKTZ 50 R/55° (Abbildung 26) montiert, der die Zufuhr von Schutzgas und Kühlflüssigkeit ermöglicht. Die auf den Einsatz aufgeschraubte Kontaktspitze hat eine auf den Drahtdurchmesser ausgerichtete Bohrung. Weil deren Spiel bei der 1mm-Düse relativ groß ist, wurde sie später von einer Düse für 0,8mm-Draht ersetzt, um das potenzielle Wackeln und Auslenken des Drahts beim Schweißen einzuschränken. Gespeist wird der Förderer von einer Drahtspule, die in den Drahtspulhalter DIX WDS 300 (Abbildung 27) eingelegt ist. Dieser ist auf einem Roboterarm montiert, sodass die Bewegungsfreiheit des Roboters nicht eingeschränkt wird.

Die Drahtförderung kann manuell direkt an der Antriebseinheit gesteuert werden oder automatisch über die Steuerungseinheit FDE 100 L (Abbildung 28). Sie empfängt Befehle von der übergeordneten SPS-Steuerung und gibt sie an die Antriebseinheit weiter. Gleichzeitig verarbeitet sie Signale von der Antriebseinheit (z.B. Ist-Drahtvorschub) und gibt entsprechende (Fehler-)Meldungen aus. Auf dem Touchscreen-Display können z.B. Drahtvorschub und die automatische Positionierung (vgl. Schweißprogramm) auch manuell eingegeben werden.

Mit dem Monitoring-Programm (Abbildung 29) lässt sich auch außerhalb der Zelle überwachen, ob der Draht tatsächlich gefördert wird. Neben der Ist- und Sollgeschwindigkeit wird auch die Förderrichtung (positiv = vor) angezeigt. Die beiden Ausschläge direkt am Ende einer Förderepisode zeigen das ruckartige Zurückziehen des Drahts aus der Schmelze und das anschließende zeitverzögerte Positionieren an (vgl. Schweißprogramm in 4.1.4). Die Ausschläge zwischen zwei Förderepisoden kommen durch das manuelle Einstellen des Stickouts zwischen zwei Schweißungen zustande.

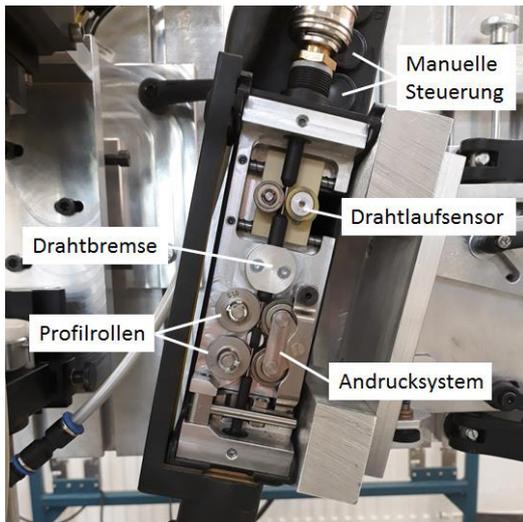


Abbildung 25 Antriebseinheit DIX FD 100 LS im Detail



Abbildung 26 Pistolenkopf DIX LKTZ 50 R/55°

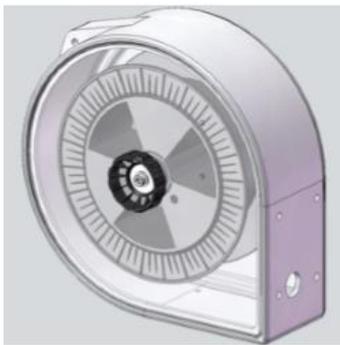


Abbildung 27 Drahtspulenhalter



Abbildung 28 Steuerungseinheit FDE 100 L

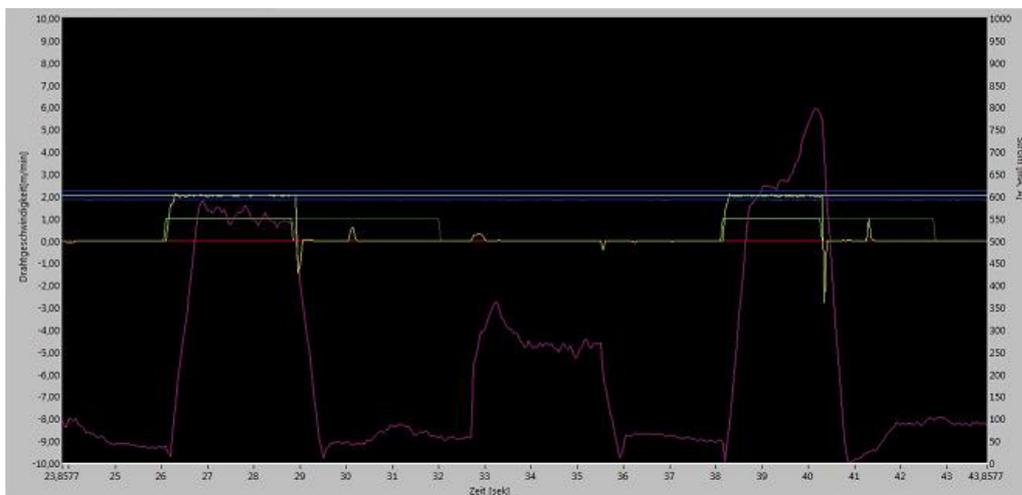


Abbildung 29 Ausschnitt aus dem Monitoring-Programm für den Drahtförderer

3.7 Positioniervorrichtung

Der Drahtförderer lässt sich mit der auf der Kopfplatte montierten Vorrichtung (Abbildung 30) relativ zum Laserstrahl positionieren. Die Parameter a , b , h und α können direkt an dieser Vorrichtung eingestellt werden. Die Realisierung von translatorischen Bewegungen durch das Ein- und Ausdrehen von Gewinden ermöglicht Veränderungen der Position im Zehntelmillimeter-Bereich. Entsprechende Führungen stellen sicher, dass sich die Vorrichtung auf der jeweiligen (Kreis-)Bahn bewegt. Die Positionierung wird durch das Spannen der Hebel fixiert, damit sie sich während des Schweißens nicht auf Grund von z.B. Schwingungen ändert. Der Stickout l wird über den Drahtförderer selbst verändert. Der Winkel β wird über die Richtung des Schweißwegs realisiert. Beim Einstellen einer neuen Positionierung ist zu beachten, dass die Parameter h und a wiederhergestellt werden müssen, wenn man l oder α verändert. Nur der Parameter b ist vollkommen unabhängig von den anderen Parametern. Deswegen ist es auch wichtig, eine sinnvolle Reihenfolge einzuhalten, wenn mehrere Parameter gleichzeitig verändert werden sollen.

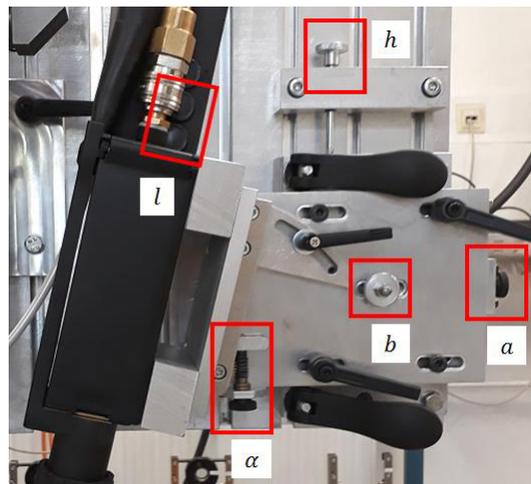


Abbildung 30 Drahtförderer und Positioniervorrichtung

3.8 Schutzgaszufuhr

Der Drahtförderer verfügt über Anschlüsse für das Schutzgas, das dann über eine auf die Kontaktspitze geschraubte Gas-Düse um den Draht strömt und zum Schmelzbad geleitet wird. Der Nachteil daran ist, dass dadurch der Abstand zwischen Draht-Düse und Substrat gezwungenermaßen größer wird. Folglich muss der Stickout verlängert werden, damit die Drahtspitze auf den Ziel-Wert für den Parameter h positioniert werden kann. Bei dem an der Anlage standardmäßig eingestellten Winkel von $\alpha = 21^\circ$ ließe sich ein 5-mm-Stickout beispielsweise gar nicht realisieren. Deswegen wurde das Schutzgas der Schweißstelle nicht über den Drahtförderer zugeführt, sondern über eine Dreistrahl-Düse koaxial zum Laserstrahl. Deren Position wurde so eingestellt, dass der gemeinsame Fokus der drei Einzelstrahlen auf der Werkstückoberfläche liegt.

3.9 Verwendete Werkstoffe

Als Substrat wurden Bleche aus Baustahl S235JR+C (Werkstoffnummer: 1.0122) mit den Abmessungen 10mmx100mmx100mm verwendet. Als Baustahl wird unlegierter Stahl bezeichnet, das heißt seine Eigenschaften werden im Wesentlichen durch den Kohlenstoffgehalt bestimmt. Dieser beträgt maximal 0,2 %, wodurch er unter der Grenze für eine gute Schweißbarkeit von 0,22 % Kohlenstoff liegt [45]. Baustähle lassen sich also im Allgemeinen auch ohne Vorwärmen gut schweißen. Es gibt auch unlegierte Stähle mit höherem Kohlenstoffgehalt bis zu 0,6 % (z.B. C40), diese werden aber als unlegierte Qualitätsstähle bezeichnet. Die verwendeten Bleche wurden vor dem Schweißen mit einem Tuch unter Anwendung von Metallreiniger von Rückständen des Zuschneidens (Schmierstoffe und Späne) befreit.

Als Zusatzwerkstoff kam ein kupferummantelter Massivdraht ($d_{\text{Draht}} = 1 \text{ mm}$) SG3 G4 Si1 (Werkstoffnummer 1.5130) zum Einsatz, der allgemein zum ein- und mehrlagigen Schutzgasschweißen von un- und niedriglegiertem Stahl in allen Schweißpositionen geeignet ist. Die dünne Kupferschicht um den Draht dient dem Korrosionsschutz. Der hohe Silizium- und Mangangehalt verbessert die mechanischen Eigenschaften des Schweißguts. Nachteilig ist jedoch die potenzielle Ausscheidung von Silikaten in der Schweißnaht.

Bei der Kombination aus Baustahl-Blechen und niedriglegiertem Stahldraht handelt es sich um artgleiche Fügepartner. Die Zusammensetzung beider Werkstoffe ist in Tabelle 4 verzeichnet. Bei dem Blech wurde hierfür an drei Messpunkten eine Spektralanalyse mit je drei Messungen durchgeführt. Die Zusammensetzung des Schweißguts wird in Kapitel 4.2.2.3 erläutert. Das Schweißen fand unter Argon-Atmosphäre statt.

Tabelle 4 Chemische Zusammensetzung der verwendeten Werkstoffe in Massen-Prozent [%]

	C	Mn	Si	P	S
Substrat-Werkstoff 1.0122	0,186	0,814	0,012	0,020	0,031
Draht-Werkstoff 1.5130	0,1	1,7	1,0	<0,025	<0,025

4 Studiendesign

In den Versuchen ist ein Parameterfenster für die Drahtpositionierung und -zuführung zunächst bei Raupen zu definieren und dann zu prüfen, inwieweit dieses auch bei Wänden und Beschichtung gilt. Im Vorfeld zu der eigentlichen Studie wurden einige vorbereitende Schritte durchgeführt. Diejenigen Vorbereitungen und Vorversuche, die nur für bestimmte Testreihen (z.B. nur bei Beschichtungen) relevant sind, werden in dem entsprechenden Abschnitt beschrieben. Das gleiche gilt für Untersuchungen, die sich im Zuge der Durchführung der Hauptversuche als notwendig herausstellten.

4.1 Allgemeine Vorbereitung

Mit allgemeiner Vorbereitung sind all diejenigen Versuche und Maßnahmen gemeint, die notwendig waren, einerseits um überhaupt mit dem Laser arbeiten zu können. Andererseits sollten zuverlässige Bedingungen geschaffen werden, um ein wissenschaftliches Arbeiten zu ermöglichen.

4.1.1 Spot-Einstellung

Die Ermittlung der für einen 3mm-Spot erforderlichen Einstellung des Kollimators erfolgte iterativ. Zunächst wurde ein Laserpuls ($P_L = 800\text{ W}$, $t = 300\text{ ms}$) auf ein Blech geschossen mit einer Defokussierung (Kollimation 0, Abstand zwischen Objektiv und Werkstück größer der Brennweite) von der bekannt war, dass sie zu einem 3mm-Spot auf dem Werkstück führt [41]. Aus der Vermessung des resultierenden Spots auf dem Blech mit einem digitalen USB-Mikroskop wurde die Erkenntnis gewonnen, wo die Grenze zwischen Laserstrahl und WEZ liegt (Abbildung 31). Anschließend wurde die Bearbeitungsoptik auf den für ein scharfes Kamerabild vorgegebenen Abstand von 318mm zwischen Objektiv und Werkstück positioniert. Mit der Kollimation von +4 bzw. +8 (Skala für $f_c = 200\text{ mm}$) wurde jeweils ein Laserimpuls mit identischen Pulsparametern wie zuvor auf ein Blech geschossen und die resultierenden Spots an der relevanten Stelle vermessen. Mit den ermittelten Durchmessern ließ sich eine Funktion aufstellen, aus der die Kollimation „+4.1“ (Abbildung 32) berechnet wurde. Das Schießen und Vermessen eines Spots mit dieser Einstellung verifizierte den Wert. Sofern nicht anders deklariert, wurde bei allen Versuchen mit einem 3mm-Spot gearbeitet.

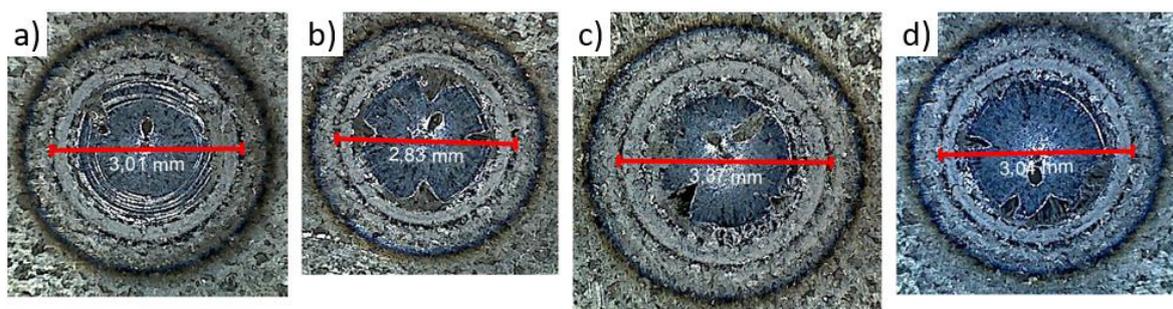


Abbildung 31 Spots zur Ermittlung der für einen 3mm-Spot notwendigen Kollimation: a) Referenzspot, b) Kollimation +4, c) Kollimation +8, d) Kollimation +4.1

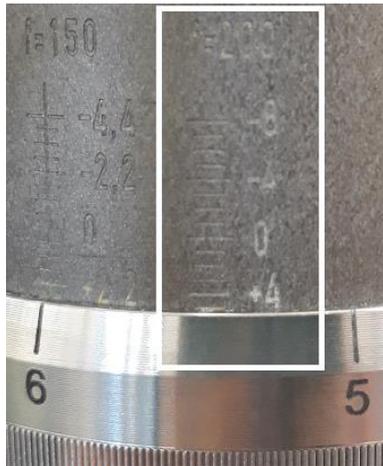


Abbildung 32 Kollimation für einen 3mm-Spot bei einem 318mm-Abstand

4.1.2 Überprüfung der Drahtfördergeschwindigkeit

Vor den ersten Schweißungen wurde der Drahtförderer dahingehend untersucht, ob die Ist-Fördergeschwindigkeit mit der Soll-Fördergeschwindigkeit übereinstimmt. Hierfür wurde in vier Mal Draht mit der vorgegebenen Geschwindigkeit $v_{\text{Draht,soll}} = 2 \text{ m/min}$ für $t_{\text{Draht}} = 10 \text{ s}$ gefördert und mit Hilfe eines Stahlmaßes vermessen. Die vier Einzelwerte (337 mm, 338 mm, 339 mm, 337 mm) für die Drahtlänge ergeben einen Mittelwert von 337,8 mm, was einer Fördergeschwindigkeit von $v_{\text{Draht,mess}} \approx 2,027 \text{ m/min}$ entspricht. Weil der geförderte Draht eine leichte Biegung aufweist, musste er während der Messung gerade gezogen werden, sodass er leicht unter Spannung stand. Es ist deswegen davon auszugehen, dass die tatsächliche Länge der Drahtstücke potenziell einige Millimeter größer sein könnte als die gemessene, wodurch auch die Fördergeschwindigkeit minimal größer wäre. Dem Display der Steuereinheit des Drahtförderers konnte die vom Drahtlaufsensor ermittelte Geschwindigkeit von $v_{\text{Draht,sensor}} \approx 2,04 \text{ m/min}$ entnommen werden. Unter Berücksichtigung der oben genannten Unsicherheiten bei der Vermessung der Drahtstücke kann davon ausgegangen werden, dass $v_{\text{Draht,mess}}$ in etwa mit $v_{\text{Draht,sensor}}$ übereinstimmt. Der Unterschied zwischen $v_{\text{Draht,soll}}$ und $v_{\text{Draht,sensor}}$ beträgt mit $0,04 \text{ m/min}$ also 2 %.

4.1.3 Überprüfung der Laserleistung am Bearbeitungsort

Die abzurufende Soll-Leistung P_L wird im Schweißprogramm definiert oder in LASEDIT eingegeben. Die Laseranlage erfasst die abgegebene Ist-Leistung kurz nach dem Eintritt in den optischen Aufbau (vgl. Abbildung 17 in 0). Dieser Wert $P_{\text{mess},1}$ wird in der LASEDIT-Software angezeigt. Weil auf dem Weg von der Laserquelle zum Bearbeitungsort Verluste auftreten können, wurde mit dem Cube (Herstellers Primes, Abbildung 33) überprüft, welche Leistung beim Schweißen tatsächlich zur Verfügung steht. Auf das Messfenster wird ein defokussierter Laserimpuls geschossen. Aus der aufgenommenen Wärme und der Impulsdauer berechnet das Gerät die Leistung $P_{\text{mess},2}$.



Abbildung 33 Laserleistungs-Messgerät

Die Messungen wurden für verschiedene Soll-Leistungen durchgeführt. Die Parameter und Ergebnisse sind in Tabelle 5 aufgeführt. Die Messung in der Laserquelle scheint wenig aussagekräftig, da bei $P_L = 2000\text{ W}$ ein größerer Wert für $P_{mess,1}$ ausgegeben wird. Betrachtet man die vom Cube ermittelten Werte, wird deutlich, dass etwa 90% der Soll-Leistung tatsächlich am Bearbeitungsort zur Verfügung steht. In den folgenden Versuchen bezieht sich die Laserleistung immer auf die im Programm definierte Leistung P_L .

Tabelle 5 Messreihe zur Überprüfung der Laserleistung am Bearbeitungsort

P_L [W]	d_{Strahl} [mm]	t_{Impuls} [ms]	$P_{mess,1}$ [W]	$P_{mess,2}$ [W]	$P_{mess,2}$ [%] (zu P_{soll})
4000	25	500	3700	3565	89,1
2600	20	500	2520	2353	90,5
2000	20	500	2140	1834	91,7
1000	15	500	1000	909	90,9
500	15	500	470	457	91,4

4.1.4 Roboterprogramm schreiben

In dem Roboterprogramm werden alle relevanten Variablen wie z.B. Laserleistung, Drahtvorschub und Schweißgeschwindigkeit deklariert und mit den jeweiligen Werten belegt. Neben der Steuerung der Roboterbewegung enthält der Quell-Code auch Befehle zum Starten und Abschalten von Laser, Drahtförderer und Gaszufuhr. Der Ablauf des Programms ist schematisch in Abbildung 34 dargestellt. Die Befehle für das eigentliche Schweißen stehen in einer „for-Schleife“, sodass sich beliebig viele Raupen bzw. Konturen, die ein Absetzen erfordern, direkt hintereinander schweißen lassen. Dafür müssen die Koordinaten von Startpunkt ② und Endpunkt ③ am Ende jeder Schweißung um einen definierten Wert verschoben werden. Nachstehend werden die einzelnen Stationen und die daran geknüpften Aktionen erläutert.

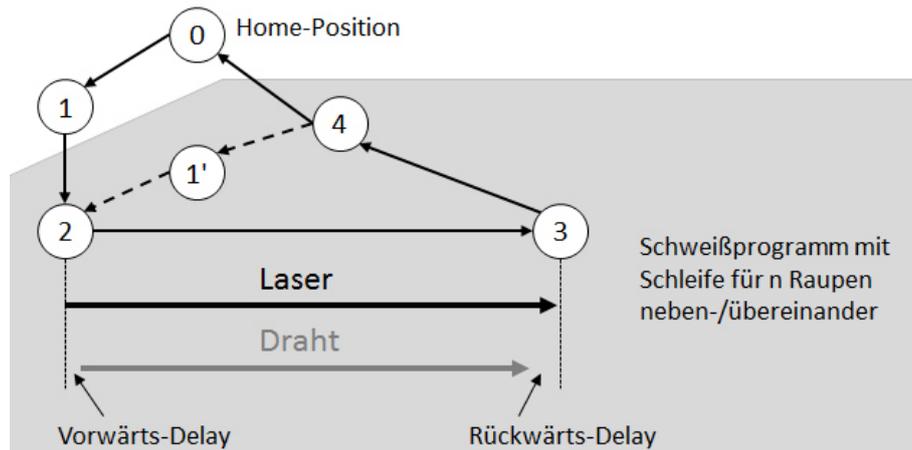


Abbildung 34 Schematischer Ablauf des Roboterprogramms

Vorbereitung Der Draht wird entsprechend der Vorgaben positioniert und die prozessrelevanten Parameter in dem Programm hinterlegt. Nach Verlassen der Laserzelle muss die Tür geschlossen und verriegelt werden, um sicherzustellen, dass sich während des Schweißvorgangs niemand in der Gefahrenzone befindet.

- ① **Home-Position** Der Roboter fährt aus seiner momentanen Ist-Position in die Home-Position und initialisiert dadurch das Programm. Nach einer Bestätigung durch den Bediener wird der Laser gestartet. Laser und Drahtförderer übernehmen die ihnen zugewiesene Leistung bzw. Fördergeschwindigkeit.
- ① **Vorposition** Sobald der Laser den Bereitschaftsstatus meldet, fährt der Roboter mit verhältnismäßig hoher Geschwindigkeit in die Vorposition, die sich senkrecht über der Startposition befindet. Durch den Zwischenschritt erfolgt die letzte Bewegung vor dem Start auf nur einer Achse im Raum, sodass Schwingungen reduziert werden können, die potentiell die Drahtpositionierung beeinträchtigen. Von der Vorposition fährt der Roboter direkt weiter in die Startposition.
- ② **Startposition** Die Startposition definiert den Raupenbeginn. Sobald sich der Roboter dort befindet, öffnet sich das Ventil für die Schutzgaszufuhr. Nach einer Wartezeit von 5s beginnt das eigentliche Schweißprogramm. Die Vorströmzeit dient einerseits dazu, sämtliche Restluft zu verdrängen, die sich eventuell in dem Schlauch befindet. Außerdem befindet sich die Schweißstelle beim Start dann schon unter Schutzgasatmosphäre.

- ② Schweißen Das Verfahren von Start- zu Endpunkt erfolgt linear mit der zuvor definierten Schweißgeschwindigkeit. Das Ein- und Ausschalten von Laserstrahl und Drahtförderung sind über sogenannte Trigger-Befehle mit entsprechender Verzögerung (Delay) an Start- bzw. Endpunkt gekoppelt. Mit Bewegungsbeginn startet auch sofort der Laser (0s Delay zum Startpunkt). Die Drahtzufuhr wird verzögert ausgelöst (Vorwärts-Delay zum Startpunkt) und stoppt bereits vor Erreichen des Nahtendes (Rückwärts-Delay zum Endpunkt). Die Dauer der Verzögerung bestimmt über das Aussehen der Raupe am Anfang und Ende. Mit dem Förderstopp verbunden ist das schnelle Zurückziehen des Drahts aus der Schmelze und anschließende Fördern um einen definierten Betrag. Die Werte für den Rückzug- und Positionierweg sowie die Wartezeit dazwischen können direkt über das Touchpad der Steuerung für den Drahtförderer eingegeben werden.
- ↓
- ③ Endposition Die Endposition definiert das Raupenende. Bei ihrem Erreichen wird der Laser ausgeschaltet und in den Bereitschaftsmodus gesetzt. Der Roboter führt vom Endpunkt eine relative Bewegung senkrecht nach oben aus, um das Drahtende von der erkaltenden Naht wegzubringen.
- ④ Automatisiertes Drahtabtrennen Nach jeder Raupe erfolgt ein automatisiertes Durchtrennen des Drahtes im freien Raum, um die Wiederholbarkeit der Drahtpositionierung sicherzustellen.

Einzelne Raupen Das Gasventil wird geschlossen, der Laser heruntergefahren und der Roboter kehrt zurück in die Home-Position

Wände und Beschichtungen Unter entsprechender Modifikation von Start- und Endpunkt werden die Programmpunkte ① bis ④ für die n Raupen wiederholt. Nach Verlassen der Schleife gleicht der Ablauf dem einer einzelnen Raupe.

4.1.5 Schweißparameter definieren

Das zu definierende Parameterset besteht in erster Linie aus den Werten Laserleistung, Drahtvorschub und Schweißgeschwindigkeit, die – wie im Kapitel zum Laserschweißen (Kapitel 2.3) beschrieben – aufeinander abgestimmt sein müssen. In den bisherigen Versuchen in der Laserzelle des IWS haben sich die Einstellungen in Tabelle 6 als erfolgreich erwiesen. Um sicherzustellen, dass sich das Parameterset nicht am Rand des stabilen Fensters befindet, wurde die Schweißgeschwindigkeit nach oben und unten variiert. Sowohl mit $v_{Schweiß} = 1000 \text{ mm/min}$ als auch mit $v_{Schweiß} = 800 \text{ mm/min}$ ließen sich zufriedenstellende Ergebnisse reproduzierbar erzielen, sodass das Parameterset als Standard festgelegt wurde.

Tabelle 6 Schweißparameterset

Größe		Wert
Laserleistung	P_L	2600 W
Drahtvorschub	v_{Draht}	2 m/min
Schweißgeschwindigkeit	$v_{Schweiß}$	900 mm/min
Schutzgasmenge	\dot{V}_{Gas}	5 l/min

Zusätzlich mussten die Zeiten für den Vorwärts- und Rückwärts-Delay des Drahts gegenüber dem Laser ermittelt werden. Ohne die Verzögerung kam es zu einer Rauchentwicklung insbesondere am Nahtbeginn und zu einer wulstigen Geometrie am Raupenende (Abbildung 35). Mit den Delay-Zeiten $t_{delay_start} = +100 \text{ ms}$ (Draht wird 100 ms nach dem Laser gestartet) und $t_{delay_ende} = -300 \text{ ms}$ (Drahtförderung stoppt 300 ms vor dem Raupenende) konnten gute Ergebnisse erzielt werden (Abbildung 36). Diese Werte wurden sofern nicht anders deklariert in allen Versuchen genutzt.



Abbildung 35 Schweißergoßnis ohne Delay am Anfang und Ende



Abbildung 36 Schweißergoßnis mit Delays von 100ms (Start) bzw. 300ms (Ende)

4.2 Versuchsdurchführung

Bei allen Versuchen gilt, dass, wenn keine Angaben zu den Schweißparametern oder den Parametern der Positionierung gemacht werden, die Werte aus Tabelle 6 und Tabelle 7 angewendet wurden. Diese Positionierung entspricht dem jeweiligen aus der Literatur bekannten Optimum.

Tabelle 7 Optimale Einstellungen der Drahtzufuhr und -positionierung

Parameter		optimaler Wert
Abstand zum Werkstück	h	$h_{opt} = 0,1 \text{ mm}$
Stickout	l	$l_{opt} = 5 \text{ mm}$
Schweißrichtung	β	$\beta_{opt} = 0^\circ \hat{=} \text{schleppend}$
Schweißwinkel	α	$21^\circ \hat{=} \text{gute Oberfläche}$
Position in Schweißrichtung	a	$a_{opt} = 1 \hat{=} \text{am Spotrand}$
Position quer zur Schweißrichtung	b	$b_{opt} = 0,5 \text{ mm} \hat{=} \text{mittig}$

An dieser Stelle ist anzumerken, dass die im Folgenden beschriebenen Versuche hauptsächlich mit einem iterativen Ansatz durchgeführt wurden. Das bedeutet, dass innerhalb einer Testreihe ein Parameterset in der Regel unmittelbar von dem Schweißergebnis des vorangegangenen abhängig war. Beispielsweise wurde ein Parameter nur dann weiter verändert, solange das Schweißergebnis die Beurteilungskriterien erfüllte. War dies nicht der Fall, wurde die Messreihe entweder abgebrochen oder z.B. andere Positionierungsparameter angepasst. Teilweise wurden weitere Nebentests durchgeführt, um die Ursache der schlechten Qualität zu ergründen. Ergebnisse dieser Nebentests werden schon in diesem Abschnitt präsentiert.

4.2.1 Einzelraupen

Zu Beginn wurden nur Einzelraupen geschweißt, weil sich auf diesem Wege zeit- und kostensparsam ein Parameterfenster ermitteln lässt. Für jede Messreihe wurde immer zuerst eine Referenzraupe mit der Optimalpositionierung geschweißt. Diese diente als Referenzobjekt für die Beurteilung der im Anschluss erzielten Schweißergebnisse. Erstreckte sich eine Messreihe über mehrere Tage, wurden die ersten Raupen nach dem Einschalten des Lasers ebenso noch einmal mit der Optimalpositionierung gefertigt. Wenn Schweißungen eine unerwartet schlechte Qualität hatten, wurde auch innerhalb einer Messreihe eine Referenzraupe geschweißt. Auf diese Weise sollten Störvariablen wie etwa eine schwankende Laserleistung als Ursache für ein Schweißergebnis ausgeschlossen werden können.

Grundsätzlich wurde immer nur ein Parameter schrittweise vom Optimum entfernt, alle anderen Parameter blieben konstant auf der Referenzeinstellung. Eine Versuchsreihe wurde abgebrochen,

sobald eine geschweißte Raupe nicht mehr den Qualitätskriterien entsprach. Der so ermittelte jeweilige Grenzwert wurde im Anschluss gegebenenfalls dahingehend überprüft, ob er auch noch Gültigkeit hat unter Anwendung bereits bekannter Grenzwerte der anderen Parameter. War dies nicht der Fall, wurde der Parameter wieder schrittweise seinem Optimum angenähert, bis das Ergebnis zufriedenstellend war. Im Folgenden wird auf die Vorgehensweise beim Einstellen der Parameter sowie auf die jeweilige Schrittweite eingegangen. Wegen des iterativen Studiendesigns bedarf es bezüglich der untersuchten Parametersets zum Teil Erläuterungen, für die die Schweißergebnisse herangezogen werden müssen. Deswegen werden die Tabellen mit den Parametersets der Versuchsreihen erst im Kapitel zu den Ergebnissen präsentiert.

4.2.1.1 Zufuhrwinkel α

Der Winkel α ergibt sich aus dem Kippwinkel des Drahtförderers und dem Krümmungswinkel des Pistoleneinsatzes. Der Winkelmesser mit Nonius (Abbildung 37) wird deswegen an das Rohr des Pistoleneinsatzes angelegt. Dies entspricht potentiell nicht ganz dem tatsächlichen Winkel des Drahts gegenüber dem Substrat, weil er nicht 100% mittig im Rohr sitzt, sondern die Düse oben berührt. Die Alternative, den Stickout auf eine aussagekräftige Länge zu fördern, erlaubt aber auch nur eine eingeschränkt genaue Messung, weil sich der Draht schon bei kleinen Längen zu biegen beginnt. Bei genügend kleinen Stickout-Längen ohne Biegung ist fraglich, ob der Winkel überhaupt sinnvoll überprüft werden kann. Des Weiteren ist das Rohr stabiler und besser sichtbar als der Draht.

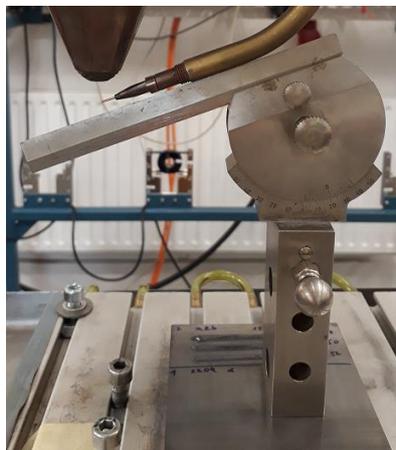


Abbildung 37 Winkelmesser mit Nonius am Rohr

Für den Zufuhrwinkel α wurde in der Forschung bereits ein Fenster für einen stabilen Prozess definiert. Auch die Auswirkungen einer Veränderung innerhalb dieser Grenzwerte auf das Schweißergebnis sind bekannt (vgl. Kapitel 2.3.2.2). Deswegen wurde α in allen Versuchen konstant auf 20° gehalten (also kurz oberhalb des bekannten Grenzwerts), um eine möglichst hohe Oberflächenqualität zu erhalten.

4.2.1.2 Zufuhrrichtung β

Die Zufuhrrichtung β ist in dem Sinne keine Variable der Positionierung, die vorher eingestellt wird, sondern ergibt sich in der Regel aus der Form der Bahn, die das Laser-Draht-System abfährt, also dessen Relativbewegung zum Substrat. In der Standardeinstellung (Kopfplatte parallel zur y-Achse; in positive y-Richtung, d.h. von links nach rechts) ist $\beta = 0^\circ$ (100% schleppend). Für einen anderen Winkel muss die Kopfplatte um die z-Achse gedreht und/oder der Schweißweg modifiziert werden. Während erstere Alternative potenziell begrenzt ist in den einstellbaren Winkeln auf Grund von Kollisionsgefahr, kann durch letztere jeder beliebige Winkel $\beta = 0 \dots 360^\circ$ eingestellt werden. Durch entgegengesetztes Drehen der Werkstückauflage (z.B. bei einem Drehkipptisch) kann der maximale Wert von β gegebenenfalls reduziert werden. Hier wurde der Winkel zwischen schleppendem ($\beta = 0^\circ$) und stechendem ($\beta = 180^\circ$) Schweißen variiert im Abstand von 45° , ansonsten wurde die Referenzeinstellung beibehalten.

4.2.1.3 Drahtabstand h

Beim Verstellen von h wird die gesamte Positioniervorrichtung vertikal bewegt. Zum Validieren der eingestellten Höhe dienten Endmaße: Die Kopfplatte wurde von der Startposition um 1mm in z-Richtung hochgefahren, weil die einzustellende Höhe kleiner ist als die Mindesthöhe der Endmaße von 1mm. Der Ansatz, mittels eines Stromdurchgangsgeräts zu prüfen, ob die Drahtspitze das Endmaß berührt oder nicht, wurde verworfen, da dadurch nur bestätigt wird, dass h_{ist} nicht größer ist als h_{soll} . Der Status „berührt“ kann aber theoretisch auch bedeuten, dass h_{ist} mehrere Zehntelmillimeter zu klein ist und der Draht unter Spannung aufliegt. Außerdem könnte es sein, dass bei einem „berührt nicht“ nur ein Hundertstelmillimeter fehlt. Deswegen wurde für h_{ist} ein Vertrauensintervall definiert von $h_{soll} \pm 0,09 \text{ mm}$. Die praktische Umsetzung wird an einem Beispiel erläutert: Die Zielhöhe $h_{soll} = 0,1 \text{ mm}$ entspricht einem Endmaß von 1,1 mm. Damit h_{ist} akzeptiert wird, muss das Endmaß von 1mm ($\hat{=} h_{ist} - 0,1 \text{ mm}$) Höhe ohne Widerstand unter die Drahtspitze passen (Abbildung 38, links). Gleichzeitig darf sich das Endmaß von 1,2 mm ($\hat{=} h_{ist} + 0,1 \text{ mm}$) auch mit leichtem Druck nicht unter den Draht schieben lassen (Abbildung 38, rechts).

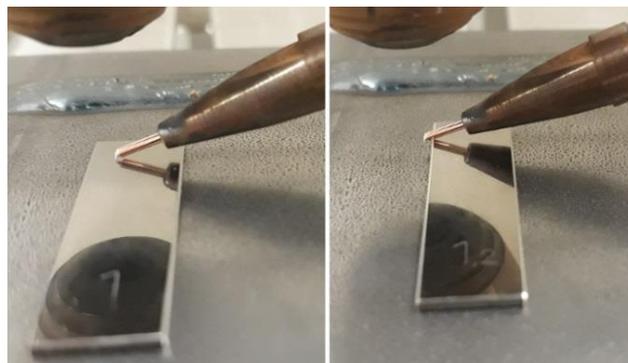


Abbildung 38 Überprüfung von h_{ist} am Beispiel $h_{soll} = 0,1 \text{ mm}$

Wegen des Vertrauensintervalls von $\pm 0,1$ mm bei der Messmethode mit den Endmaßen wurde hier anfangs eine Schrittweite von 0,2 mm gewählt. Um ökonomisch vorzugehen wurde die Schrittweite teilweise vergrößert. Ausgehend von $h = 0,1$ mm erfolgte die Veränderung des h-Werts zunächst in positive Richtung (Vergrößerung des Abstands) und anschließend auch in negative, sodass der Draht berührt bzw. leicht aufgesetzt hat in der Startposition.

4.2.1.4 *Stickout l*

Über die manuelle Steuerung am Drahtförderer (Abbildung 25, S.45) kann der Draht gefördert und zurückgezogen werden. Überprüft wurde mit einem Stahlmaß (Abbildung 39), sodass schätzungsweise eine Genauigkeit von $\pm 0,5$ mm erreicht wird. Der Standard-Stickout im IWS-Labor beträgt 5mm. Ein kleinerer Wert ist nicht sinnvoll, weil die Düse dann gegebenenfalls das Blech berührt (Abbildung 40). Außerdem muss gewährleistet sein, dass der Draht am Ende der Schweißraupe genügend weit aus dem Schmelzbad zurückgezogen werden kann. Bei einem zu kurzen Stickout besteht die Gefahr, dass die Drahtspitze in die Düse eingezogen wird.

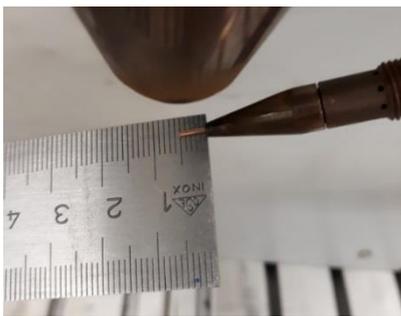


Abbildung 39 Stahlmaß als Prüfmittel für die Stickouteinstellung



Abbildung 40 Überprüfen der Berührungsfreiheit zwischen Drahtdüse und Substrat/Schweißgut

Der Soll-Stickout muss nach jeder Raupe zuverlässig wiederhergestellt werden, weil der Ist-Stickout nach dem Schweißen variiert zwischen den einzelnen Durchgängen, sodass die Drahtspitze mal im Spotzentrum, mal sogar außerhalb des Spots liegt. Befindet sich die Drahtspitze vor Start außerhalb des Spots, hat der Laser schon eine Strecke x zurückgelegt, bevor die Drahtzufuhr und damit die Raupe beginnt. Bei Beschichtungen und Wänden sind identische Bedingungen beim Start unerlässlich für eine gleichmäßige Geometrie. Weil hier mehrere Raupen direkt ohne Unterbrechung hintereinander geschweißt werden müssen, muss das Wiederherstellen des Soll-Stickouts automatisiert geschehen. Der Stickout wurde mit einer Schrittweite von 2,5mm verändert. Eine feinere Abstufung erschien nicht sinnvoll, da eine so genaue Positionierung auf Grund der manuellen Förderung und der Messmethode mit Stahlmaß nicht möglich war.

4.2.1.5 *Position der Drahtspitze auf dem Laserspot: a und b*

Die Positionierung der Drahtspitze relativ zum Spot erfolgt mit Hilfe des Live-Bilds (Abbildung 41, links) der Beobachtungskamera. Das von einem Fadenkreuzgenerator über die Aufnahme gelegten

Koordinatensystem mit Hilfselementen (Abbildung 41, rechts) ermöglicht eine sehr genaue Einstellung. Der Ursprung der Achsen (blau markiert) liegt im Spotmittelpunkt. Der Hilfs-Kreis (gelb markiert) markiert die Laserspotgrenze. Die Hilfskreuze (rot markiert) lassen sich in x- und y-Richtung verschieben und erleichtern die genaue Positionierung des Drahtes relativ zum Spot. Die jeweiligen Koordinaten der Elemente sind in der Legende rechts im Bild abzulesen. Es ist anzumerken, dass die Orientierung der Achsen des Koordinatenkreuzes nicht der des Roboter-Koordinatensystems entspricht. Dieser Umstand beeinflusst aber in keinerlei Hinsicht die Positionierungsgenauigkeit.

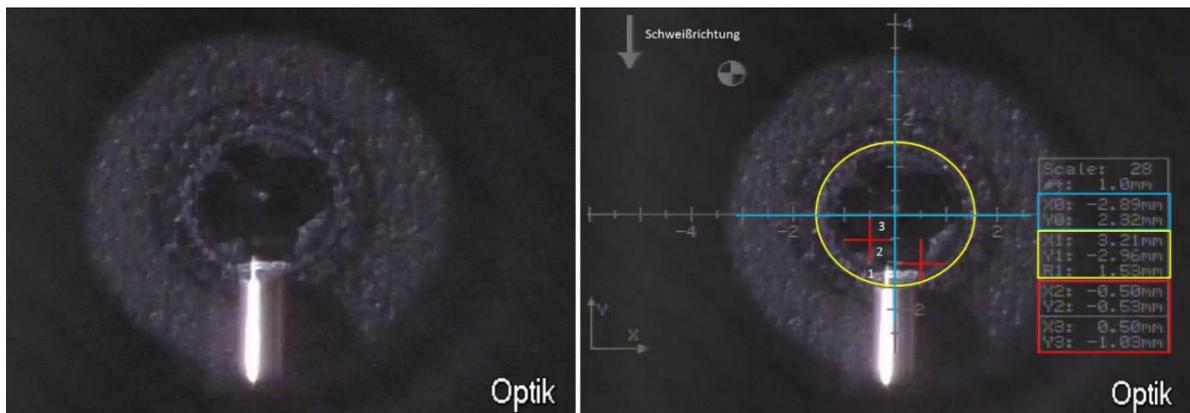


Abbildung 41 Live-Bild der Beobachtungskamera ohne und mit (rechts) Fadenkreuzgenerator

Für die Anpassung der Achsenskalierung an den Maßstab der Beobachtungskamera wurde ein Stahlmaß als Referenz ins Bild gelegt (Abbildung 42). Die Achsenskalierung kann nur mit einer gewissen Schrittweite verändert werden. Von der Skalierung wiederum ist dann die Schrittweite abhängig, mit der die Elemente verschoben werden können. Deswegen werden die angestrebten Werte nicht immer ganz genau erreicht, wie z.B. beim Abstand der beiden Hilfskreuze (1,02 mm statt 1,00 mm). Dementsprechend ist auch die minimale Schrittweite der Parameter a und b vorgegeben. Der Stickout wurde hier auf $l = 7,5 \text{ mm}$ gesetzt, damit die Kontaktspitze auch bei $a = 3$ noch genügend Abstand zum Rand des Laserstrahls hat.



Abbildung 42 Validierung der Achsenskalierung mittels Stahlmaß

Die x-Koordinaten der beiden Kreuze werden so aufeinander abgestimmt, dass ihr Abstand zueinander (nahezu) dem Drahtdurchmesser von 1mm entspricht. Dementsprechend muss der Draht genau zwischen den Kreuzen liegen. Zur Ermittlung des Toleranzfensters für b werden beide Kreuze jeweils um eine Schrittweite in die gleiche Richtung verschoben, bis die damit geschweißte Raupe nicht mehr den Qualitätsansprüchen genügt. Für den Parameter b gilt dabei immer der vom Betrag größere Wert der x-Koordinaten der Kreuze, wie in Abbildung 43 demonstriert. Deswegen entspricht der Wert $b = 0,5 \text{ mm}$ der optimalen Mittelposition.



Abbildung 43 Positionierung für $b = 0,76 \text{ mm}$

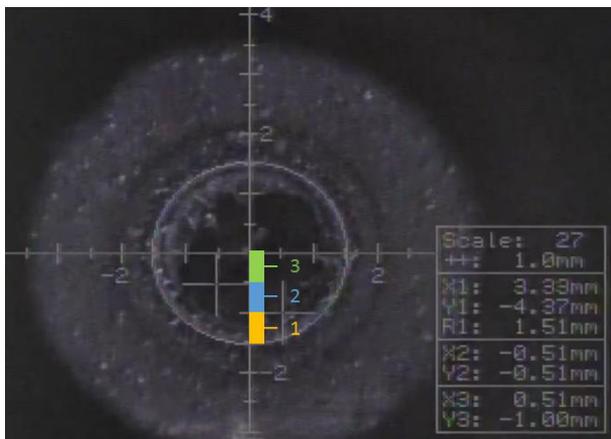


Abbildung 44 Einteilung des Spotradius bzgl. des Parameters a



Abbildung 45 Positionierung für $a = 1$

Wegen der bereits bekannten Einflüsse des Parameters a auf das Schweißergebnis (vgl. Abschnitt 2.3.2.2), erschien eine Überprüfung im Sinne der Machbarkeit unter ansonsten optimalen Bedingungen wie bei den anderen Parametern nicht notwendig. Vielmehr sollte überprüft werden, ob die Position a Einfluss hat auf das Toleranzfenster der anderen Parameter. Weil mit steigendem Abstand zur Vorderkante die Oberflächenqualität abnimmt, wurde das Augenmerk nur auf die vordere Hälfte des Spots gelegt. Eine grobe Einteilung des Radius in drei gleichgroße Bereiche (1, 2 und 3; Abbildung 44) erschien ausreichend. Dementsprechend wurden die Kreuze in y-Richtung auf die Werte $-0,5$ und $-1,0$ gesetzt, während die horizontale Achse und der Hilfskreis die äußeren Grenzen bilden. Die Drahtspitze muss sich prinzipiell innerhalb des jeweiligen Bereichs befinden, damit die

Positionierung akzeptiert wird. Sie wurde jeweils in etwa an der zentrumsnahen Bereichskante platziert (vgl. Abbildung 45), um einen möglichst konstanten Wert zu haben.

4.2.2 Beschichtungen – Raupen nebeneinander

Ziel der in diesem Abschnitt beschriebenen Versuchsreihen ist, die Gültigkeit der im Kapitel zu Einzelraupen ermittelten Maximalwerte der einzelnen Positionierungsparameter für Beschichtungen zu überprüfen. Mit Beschichten ist hier das einlagige Schweißen mehrerer nebeneinander liegender, sich überlappender Raupen gemeint, sodass ein flächiger (zweidimensionaler) Auftrag einer definierten Breite B_n und Dicke D_B auf dem Substrat entsteht. Der Versatz Δx zwischen den Einzelraupen ist dabei konstant. Der Aufbau einer Beschichtung ist schematisch in Abbildung 46 dargestellt. In der Realität hat allerdings – anders als hier – jede aufgetragene Raupe im Querschnitt den gleichen Flächeninhalt, weil die Schweißparameter (Leistung, Schweißgeschwindigkeit und Drahtvorschub) und damit auch das pro Strecke deponierte Material für jede Raupe gleich sind. Ab der zweiten Raupe ändert sich dann abhängig vom Versatz potenziell die Querschnitts-Geometrie, z.B. wird sie höher.

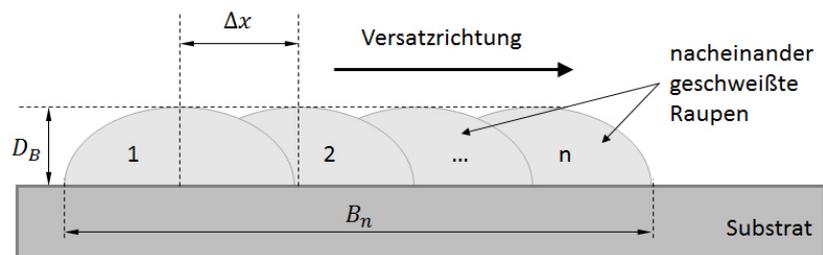


Abbildung 46 Schematischer Aufbau einer Beschichtung

Mit Hilfe einer Schleife (for $i=1$ to n) im Roboter-Programm können die Schritte ① bis ④ (vgl. Abschnitt 4.1.4, S. 50) beliebig häufig wiederholt werden. Um den Versatz der Raupe gegenüber der vorhergehenden zu realisieren, werden die Start- und Endposition (hier nur die x-Koordinate) der Raupe nach jeder Einzelschweißung über einen entsprechenden Befehl automatisch um einen definierten Betrag (Δx) verschoben. Bei der Charakterisierung von Beschichtungen wird für gewöhnlich die Überlappungsrate herangezogen, die das Verhältnis von Versatz zur Raupenbreite ist und in Prozent angegeben wird. Zur Ermittlung der Raupenbreite wurden fünf Einzelraupen geschweißt und mit dem Messschieber jeweils an den gleichen drei Punkten (Abbildung 47) vermessen. Die insgesamt 15 Messwerten ergeben den Mittelwert $B_{Raupe} \approx 2,9 \text{ mm}$ ($SD=0,07 \text{ mm}$).

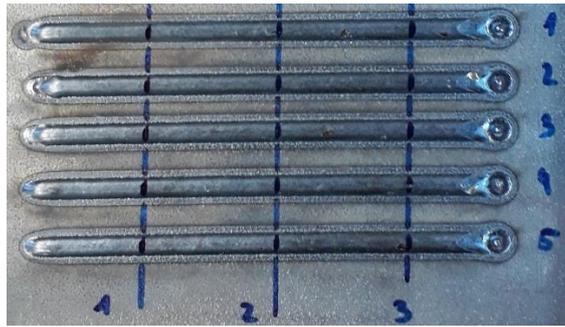


Abbildung 47 Messpunkte zur Ermittlung der Raupenbreite

4.2.2.1 Einfluss der Überlappungsrate

Um bei der Ermittlung des Toleranzfensters bei Beschichtungen mit stabilen Bedingungen arbeiten zu können, wurde zunächst der Einfluss der Überlappungsrate auf die Qualität untersucht. Hiermit sollte sichergestellt werden, dass eine Positionierungseinstellung nur dann „durchfällt“, wenn der Rand des jeweiligen Parameterfensters erreicht wird. Weil glatte Werte der Überlappungsrate krumme Werte für den dafür notwendigen Versatz bedeutet hätten (z.B. 60 % Überlappung entsprechen 1,16mm Versatz bei einer 2,9mm-Raupe), wurde stattdessen der Versatz Δx in 0,1 mm-Schritten verändert und daraus die entsprechende Überlappung bestimmt. Auch wenn in der Literatur Überlappungsraten bis 60 % realisiert wurden [z.B. 46], war der Startwert hier ein Versatz von 1,5 mm (ca. 48 % Überlappung), um sich dem Rand des Prozessfensters nähern zu können. Der Versatz wurde in 0,1-mm-Schritten vergrößert bzw. verkleinert. Mit den verschiedenen Δx -Werten wurden jeweils fünf Raupen geschweißt. Die Drahtposition entsprach mit Ausnahme der Höhe h der Referenzeinstellung. Mit der Standardhöhe ($h = 0,1 \text{ mm}$) würde der Draht bei Überlappungsraten größer 50 % auf bereits geschweißte Raupen aufsetzen. Deshalb wurde der Drahtabstand zunächst auf $h = 0,5 \text{ mm}$ gesetzt, damit alle Parametersets unter vergleichbaren Bedingungen getestet werden können. Bei den Sets mit einer Überlappung größer 50 % musste h zusätzlich erhöht werden, nachdem die erste Beschichtung mit $h = 0,5 \text{ mm}$ in der Qualitätsbeurteilung durchgefallen war. Die Auftragsbreite wurde mit dem Messschieber ermittelt, die Auftragshöhe mit dem Laserscanner. Die Drahtpositionierung wurde jeweils nur einmalig vor der ersten Raupe eingestellt. Zwischen den Raupen wurde keine Korrektur vorgenommen. Zudem wurde überprüft, ob sich bei $\Delta x = 1,5 \text{ mm}$ nicht doch ein Drahtabstand von $h = 0,1 \text{ mm}$ realisieren lässt.

Anschließend wurden mit $h = 0,1 \text{ mm}$ zusätzlich jeweils zehn Raupen bei $\Delta x = 1,6 \dots 2 \text{ mm}$ geschweißt, um sich den tatsächlichen Bedingungen einer Beschichtung anzunähern. Dieses Vorhaben stellte sich dabei als schwieriges Unterfangen heraus. Obwohl mit den Parametersets fünf Raupen nebeneinander geschweißt werden konnten, verschlechterte sich die Qualität und Stabilität (im Sinne der Wiederholbarkeit) bei zehn Raupen (Abbildung 142 bis Abbildung 146, S. 123). Selbst bei einem Versatz von $\Delta x = 2 \text{ mm}$ (also einer Überlappung von ca. 30 %) konnten nur zum Teil qualitativ

akzeptable Beschichtungen hergestellt werden. Vor der Durchführung weiterer Versuche sollte zunächst dieses Problem behoben werden, um später eine valide Aussage über den Einfluss des jeweiligen Parametersets auf die Qualität der Beschichtung treffen zu können. In Abschnitt 4.2.2.3 werden verschiedene Lösungsansätze vorgestellt und auf ihre Wirkung hin untersucht.

Bei den obigen Versuchen war die Geometrie auf der Startseite der Beschichtung häufig unregelmäßig (Abbildung 48). Beim Beobachten der Drahtspitze (mittels Fokuskamera) zwischen dem Schweißen der Raupen stellte sich heraus, dass der Stickout vor Schweißbeginn nicht konstant war, weil der Draht unterschiedlich stark abbrannte. Deswegen wurde in die Schleife im Schweißprogramm ein Zusatzschritt zur automatisierten Wiederherstellung des Soll-Stickouts eingefügt. Die Versuche zur Identifikation der dafür notwendigen Parameter sind in Abschnitt 4.2.2.2 beschrieben.

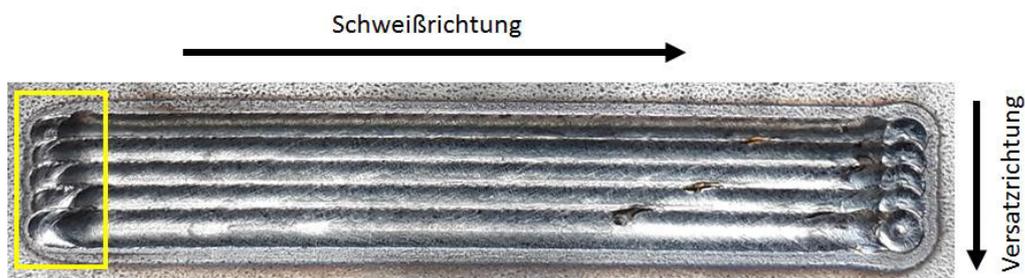


Abbildung 48 Geometrie der Beschichtung auf der Startseite (links)

4.2.2.2 Automatisierte Stickout-Herstellung

Für ein vollständiges Durchtrennen sind die Pulsparameter und die Länge des abzutrennenden Drahtes entscheidend. Die für den hier verwendeten Draht erforderliche Mindestlänge, Leistung und Pulsdauer wurden in einer Versuchsreihe (Tabelle 8) ermittelt. Gearbeitet wurde mit einem 3-mm-Spot, wobei die Drahtspitze bei einem 5-mm-Stickout an der Vorderkante des Spots positioniert war. Die Mindestlänge L_{min} bezeichnet die gesamte Länge des Drahtendes gemessen ab der Düse. Der Draht wurde manuell auf l_{min} gefördert und mit dem Stahlmaß geprüft. Im automatisierten Betrieb kann L_{min} über die von der Fördergeschwindigkeit abhängige Förderdauer hergestellt werden. Anhaltspunkt für die Startwerte (Set-Nr. 1) war die vergleichbare Vorstudie einer Bachelorarbeit [47], deren Ergebnisse auf Grund eines dort kleineren Durchmessers als hier verwendet nicht übernommen werden können. Mit den Parametersets wurden die in Abbildung 49 dargestellten drei verschiedenen Ergebnisse erzielt. Mit den Sets 8 und 9 konnte der Draht im ersten Anlauf zwar erfolgreich durchtrennt werden, dies war aber nicht reproduzierbar. Aus dem Ergebnis von Set 11 geht hervor, dass auch eine minimale Pulsdauer erfüllt sein muss und diese nicht durch ein längeres Drahtende kompensiert werden kann. Für die weiteren Versuche wurde das Parameterset 7 (grau hinterlegt) angewendet.

Tabelle 8 Parameterstudie zum laserbasierten Drahtdurchtrennen

Set	L_{min} [mm]	P_{Puls} [W]	t_{Puls} [ms]	Ergebnis
1	30	1400	140	Ende hängt dran
2	30	1500	140	keine Trennung
3	30	1500	200	keine Trennung
4	30	1400	200	Ende hängt dran
5	35	1400	200	Trennung erfolgreich
6	35	1400	140	keine Trennung
7	35	1400	190	Trennung erfolgreich; reproduzierbar
8	35	1400	180	Trennung erfolgreich; nicht reproduzierbar
9	35	1400	160	Ende hängt dran, fällt aber ab
10	35	1400	170	Trennung erfolgreich; nicht reproduzierbar
11	40	1400	160	Ende hängt dran



Abbildung 49 Zustände nach dem Durchtrenn-Prozess: keine (links), unvollständige (mittig) und vollständige Durchtrennung (rechts)

4.2.2.3 Maßnahmen zur Herstellung der Prozess-Stabilität bei Beschichtungen

Sehr häufig auftretende Fehler bei 10-Raupen-Beschichtungen waren „Pickel“ auf der ansonsten vollständig ausgebildeten Raupe (Abbildung 50) bzw. herausstehende, nicht aufgeschmolzene Drahtspitzen. Die ersten zwei bis drei Raupen waren in der Regel fehlerfrei, während sich zum Ende hin die Fehler tendenziell häuften. Vereinzelt trat ein solches Erscheinungsbild auch bei Fünf-Raupen-Beschichtungen auf, die mit der Referenzpositionierung gefertigt worden waren.

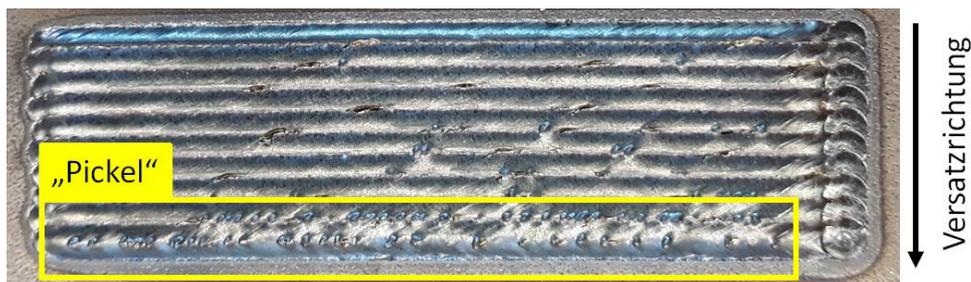


Abbildung 50 Typischer Fehler bei 10-Raupen-Beschichtungen

Die oben beschriebenen Fehler sind ein Hinweis darauf, dass (partiell) die zur Verfügung stehende Leistung nicht ausreicht, um den dem Schmelzbad zugeführten Draht vollständig aufzuschmelzen. Theoretisch ist jedoch davon auszugehen, dass bei späteren Raupen weniger Energie notwendig ist als bei früheren, weil das Blech dann schon warm ist. Auch die umgekehrte Annahme, dass das Blech zu warm wird, konnte ausgeschlossen werden, weil der Einsatz einer Kühlplatte während des Schweißens die Fehler nicht reduzieren konnte.

Schließlich kam die Vermutung auf, dass der Laserstrahl auf Grund der ungleichmäßigen Oberfläche des Substrats eventuell unterschiedlich gut einkoppelt und deswegen der Energieeintrag nicht konstant ist. Vor diesem Hintergrund wurde der Effekt verschiedener Vorbehandlungen, die potenziell das Absorptionsverhalten des Blechs verbessern sollten, auf das Schweißergebnis untersucht.

In einem ersten Ansatz wurde ein Blech mit Graphit (33 Graphit-Lack von Kontakt Chemie) besprüht, sodass eine matte, anthrazitfarbene Oberfläche entstand. Die hierauf geschweißten Beschichtungen wiesen wiederholbar eine sehr gute Qualität auf. Dem ersten Anschein nach konnten dadurch auch oberflächliche Silikate reduziert werden (Abbildung 51), diese Beobachtung war aber nicht reproduzierbar. Zusätzlich wurde überprüft, ob der Effekt der Graphit-Behandlung eventuell allein dadurch zustande kommt, dass grundsätzlich mehr Energie vom Blech aufgenommen wird (schwarze Oberflächen haben einen höheren Absorptionsgrad als weiße) und die Homogenität der Oberfläche möglicherweise sogar irrelevant ist. Deswegen sollte eine Beschichtung mit einer höheren Leistung $P_{\text{Laser}} = 2800 \text{ W}$ geschweißt werden. Dieser Versuch wurde jedoch abgebrochen, weil sich schon bei den ersten Raupen herausstellte, dass der erwartete Effekt ausblieb.



Abbildung 51 Beschichtung ($n=10$, $\Delta x = 1,9 \text{ mm}$) auf Graphit-Grundierung

Zur Ermittlung des Einflusses der Graphit-Behandlung auf den Kohlenstoffgehalt im Schweißgut wurde mit dem Funkenspektrometer eine chemische Analyse durchgeführt. Dafür wurden unter ansonsten identischen Bedingungen auf einem nackten und auf einem mit Graphit beschichteten Blech je zehn Raupen geschweißt. Mit dem Versatz $\Delta x = 1,9 \text{ mm}$ wurde sichergestellt, dass auch auf dem nackten Blech ein (nahezu) fehlerfreies Ergebnis entstand. Wegen des großen Versatzes war die Welligkeit der Beschichtungen allerdings so groß, dass das Schweißgut auf einem Bandschleifgerät bearbeitet werden musste, bis die Oberfläche eben war. Dies ist erforderlich, damit die zu

untersuchenden Proben plan auf dem Funkenspektrometer aufliegen, sodass am Messbereich eine abgeschlossene Atmosphäre herrscht. Im Anschluss wurden beide geschliffenen Proben mit dem Laserscanner auf einer Länge von 50 mm bezüglich der Beschichtungsdicke vermessen, um eine Aussage darüber treffen zu können, in welchem Abstand zur Substratoberfläche die chemische Analyse stattfand. Weil die Mittelwerte $D_{Graphit} = 1,04 \text{ mm}$ und $D_{Ohne} = 1,06 \text{ mm}$ quasi übereinstimmen, können die Ergebnisse der Spektralanalyse beider Proben direkt miteinander verglichen werden. Die daraus resultierenden Mittelwerte sind in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9 Chemische Zusammensetzung des Schweißguts mit und ohne Graphit-Behandlung des Substrats

	C	Mn	Si	P	S
Graphit	0,164	1,878	0,913	0,019	0,012
ohne	0,057	1,908	0,917	0,018	0,012

Gegenüber dem Schweißgut auf dem nackten Blech ($C_{ohne} = 0,057 \%$) hat sich der Kohlenstoffgehalt in dem Schweißgut auf Graphit ($C_{Graphit} = 0,164 \%$) mehr als verdoppelt. Eine Aufkohlung in diesem Ausmaß ist als kritisch zu betrachten, da davon ausgegangen werden muss, dass sich die metallurgischen Eigenschaften dadurch deutlich verändern. Ein höherer Kohlenstoffgehalt steht zum Beispiel in Verbindung mit einer größeren Härte und Sprödigkeit. Vor dem Hintergrund ist die Vorbehandlung mit Graphit zur Stabilisierung des Prozesses nur dann eine sinnvolle Maßnahme, wenn solche Eigenschaften erwünscht sind (z.B. zur Panzerung) oder wenigstens nicht unerwünscht.

Der zweite Ansatz bestand darin, die Blechoberfläche vor dem Schweißen mit Sandstrahlen zu mattieren. Abbildung 52 zeigt, dass mit dieser Maßnahme nicht die gleichen positiven Effekte erreicht werden konnten wie mit dem Graphit. Deswegen wurde diese Idee verworfen.



Abbildung 52 Beschichtung ($n=10$, $\Delta x = 1,9 \text{ mm}$) auf sandgestrahltem Blech

Der dritte Ansatz, das Blech mit Kreide (Helling Met-I-chek Developer D70) zu besprühen, basiert auf der Überlegung, dass mit der Graphit-Behandlung so gute Ergebnisse erzielt wurden, weil dadurch die Blech-Oberfläche optisch höchst homogen war. Die Kreide-Behandlung führte auch zu einer matten, aber weißen Oberfläche. Zur Probe wurde zunächst nur eine Einzelraupe unter

Standardbedingungen geschweißt, da nicht bekannt war, welchen Effekt eine solche Vorbehandlung auf den Schweißprozess hat. Nachdem sich dies als prinzipiell machbar erwiesen hatte, wurde eine Fünf-Raupen-Beschichtung mit dem Versatz $\Delta x = 1,5 \text{ mm}$ ($\cong 52\%$ Überlappung) gefertigt. Die Schweißergebnisse (Abbildung 53) zeigen, dass die Kreide keine Alternative darstellt. Abgesehen von dem deutlich erkennbaren Einbrand an der Raupenflanke, weist die Beschichtung zudem diverse Fehler auf. Folglich wurde auch dieser Ansatz verworfen.



Abbildung 53 Einzelraupe und Beschichtung ($n = 5, \Delta x = 1,5 \text{ mm}$) auf Kreide-Grundierung

Im Nachhinein wurden zwei weitere Ideen verfolgt, mit denen die Oberflächenqualität und Prozessstabilität bei Beschichtungen verbessert werden sollten. Die Kopfplatte, auf der das Laser-Draht-System montiert ist, wird standardmäßig leicht um den Winkel γ aus dem Lot ausgelenkt, damit reflektierte Strahlung nicht direkt in die Faser zurückgeworfen werden und diese zerstören kann. Das linke Bild in Abbildung 54 zeigt die Situation, wie sie in den bisherigen Versuchen vorlag: Die Neigung des Laserstrahls zeigt von der Kehle zwischen Vorgängerraupe und Substrat weg. Durch eine Umkehr der Versatzrichtung (realisiert durch ein negatives Δx im Schweißprogramm) sollte erreicht werden, dass sich der Draht quasi in die Kehle hineinschmiegt (rechtes Bild).

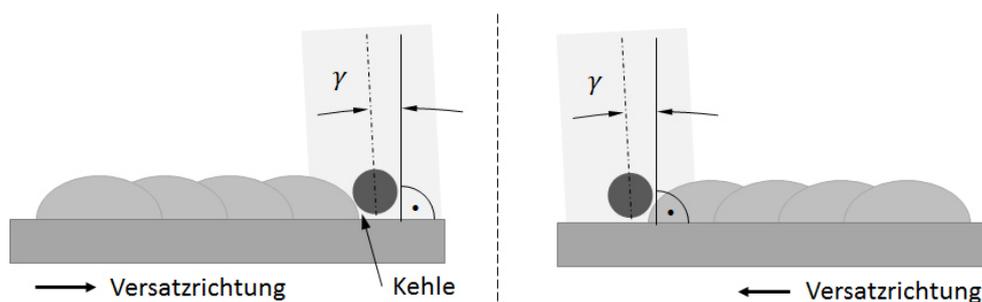


Abbildung 54 Neigung des Laser-Draht-Systems und Versatzrichtung: Ausgangslage (links) und umgekehrte Richtung (rechts)

Mit diesem veränderten Aufbau wurden zunächst nur zwei Raupen geschweißt mit $\Delta x = 1,5 \text{ mm}$, um die generelle Machbarkeit zu prüfen. Abbildung 55 zeigt das Schweißergebnis bei umgekehrter sowie als Referenz bei herkömmlicher Versatzrichtung. Es kam zu einer beträchtlichen Verschlechterung der Qualität. Die zweite Raupe legte sich eher auf die erste, anstatt wie bei der Referenz daneben. Hinzukommt, dass die Geometrie der zweiten Raupe unregelmäßig ist. Deswegen wurde dieser Ansatz verworfen.



Abbildung 55 Schweißung mit umgekehrter (1) und gewöhnlicher (2) Versatzrichtung

Die Positionierung stand anfangs nicht unter Verdacht, die die schlechte Oberfläche zu verursachen, weil die Probleme bei den Zehn-Raupen-Beschichtungen auch bei großem Versatz auftraten. Zudem war es häufiger problematisch, zehn Raupen zu schweißen als fünf. Schließlich entstand die Theorie, dass der Draht bei der Referenzpositionierung von dem schon existierenden Schweißgut aus der Solllage abgelenkt wird, wenn Δx einen bestimmten Grenzwert unterschreitet. In Abbildung 56 ist am Beispiel von $\Delta x = 1,5 \text{ mm}$ dargestellt, wo sich der Draht gemäß dieser Theorie tatsächlich befindet. Optimalerweise soll der Draht auf Mittelachse des Laserstrahls liegen ($b_{\text{soll}} = 0,5 \text{ mm}$). In dem Fall „überschneidet“ er sich aber mit der geschweißten Raupe. Unter der Annahme, dass der Draht nur seitlich ausgelenkt wird, bis er an der Raupe anliegt, ist hier $b_{\text{ist}} = 0,75 \text{ mm}$ und damit bereits an der Grenze des für Raupen definierten Parameterfensters (vgl. Abschnitt 5.1.4). Wird der Drahtabstand h genügend erhöht, touchiert er die Raupe nicht (Abbildung 57) und wird folglich auch nicht abgelenkt. Auf Grund dieser Überlegungen wurde mit $h = 0,5 \text{ mm}$ und einem Versatz von $\Delta x = 1,5 \text{ mm}$ sowie $\Delta x = 1,4 \text{ mm}$ jeweils eine Beschichtung mit zehn Raupen geschweißt.

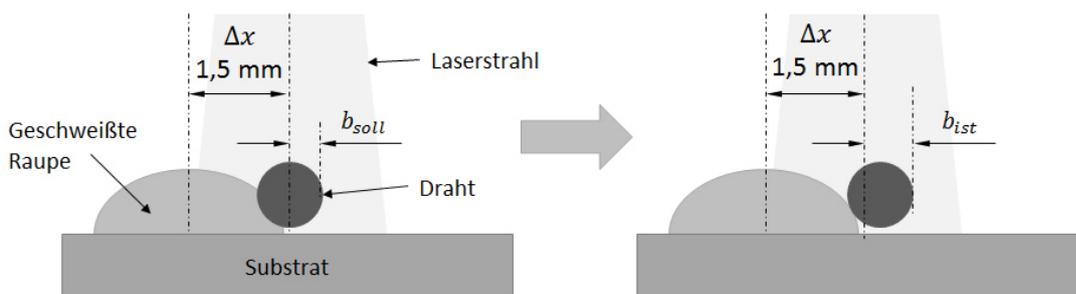


Abbildung 56 Soll-Lage des Drahts (links) und vermutete Ist-Lage beim Schweißen von Beschichtungen bei $h = 0,1 \text{ mm}$

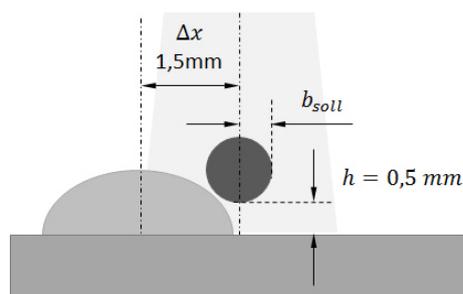


Abbildung 57 Lage des Drahts bei $h = 0,5 \text{ mm}$

4.2.2.4 Überprüfung der Gültigkeit des Parameterfensters für Beschichtungen

Es sollte überprüft werden, ob sich das für Einzelraupen gefundene Parameterfenster auch auf Beschichtungen anwenden lässt. Unter Standardbedingungen und einem Versatz von $\Delta x = 1,5\text{mm}$ wurden je Parameterset fünf Raupen geschweißt. Weil zum Zeitpunkt der Durchführung dieser Messreihe noch keine Alternative gefunden worden war, wurden die Bleche hier mit Graphit besprüht. Bei jedem Parameterset wurde immer nur ein Positionsparameter auf den entsprechenden für Einzelraupen definierten Maximalwert gesetzt, während alle anderen Parameter ihren Optimalwert behielten. Wenn das Ergebnis nicht zufriedenstellend war, wurde der veränderte Parameter so lange wieder seinem Optimum angenähert, bis die Beschichtung die Anforderungen erfüllte.

4.2.3 Wände – Raupen übereinander

Ein wesentlicher Aspekt des Auftragschweißens ist das mehrlagige Schweißen – also Einzelraupen oder Schichten übereinander – zur Generierung dreidimensionaler Geometrien. Ein Beispiel dafür sind dünnwandige Objekte, deren Basis aus einer Einzelraupe bestehen, auf die weitere Raupen (Lagen) aufgetragen werden, bis die gewünschte Höhe H_n erreicht ist. Der Aufbau einer solchen „Wand“ ist schematisch in Abbildung 58 dargestellt. Auch hier gilt, dass – unter der Voraussetzung einer konstanten Schweiß- und Drahtvorschubgeschwindigkeit – der Materialauftrag bei jeder Lage gleich ist und folglich der Flächeninhalt im Querschnitt bei jeder Lage ebenso gleich groß sein muss. Die Wandstärke D_W entspricht der Breite der ersten Raupe. Äquivalent zu dem Versatz Δx bei Beschichtungen, ändern sich hier die z-Koordinaten von Start- und Endpunkt der Raupe um den Wert Δz gegenüber der Fokusslage der vorangegangenen Raupe.

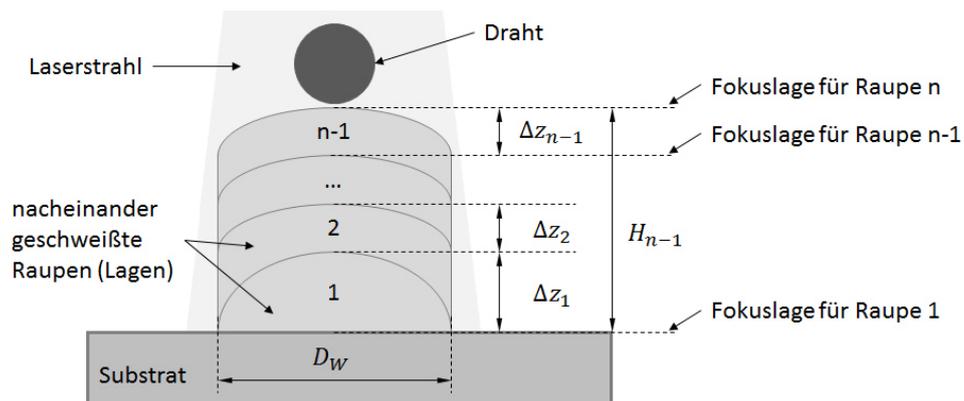


Abbildung 58 Schematischer Aufbau einer Wand (Querschnitt)

In früheren Versuchen am IWS wurde bereits erfolgreich eine Wand geschweißt. Von diesem Projekt waren allerdings die Parameter nicht dokumentiert, sodass daraus keine Informationen in Bezug auf den Schweißplan (Leistung je Lage, Versatz usw.) gewonnen werden konnten. Es diente aber als Anhaltspunkt, welche Geometrie und optische Beschaffenheit erreicht werden kann, beispielsweise deutlich abgrenzbare Lagen und eine steile Kante am Anfang und Ende der Wand.

Bei der ersten Wand wurde der Versatz im Schweißprogramm konstant auf die Höhe einer Einzelraupe gesetzt, also $\Delta z = 1 \text{ mm}$. Mit der Referenzpositionierung wurden fünf Lagen ohne Unterbrechung direkt hintereinander geschweißt mit Delay-Zeiten von $t_{\text{delay_start}} = +100 \text{ ms}$ und $t_{\text{delay_ende}} = -300 \text{ ms}$. Abbildung 59 zeigt das Schweißergebnis in der Seitenansicht. Insbesondere am Ende fällt die Wand flach ab und verkürzt sich dadurch von Lage zu Lage. Auch am Anfang ist eine leichte Neigung zu beobachten, die jedoch immer noch stärker ausfällt als beim Referenzobjekt. Die einzelnen Lagen sind deutlich voneinander abgrenzbar.



Abbildung 59 Fünfflagige Wand unter Standardbedingungen - Seitenansicht

Aufgrund des vergleichsweise langen Delays am Ende tritt bereits bei einer einzelnen Raupe ein flacher Übergang von Raupe zu Substrat auf. In Abschnitt 0 wurde dies angestrebt, um eine wulstige Endgeometrie zu vermeiden. Hier scheint dieser Umstand jedoch eher hinderlich, weil das Raupenende offenbar mit jeder Lage weiter zurückwandert. In einem erneuten Versuch mit Einzelraupen ließen sich die Delay-Zeiten auf $t_{\text{delay_start}} = +50 \text{ ms}$ und $t_{\text{delay_ende}} = -100 \text{ ms}$ reduzieren, ohne Beeinträchtigung von Schweißprozess oder -ergebnis. Mit diesen Einstellungen wurde unter ansonsten identischen Bedingungen eine fünfflagige Wand geschweißt (Abbildung 60). Die Geometrie am Raupenende konnte durch die Änderung deutlich verbessert und dem Soll angenähert werden. Die Form des Raupenanfangs hat sich hingegen verschlechtert. Auch hier lassen sich die einzelnen Lagen deutlich voneinander unterscheiden.

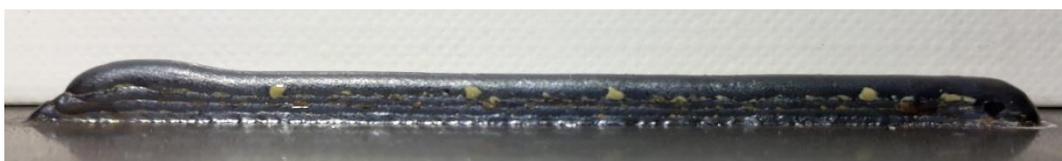


Abbildung 60 Fünfflagige Wand mit veränderten Delay-Zeiten

Beim Vermessen der Wände stellte sich heraus, dass die Gesamthöhe nicht wie intuitiv erwartbar der Summe aus fünf 1mm-hohen Einzelraupen – also 5 mm – entsprach, sondern nur etwa 3,5 mm betrug. Die einzelnen Lagen sind nicht gleichmäßig hoch, sondern werden mit steigender Wandhöhe tendenziell dünner [48]. Dies deckt sich mit der oben beschriebenen Annahme, dass der Flächeninhalt des Querschnitts der Einzelraupen gleich ist. Da eine Raupe im Gegensatz zum Substrat nicht plan, sondern gewölbt ist, muss das fehlende Volumen von der darüber geschweißten Raupe aufgefüllt werden. Folglich ist eine höher gelegene Lage flacher als die Basisraupe. Um den Versatz Δz an die jeweiligen Bedingungen anpassen zu können, kam der Laserscanner zum Einsatz, der mittels eines

Unterprogramm, das die mittlere Höhe der Messstrecke als Output-Variable an das Hauptprogramm zurückgibt, in die Schleife integriert wurde. Dieser Wert gilt in Relation zum Substrat, also der Fokusslage für die erste Raupe. Für die Festlegung der z-Koordinate der Fokusslage für Raupe „n“ wurde daher stets die Fokusslage der Raupe „1“ herangezogen. Bei allen folgenden Versuchen war das Blech während einer Messreihe ununterbrochen in einem auf der Nutenplatte befestigten Schraubstock eingespannt, um sicherzustellen, dass es zwischen den einzelnen Lagen nicht verrutscht.

Die Parameter, mit denen die einzelnen Lagen der ersten Wand geschweißt wurden, sind in Tabelle 10 aufgelistet. Die grau hinterlegten Felder zeigen an, welcher Höhenwert für Δz zum Schweißen der Folgelage herangezogen wurde. Bis zur Lage 4 wurde die vom Scan-Programm ermittelte durchschnittliche Höhe $H_{Scan,vor}$ der bis dahin existierenden Wand eingesetzt. Die vierlagige Wand wies mit dem bloßen Auge sichtbare Erhöhungen am Anfang und Ende auf (Abbildung 61), weshalb sie mit einem Dremel geebnet und anschließend die durchschnittliche Höhe $H_{Scan,nach}$ erfasst wurde. Zusätzlich wurde aus den Daten des Höhenprofils die maximale Höhe H_{max} ermittelt. Weil die Abweichung zwischen $H_{Scan,nach}$ und H_{max} größer war als der Drahtabstand ($h = 0,1 \text{ mm}$), wurde für die fünfte Lage H_{max} für den Höhenversatz genutzt. Bei den nachfolgenden Lagen wurde identisch vorgegangen. Beim Auftragen der vierten Lage war zudem ein langes Nachglühen des Schweißguts zu beobachten. Da dies ein Indiz für einen zu hohen Wärmeeintrag ist, wurde ab der fünften Lage mit reduzierter Leistung gearbeitet.

Tabelle 10 Parameter zum Schweißen der einzelnen Lagen von Wand 1

Lage	P_L [W]	Δz [mm]	$H_{Scan,vor}$ [mm]	Dremel	$H_{Scan,nach}$ [mm]	H_{max} [mm]
1	2600	0	1,02	-	-	-
2	2600	1,02	1,67	-	-	-
3	2600	1,70	2,29	-	-	-
4	2600	2,30	2,85	Ja	2,66	3,0
5	2400	3,00	3,33	Ja	3,30	3,6
6	2400	3,60	4,07	Ja	4,04	4,4
7	2400	4,40	-	-	-	-

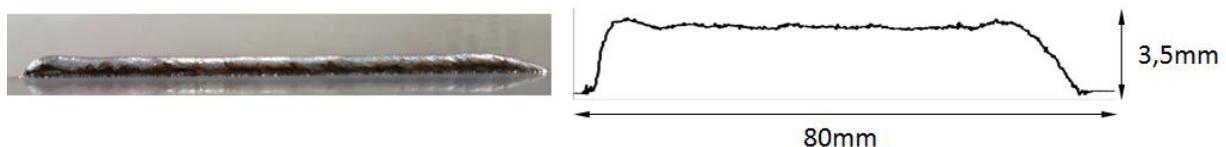


Abbildung 61 Vierlagige Wand: Seitenansicht (links) und vom Laserscanner ermitteltes Höhenprofil

Beim Schweißen der zweiten Wand wurde quasi äquivalent zur ersten Wand verfahren. Allerdings wurde hier auf die Messung von $H_{Scan,nach}$ verzichtet und stattdessen aus den Daten des Höhenprofils der mit dem Dremel geebneten Wand die durchschnittliche Höhe \bar{H} berechnet. Der Messbereich wurde jeweils so definiert, dass die Wand kurz hinter den Grenzen abfällt (Abbildung 62). Ab der zweiten Lage wurde die Wand vor dem Schweißen der nächsten Lage mit dem Dremel geebnet. Die entsprechenden Parameter für die einzelnen Lagen sind in Tabelle 11 aufgelistet. Bei der resultierenden Wand (Abbildung 170) sind die einzelnen Lagen anders als bei der Referenzwand kaum voneinander abzugrenzen. Wegen der Vermutung, dass trotz Senken der Leistung und zwischenzeitlichem Abkühlen die Wärmeeinbringung zu hoch war und deswegen das neuaufgetragene Material an der Wand herunterlief, sollte die minimal notwendige Leistung (bei gleichbleibender Schweiß- und Drahtvorschubgeschwindigkeit) pro Lage ermittelt werden. Der jeweils ermittelte Wert diente als Ausgangsleistung für die Messreihe der nächsten Lage. Für Δz wurde von der mit dem Minimalwert geschweißten Lage die mittlere Höhe \bar{H} bestimmt. Mit den festgestellten Werten wurden anschließend drei Wände in Serie nebeneinander lagenweise geschweißt, um die Prozesssicherheit zu überprüfen. Der Höhenversatz betrug ab Lage 3 konstant $\Delta z = 0,6 \text{ mm}$ (basierend auf den Ergebnissen der zehnlagigen Wand). Der Drahtabstand wurde auf $h = 0,5 \text{ mm}$ gesetzt, um auch noch bei Höhenschwankungen nach oben einen Abstand zwischen Draht und Wandkuppe zu gewährleisten. Die ersten drei Lagen wurden ohne Unterbrechung direkt hintereinander geschweißt und anschließend beurteilt. Die vierte Lage wurde ohne vorheriges Abschleifen der Wände aufgetragen.

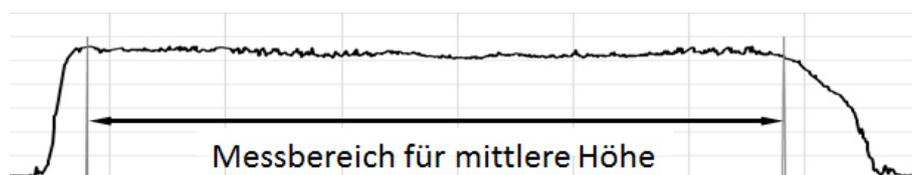


Abbildung 62 Messbereich für den Höhenmittelwert mit den Daten des Höhenprofils

Tabelle 11 Parameter zum Schweißen der einzelnen Lagen von Wand 2

Lage	P_L [W]	Δz [mm]	$H_{Scan,vor}$ [mm]	\bar{H} [mm]	H_{max} [mm]
1	2600	0	0,82	0,94	-
2	2600	1,0	1,49	1,6	1,7
3	2600	1,7	2,14	2,23	2,4
4	2600	2,4	2,75	2,82	3,0
5	2400	3,0	3,39	3,45	3,6
6	2400	3,6	4,04	4,1	4,3
7	2300	4,3	4,67	4,7	5,0
8	2300	4,9	5,32	5,28	5,5
9	2200	5,5	6,03	6,03	6,2
10	2200	6,2	-	-	-

5 Auswertung der Schweißergebnisse

Die Auswertung der Messreihen (und darüber auch die Gestaltung darauffolgender Versuche) erfolgte in dieser Studie ausschließlich durch Sichtprüfungen auf Basis der jeweiligen Qualitätskriterien. Die Sichtprüfung ermöglicht eine unmittelbare, zerstörungsfreie Einschätzung des Schweißersfolgs. Im Vorfeld der Arbeit war vereinbart worden, dass die Analyse von Schlibbildern der Proben nicht Teil dieser Studie sein sollte. Weil bei sämtlichen Versuchen der Schweißweg immer 70mm betrug, kann von der Länge des Schweißguts auf sonstige Abmessungen geschlossen werden. Deshalb wurde auf das Einfügen eines Maßstabs in den Aufnahmen der Proben verzichtet.

5.1 Einzelraupen

Jede Raupe wurde direkt im Anschluss anhand folgender Kriterien durch eine Sichtprüfung beurteilt. Der Ruß- und Rauchentwicklung wurde dabei nur eine sekundäre Bedeutung beigemessen.

- Vollständige Nahtausbildung in der Raupenlänge
- Vollständige Nahtausbildung in der Raupenbreite
- glatte Raupenoberfläche (vs. schuppig oder zackenbehaftet)
- keine Ruß- und Rauchentwicklung

Abbildung 63 zeigt eine Referenz-Raupe, die mit der Optimalpositionierung geschweißt wurde. Das Raupenende unterscheidet sich vom Raupenanfang durch einen charakteristischen Schweißpunkt, sodass in den Abbildungen von der Geometrie auf die Schweißrichtung geschlossen werden kann. Etwa auf der Mitte der Raupe ist ein gold-glänzender Punkt auf der ansonsten matten gräulichen Raupe zu sehen. Diese glasartigen Ablagerungen sind Silikate (d.h. Salze der Kieselsäure), die sich auf Grund des Siliziums im Schweißdraht bilden und auf der Naht ablagern können. Durch abkühlungsbedingte Spannungen oder äußeres Einwirken platzen sie ab und hinterlassen teilweise eine kleine Kerbe. Ihr Vorhandensein floss nicht in die Beurteilung des Schweißergebnisses ein.

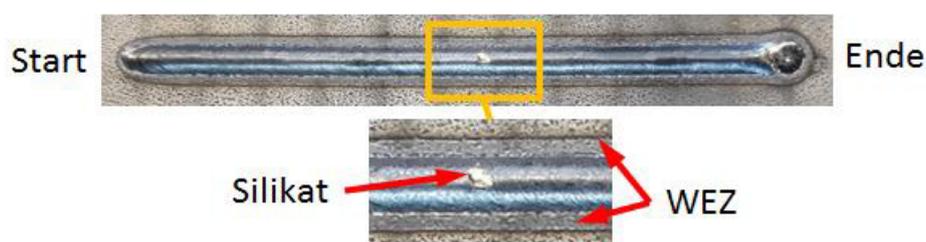


Abbildung 63 Referenzraupe geschweißt mit der Optimalpositionierung

5.1.1 Drahtzufuhrrichtung β

Der Winkel β wurde zwischen 0° (schleppend; Referenzraupe) und 180° (stechend) im Abstand von 45° variiert (Tabelle 12). Aufnahmen der Schweißergebnisse befinden sich im Anhang (S.113).

Tabelle 12 Versuchsreihe „ β “ zur Ermittlung des Toleranzfensters bei der Drahtzufuhrrichtung

Set	β [°]	Bedeutung	Bewertung
β_0	0	schleppend	+
β_1	45	seitlich-schleppend	+
β_2	90	seitlich	(+)
β_3	135	seitlich-stechend	+/-
β_4	180	stechend	-

Die Raupen mit einem seitlichen Anteil bei der Drahtzuführung ($\beta = \{45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\}$) weisen an der Flanke, wo der Draht zugeführt wird, jeweils eine Einkerbung am Raupenfuß auf über die gesamte Raupenlänge auf. Auf der gegenüberliegenden Flanke ist dies nicht der Fall. Die Aufnahmen lassen auch vermuten, dass diese Raupen schmaler sind als die Referenzraupe, was von den Querschnittprofilen in Abbildung 64 bestätigt wird. Während die seitlich-schleppend geschweißte Raupe allem Anschein nach nicht abweicht von der Referenzraupe, ist bei $\beta = 90^\circ$ und $\beta = 135^\circ$ bereits ohne Vermessung ein leichter bzw. deutlicher Unterschied erkennbar. Beim stechenden Schweißen entstand keine Raupe, sondern ein in der Mitte gefurchtes Gebilde. Die Flanken sind teilweise wellig und die Oberfläche sichtbar schuppig. Das Querschnittsprofil zeigt zudem, dass das Schweißgut deutlich breiter ist als die Referenzraupe. Weil die seitlich geschweißte Raupe abgesehen von der geringen Abweichung in der Breite eine sehr gute Qualität aufweist, wurde der zulässige Maximalwert für die Drahtzufuhrrichtung für die nachfolgenden Versuche auf $\beta_{max} = 90^\circ$ festgelegt.

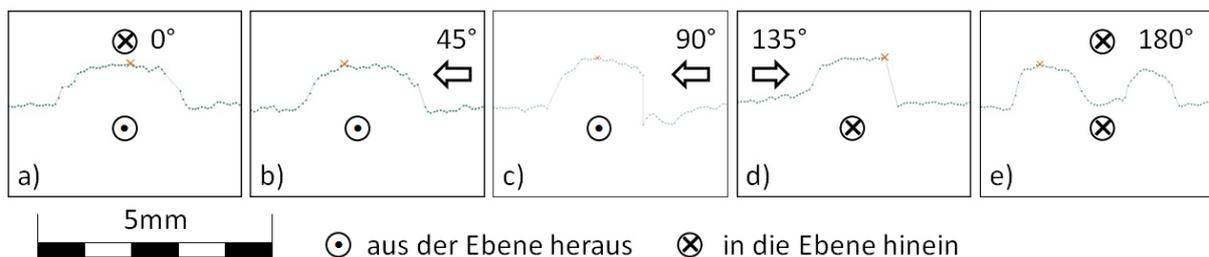


Abbildung 64 Querschnittsgeometrie von Raupen mit a) schleppender, b) seitlich-schleppender, c) seitlicher, d) seitlich-stechender und e) stechender Drahtzufuhr. Die Symbole unterhalb des Profils zeigen die Schweißrichtung an.

5.1.2 Drahtabstand h

Der Abstand h zwischen Drahtspitze und Substratoberfläche wurde ausgehend von dem angenommenen Optimalwert $h_{opt} = 0,1 \text{ mm}$ zunächst vergrößert, bis der obere Rand des Toleranzfensters erreicht wurde. Anschließend wurde überprüft, ob auch kleinere Werte als h_{opt} möglich sind. Die einzelnen Parametersets sind in Tabelle 13 aufgeführt.

Tabelle 13 Versuchsreihe „ h “ zur Ermittlung des Toleranzfensters bezüglich der Höhe h

Set	h [mm]	Raupe	Beobachtungen beim Schweißprozess etc.	Bewertung
h0	0,1	20	—	+
		21	—	+
		22	hinterher ist $h = 0,2 \text{ mm}$	+
h1	0,3	10	—	+
		23	—	+
h2	0,5	8	—	+/-
		24	—	+
		6	—	+
h3	0,7	25	—	+
		5	kurzes Blitzen bei Eintritt des Drahts in den Laserstrahl;	+
h4	1,0	26	Ruß am Anfang;	+
		4	kurzes Blitzen bei Eintritt des Drahts in den Laserstrahl;	+
h5	1,5	28	Naht am Anfang schuppig	+/-
		29	vermehrte Rußbildung	+/-
h6	-0,2	11	hinterher ist $h = +0,2 \text{ mm}$	+/-
		12	Draht vor Start etwas zurückgezogen, sodass $l = 4 \text{ mm}$	+
h7	0	14	leicht schuppig auf gesamter Raupe	+/-
		15.1	—	+
		15.3	Drahtförderung und Positionierung überprüft -> im Soll	-
h8	1,2	1	kurzes Blitzen bei Eintritt des Drahts in den Laserstrahl	+
		3		+
h9	1,4	2	„Blitzen“ in regelmäßigen Abständen; hinterher große Kalotte am Drahtende	-

Bis zu einem Abstand von $h = 1 \text{ mm}$ konnten qualitativ gute Ergebnisse erzielt werden (vgl. Abbildung 90 bis Abbildung 93 im Anhang, S. 114). Alle Raupen sind in der Länge und Breite voll ausgebildet und weisen mit wenigen Ausnahmen eine glatte Oberfläche auf. Bei einigen Raupen ist die Oberfläche leicht schuppig, was zu der schlechteren Bewertung „+/-“ führte. Am Beispiel von Parameterset h2 (Abbildung 65) zeigt sich jedoch, dass dies nicht zwingend durch die Positionierung verursacht wird: während Raupe 8 geschuppt ist, haben die Raupen 24 und 6 eine glatte Oberfläche.



Abbildung 65 Raupen mit $h = 0,5 \text{ mm}$

Teilweise ist der Raupenanfang um 1-2mm verzögert, sodass die Raupe insgesamt kürzer ist (vgl. Raupe 20 in Abbildung 90 oder Raupe 26 in Abbildung 93). Dieses Phänomen trat für gewöhnlich dann auf, wenn der Draht zuvor nicht neu positioniert wurde. Zu Beginn der Studie wurde der Rückzugweg beim Stoppen der Drahtförderung größer gewählt als der anschließende Positionierweg, um zu vermeiden, dass der Draht wieder in das erkaltende Schweißgut sticht bzw. Kontakt zum Laserstrahl bekommt. In Folge dessen war der Stickout vor Schweißbeginn kürzer als der Sollwert von 5mm, weshalb sich die Drahtspitze außerhalb des Spots befand. Folglich wurde der Delay t_{delay_start} künstlich verlängert um die Zeit, die der Draht braucht, um den Spot zu erreichen. Dieses Problem ließ sich beheben, indem die Wartezeit zwischen Rückzug und Positionieren größer als der Delay am Ende t_{delay_ende} gesetzt wurde, sodass der Roboter schon vom Raupenende weggefahren ist, wenn der Draht gefördert wird. Dadurch können Rückzug- und Positionierweg gleichgroß sein. Hinzukommt allerdings, dass der Stickout nach dem Schweißen unregelmäßig war, weil der Draht verschieden stark zurückschmolz. Durch Integrieren der automatisierten Stickoutwiederherstellung konnte auch dieses Problem gelöst werden. Weil der unregelmäßige Raupenstart unabhängig von dem Parameter h auftrat, floss diese Beeinträchtigung der Geometrie nicht in die Qualitätsbewertung mit ein.

Bei $h = 1,5 \text{ mm}$ ist die zuerst geschweißte Raupe (Nr. 28 in Abbildung 94) auf etwa dem ersten Zentimeter unvollständig ausgebildet, entspricht danach jedoch den Qualitätsansprüchen. Die direkt im Anschluss geschweißte Raupe (29) ist fehlerfrei abgesehen von dem oben erläuterten verspäteten Nahtanfang. Obwohl die Toleranzgrenze augenscheinlich noch nicht erreicht war, wurde der Abstand

zwischen Draht und Substrat nicht weiter vergrößert. Angesichts der Genauigkeit der heutigen Robotersysteme und der Möglichkeiten, die Module eines Laser-Draht-Systems sehr präzise auf einer Platte zueinander auszurichten, erschien ein Toleranzfenster von 1,5 mm ausreichend. Abgesehen von der Qualität der Raupe hat der Parameter h auch Einfluss auf den Schweißprozess an sich. Ab einem Abstand von $h = 0,7 \text{ mm}$ war bei Schweißbeginn häufig ein „Blitzen“ zu beobachten. Außerdem bildete sich bei größerem Abstand eher Rauch und Ruß aus als bei geringem Abstand.

Anschließend wurde überprüft, ob der Draht das Substrat auch berühren oder sogar darin „eintauchen“ darf. Bei $h = -0,2 \text{ mm}$ setzte der Draht bei dem ersten Schweißversuch zu Beginn auf, sodass er leicht unter Spannung stand. Die resultierende Raupe ist zwar vollständig und gleichmäßig ausgebildet, hat aber eine schuppige Oberfläche (Raupe 11 in Abbildung 95). Für die zweite Raupe mit diesem Parameterset wurde der Stickout vor Schweißbeginn um 1mm verkürzt, sodass der Draht nicht mehr aufsetzte. Die Oberflächenqualität konnte dadurch verbessert werden, sodass die Raupe 12 (Abbildung 95) die Kriterien erfüllt. Mit $h = 0 \text{ mm}$ zeigte sich ein ähnliches Muster wie bei dem vorherigen Parameterset. Die erste Raupe (14, Abbildung 96) ist leicht schuppig, die zweite (15.1) hingegen einwandfrei, ohne dass etwas an den Einstellungen verändert wurde. Bei der dritten Raupe (15.3) waren schon während des Schweißprozesses über die Beobachtungskamera Unregelmäßigkeiten beobachtbar. Die Naht ist in der Mitte und am Ende nicht vollständig ausgebildet und hat an diesen Stellen Bindungsfehler zum Substrat.

Weil die Schweißergebnisse mit $h = 1,5 \text{ mm}$ im späteren Studienverlauf nicht reproduzierbar waren, wurde der Abstand ausgehend von $h = 1 \text{ mm}$ in 0,2-mm-Schritten erhöht, um die tatsächliche Toleranzgrenze zu ermitteln. Mit $h = 1,2 \text{ mm}$ konnten zwei qualitativ gute Raupen geschweißt werden (Abbildung 97). Bei $h = 1,4 \text{ mm}$ war während des Schweißens eine verstärkte Rauchentwicklung zu beobachten. Zudem „blitzte“ es in regelmäßigen Abständen kurz auf. Abbildung 98 zeigt, dass die Raupe an mehreren Stellen unterbrochen ist. Die Anzahl der Raupensegmente deckt sich mit der Anzahl der beobachteten Blitze. Aus den Ergebnissen der obigen Messreihe ergeben sich also die Grenzen $h_{max} = 1,2 \text{ mm}$ und $h_{min} = 0,1 \text{ mm}$ als maximal bzw. minimal zulässiger Abstand zwischen Drahtspitze und Substratoberfläche für einen stabilen Prozess.

5.1.3 Stickout l

Der Stickout wurde ausgehend von dem Startwert $l_{opt} = 5 \text{ mm}$ in 2,5-mm-Schritten erhöht. Nach Erreichen des Randes des Toleranzfensters wurde mit dem für l zulässigen Maximalwert zusätzlich der Parameter h variiert. Die Parametersets inklusive der Bewertung sowie Bemerkungen zum jeweiligen Schweißprozess sind in Tabelle 14 aufgeführt. Wenn zwei Raupen mit demselben Parameterset direkt hintereinander geschweißt wurden, erfolgte anfangs zwischen den Schweißdurchgängen eine Überprüfung der Positionierung, insbesondere auch von h . Hierbei stellte sich heraus, dass die Position

sehr stabil war (vgl. Bemerkung „Position noch gegeben“). Deswegen wurde bei späteren Versuchen dieser Messreihe darauf verzichtet, weil das Prüfen des Drahtabstands vergleichsweise aufwändig ist.

Tabelle 14 Versuchsreihe „l“ zur Ermittlung des Toleranzfensters bezüglich des Stickouts l

Set	Raupe	h [mm]	l [mm]	Beobachtungen/Bemerkungen	Bewertung
I0	1	0,1	5,0		+/-
	3			Position noch gegeben	+
I1	4	0,1	7,5	Position neu eingestellt	+
	5			Position noch gegeben	+
	9			Position neu eingestellt	+
	10			Position noch gegeben	+
I2	6	0,1	10,0	Position neu eingestellt	+
	8			Position neu eingestellt	-
	11			Position neu eingestellt	+
	12			ohne Prüfung direkt im Anschluss geschweißt	+
I3	13	0,1	12,5	Position neu eingestellt	+
	14			ohne Prüfung direkt im Anschluss geschweißt	+
I4	7	0,1	15,0	Position neu eingestellt	-
	15			Position neu eingestellt	+/-
	16			Position noch gegeben	+/-
I5	17	0,7	12,5	Position neu eingestellt; am Anfang Ruß	+
	18			ohne Prüfung direkt im Anschluss geschweißt	+
I6	19	1,0	12,5	Position neu eingestellt; Ruß/Rauch am Anfang	+
	20			ohne Prüfung direkt im Anschluss geschweißt	+/-

Bis zu einem Stickout von $l = 12,5 \text{ mm}$ (Set I3) konnten überwiegend sehr gute Schweißergebnisse erzielt werden (Abbildung 99 bis Abbildung 102 im Anhang, S. 116). Bei Set I0 ist Raupe 1 leicht schuppig. Bei Set I3 ist Raupe 8 streckenweise in der Breite nicht vollständig ausgebildet und weist von außen deutlich sichtbare Bindungsfehler an dieser Stelle auf. Beide Beobachtungen sprechen dafür, dass die Streckenenergie zu gering war, um die geförderte Drahtmenge vollständig aufschmelzen zu können. Diese Raupen haben gemeinsam, dass als erstes bzw. zweites direkt nach Einschalten des Lasers geschweißt wurden. Weil das Phänomen bekannt war, dass die erste(n) Raupe(n) eines Versuchstages selbst bei bewährten Parametersets eine vergleichsweise schlechte Qualität haben, führte ein schlechtes Schweißergebnis unter diesen Umständen nicht zum Abbruch der Messreihe.

Bei $l = 15 \text{ mm}$ (Set I4) führte der erste Schweißdurchgang (Raupe 7) zu einem mangelhaften Schweißergebnis (Abbildung 103). Im zweiten Viertel und am Ende ist die Raupe streckenweise nicht vollständig in der Breite ausgebildet und weist Bindungsfehler an einer Flanke auf. In der Mitte steht außerdem ein unaufgeschmolzenes Stück Draht heraus, was wie die anderen Mängel auf eine zu geringe Streckenenergie deutet. Auch diese Raupe war die erste, die direkt nach dem Einschalten des Lasers geschweißt wurde. Die anderen Raupen (15 und 16) entstanden, als der Laser schon einige Zeit gearbeitet hatte. Beide sind zwar auf der gesamten Länge vollständig ausgebildet, die Oberfläche ist aber nicht ebenmäßig, sondern weist „Pickel“ auf (vgl. Abschnitt 4.2.2.3). Weil dies für einen instabilen Prozess spricht, wurde der Stickout nicht weiter vergrößert.

Mit dem resultierenden $l_{max} = 12,5 \text{ mm}$ wurde anschließend noch der Parameter h variiert, startend mit $h = 0,7 \text{ mm}$, um sich an h_{max} herantasten zu können. Die mit dem Parameterset I5 erzeugten Raupen erfüllen die Qualitätskriterien vollständig (Abbildung 104). Bei $h = 1 \text{ mm}$ (Set I6) sind insbesondere bei Raupe 20 (Abbildung 105) Anzeichen für eine unvollständige Nahtausbildung zu erkennen. Die obere Flanke wirkt in der ersten Hälfte leicht zackig und weist im letzten Drittel eine Einbuchtung auf. Das Schweißergebnis wurde dahingehend interpretiert, dass der Rand des sicheren Prozessfensters erreicht wurde, weshalb h nicht weiter vergrößert wurde.

5.1.4 Auslenkung b in Anhängigkeit von a

Für die Feststellung des Toleranzfensters hinsichtlich der Positionierung der Drahtspitze auf dem Laserspot wurde zunächst für verschiedene Werte von a (1: Spotvorderkante; 3: Spotmitte) die jeweilige maximale Auslenkung b ermittelt. Der Draht wurde immer in dieselbe Richtung von der Mittelachse ausgelenkt (Abbildung 66) und befand sich somit bei $b > 0,5 \text{ mm}$ immer näher an der unteren Kante des Spots bzw. der Raupe. Die Parametersets (Tabelle 15) sind geordnet nach der Position a und innerhalb dessen nach aufsteigendem Wert für b sortiert, um den Trend sichtbarer zu machen. Mit einigen Parametersets wurden mehrere Raupen geschweißt, z.B. zur Prüfung der Prozesssicherheit. Die tatsächliche Reihenfolge der Schweißversuche ist der zweiten Spalte („Nr.“) zu entnehmen. Aus Ökonomiegründen wurde hier häufig mit einer großen begonnen, die dann reduziert wurde, bis ein gutes Ergebnis vorlag.

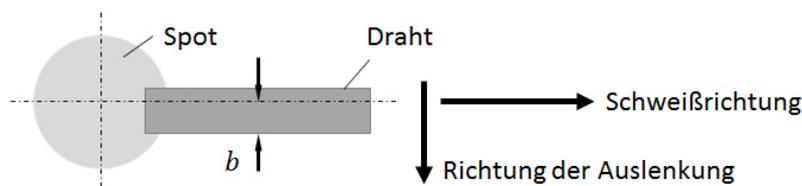


Abbildung 66 Richtung der Auslenkung bei der Veränderung von b

Tabelle 15 Versuchsreihe „ab“ zur Ermittlung des Toleranzfensters von der Kombination aus den Parametern a und b

Set	Nr.	a [-]	b [mm]	h [mm]	l [mm]	Bemerkung	Bewertung
ab0	21	1	0,50	0,1	7,5	—	+
ab1	22	1	0,53	0,1	7,5	—	+
ab2	23	1	0,61	0,1	7,5	—	+
ab3	27	1	0,65	0,1	7,5	—	+
	28					ohne neu zu positionieren, ohne Drahtende auszufahren	+
ab4	26	1	0,69	0,1	7,5	—	+/-
	36					—	+
ab5	25	1	0,73	0,1	7,5	—	+/-
	35					ab der Hälfte Raupe nicht vollständig ausgebildet in der Breite	-
ab6	24	1	0,76	0,1	7,5	h überprüft	-
ab7	38	2	0,65	0,1	7,5	—	+
ab8	29	2	0,69	0,1	7,5	—	+
	33					—	+
	37					ab der Hälfte Raupe nicht vollständig ausgebildet in der Breite	-
ab9	32	2	0,73	0,1	7,5	—	-
ab10	31	2	0,76	0,1	7,5	—	-
ab11	30	2	0,8	0,1	7,5	—	-
ab12	39	3	0,65	0,1	7,5	—	+
ab13	34	3	0,69	0,1	7,5	—	+

Wenn der Draht am Spotrand platziert wird ($a = 1$), kann der bis zu 0,15 mm von der Mittelachse (also $b = 0,65 \text{ mm}$) ausgelenkt werden, ohne dass es zu Qualitätseinbußen kommt (Abbildung 106 bis Abbildung 109). Bei $b = 0,69 \text{ mm}$ weist die erste mit diesem Parameterset geschweißte Raupe (Nr. 26) einige Einbuchtungen an der unteren Flanke auf, die später geschweißte zweite Raupe (Nr. 36) ist hingegen qualitativ hochwertig (Abbildung 110). Bei $b = 0,73 \text{ mm}$ sind ebenfalls bei der ersten

Raupe (Nr. 25) leichte Unregelmäßigkeiten an der unteren Flanke zu erkennen. Die zweite Raupe hat zu Beginn zwar eine gute Qualität, ist in der hinteren Hälfte aber nicht komplett ausgebildet in der Breite, sondern von der unteren Flanke her zusammengeschoben (Abbildung 111). Bei $b = 0,76 \text{ mm}$ ist die Raupe auf der gesamten Länge unvollständig in der Breite (Abbildung 112). Außerdem sind wiederholt „Pickel“ entstanden, was ein Indiz dafür ist, dass die Streckenenergie nicht ausreichend war, um den zugeführten Draht komplett aufzuschmelzen.

Bei der Positionierung $a = 2$ war mit $b = 0,8 \text{ mm}$ begonnen worden, unter der Annahme, dass bei einer Positionierung weiter in der Mitte des Spots eine größere Abweichung zulässig ist. Allerdings waren die Raupen auch noch bei $b = 0,73 \text{ mm}$ noch fehlerhaft (Abbildung 113 bis Abbildung 115). Zwei der mit $b = 0,96 \text{ mm}$ geschweißten Raupen haben eine gute Qualität (Nr. 29 und 33), die dritte Raupe (Nr. 37), die am Folgetag gefertigt wurde, ist jedoch auf einem Großteil nicht vollständig ausgebildet in der Breite (Abbildung 116). Die direkt im Anschluss mit $b = 0,65 \text{ mm}$ gefertigte Raupe entspricht wieder den Qualitätskriterien (Abbildung 117).

Mit der Drahtspitze im Spotmittelpunkt ($a = 3$) wurden sowohl bei $b = 0,65 \text{ mm}$ (Abbildung 118) als auch bei $b = 0,69 \text{ mm}$ (Abbildung 119) Raupen geschweißt, die alle an das Schweißergebnis gesetzten Erwartungen erfüllen.

Anschließend wurden die für alle a -Positionen prozesssichere Auslenkung $b = 0,65 \text{ mm}$ mit den entsprechenden Maximalwerten für den Drahtabstand h und den Stickout l kombiniert (Tabelle 16). War die Qualität des Schweißergebnisses nicht zufriedenstellend, wurden h bzw. l reduziert.

Alle mit den Parametersets ab14 bis ab24 erzeugten Raupen (Abbildung 120 bis Abbildung 130 im Anhang, S. 119) erfüllen die gesetzten Kriterien bezüglich der Geometrie und Oberflächenqualität in vollem Umfang. Bei $b = 0,65 \text{ mm}$ darf der Draht an jeder Position auf der Schweißachse einen Abstand von 1mm zum Substrat haben. Unter diesen Bedingungen war auch noch ein Stickout von $l = 12,5 \text{ mm}$ möglich, ohne das Schweißergebnis zu beeinträchtigen. Allerdings führte der große Abstand zu einer starken Rauch- und Rußentwicklung am Raupenanfang. Der Effekt konnte durch das Senken des Drahtabstands auf $h = 0,5 \text{ mm}$ eliminiert werden.

Tabelle 16 Fortsetzung der Messreihe „ab“: Kombination mit h und l

Set	Nr.	a [-]	b [mm]	h [mm]	l [mm]	Bemerkung	Bewertung
ab14	40	3	0,65	1,0	7,5	am Anfang viel Ruß	+
	41					Drahtspitze bei Start außerhalb vom Spot; Rauch/Ruß am Anfang	+
ab15	42	2	0,65	1,0	7,5	am Anfang viel Ruß	+
ab16	43	1	0,65	1,0	7,5	am Anfang viel Ruß	+
ab17	44	1	0,65	0,7	7,5	—	+
ab18	45	3	0,65	0,7	12,5	h neu eingestellt; bei Start Ruß	+
ab19	46	2	0,65	0,7	12,5	h neu eingestellt; bei Start Ruß	+
ab20	47	1	0,65	0,7	12,5	h neu eingestellt; bei Start Ruß	+
ab21	48	1	0,65	0,7	10,0	h neu eingestellt; bei Start Ruß	+
	49					Drahtspitze bei Start außerhalb vom Spot;	+
ab22	50	1	0,65	0,5	10,0	h eingestellt	+
ab23	51	1	0,65	0,5	12,5	h eingestellt	+
ab24	52	3	0,65	0,5	12,5	h überprüft	+

Die Ergebnisse für die Drahtpositionierung bei Raupen führen zu folgenden Toleranzfenstern der einzelnen Parameter:

Tabelle 17 Toleranzfenster der Drahtpositionierung bei Raupen

Parameter	Toleranzfenster
Drahtzufuhrrichtung	$0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$
Drahtabstand	$0,1\text{mm} \leq h \leq 1,2\text{mm}$
Stickout	$5\text{mm} \leq l < 12,5\text{mm}$
Auslenkung bei $a =$	
1	$0,69\text{mm}$
3	$0,66\text{mm}$

5.2 Beschichtungen

Die Qualität der Beschichtungen wurde anhand folgender Kriterien beurteilt:

- vollständige Nahtausbildung in der Raupenlänge bei allen Raupen
- vollständige Nahtausbildung in der Raupenbreite bei allen Raupen
- gleichmäßige Oberfläche der Beschichtung
- keine Ruß- und Rauchentwicklung während des Schweißprozesses

Der vollständigen Nahtausbildung wurde dabei die größte Bedeutung beigemessen, weil derartige Fehler im Nachhinein nicht mehr behoben werden können. Ruß- und Rauchentwicklung konnten in vorherigen Versuchen zum Teil durch Anpassung von Gasmenge oder auch Delay von Drahtstart gegenüber Laserstart reduziert bzw. eliminiert werden. Ungleichmäßigkeiten der Oberfläche (z.B. vereinzelte „Stubbel“) können bis zu einem gewissen Grad im Nachhinein durch gegebenenfalls ohnehin notwendiges Abfräsen geebnet werden. Vergleichbar mit einem Ampelsystem wurden die Beschichtungen gemäß dem Cluster in Tabelle 18 bewertet:

Tabelle 18 Bewertungscluster für Beschichtungen

Bewertung	Anforderungen
+	<ul style="list-style-type: none">• Alle Kriterien sind erfüllt
+/-	<ul style="list-style-type: none">• Die vollständige Nahtausbildung ist gegeben. Rauch/Ruß darf in Maßen auftreten. Minimale Unebenheiten der Oberfläche sind erlaubt.
-	<ul style="list-style-type: none">• Mindestens ein Kriterium der Nahtausbildung ist nicht erfüllt• Rauch/Ruß übersteigt akzeptables Ausmaß• Unebenheiten übersteigen erlaubtes Ausmaß

5.2.1 Einfluss von Versatz auf Geometrie

Vor der Validierung der Toleranzfenster für die Positionierungsparameter wurde der Einfluss des Versatzes auf die Geometrie der Beschichtung untersucht. Die mit den Parametersets in Tabelle 19 geschweißten 5-Raupen-Beschichtungen (Abbildung 131 bis Abbildung 139 im Angang, S.121) wurden hinsichtlich der Dicke D und Breite B vermessen.

Tabelle 19 Versuchsreihe „V“ zum Einfluss des Versatzes auf Geometrie und Qualität

Nr.	Δx [mm]	Überlappung		h [mm]	B [mm]	D [mm]	Bewertung
		[mm]	[%]				
V1	1,5	1,4	48,28	0,5	9,2	1,35	+
V2	1,6	1,3	44,83	0,5	9,6	1,25	+
V3	1,7	1,2	41,38	0,5	10,0	1,19	+
V4	1,8	1,1	37,93	0,5	10,4	1,08	+
V5	1,4	1,5	51,72	0,5	8,8	1,52	+/-
V6	1,4	1,5	51,72	1,0	8,8	1,38	+
V7	1,3	1,6	55,17	1,0	8,4	1,48	+/-
V8	1,9	1,0	34,48	0,5	10,8	1,07	+
V9	2,0	0,9	31,03	0,5	11,1	1,02	+

Alle Beschichtungen mit einem Versatz $\Delta x \geq 1,5 \text{ mm}$, d.h. mit einer Überlappung kleiner als 50%, erfüllten die Qualitätskriterien in vollem Umfang. Bei $\Delta x = 1,4 \text{ mm}$ mit $h = 0,5 \text{ mm}$ (Abbildung 135) hat sich die dritte Raupe auf der ersten Hälfte aufgetürmt, wodurch das Querschnittsprofil der Beschichtung einen Bogen beschreibt, anstatt wie in der zweiten Hälfte eine Ebene zu bilden (Abbildung 67). Die Geometrie der vierten und fünften Raupe wurde davon jedoch nicht beeinträchtigt. Nach Erhöhen des Drahtabstands auf $h = 1 \text{ mm}$ konnte die Qualität gesteigert werden. Auch das Schweißen mit $\Delta x = 1,3 \text{ mm}$ war unter diesen Bedingungen (nahezu). Nur die letzte Raupe ist im letzten Drittel einmal unterbrochen. Dies kann jedoch auch andere Ursachen als die Positionierung oder den Versatz haben und beispielsweise beim Überschweißen von Silikatablagerungen entstanden sein. Je kleiner Δx , umso größer ist die Auftragshöhe h_{coat} . Eine mit den Standardbedingungen geschweißte einzelne Raupe ist ca. 1mm hoch. Das bedeutet, dass die Beschichtungsdicke schon bei einer Überlappung von weniger als 40 % die Höhe einer Einzelraupe übersteigt, weil sich das aufgetragene Material auftürmt. Je größer Δx , umso breiter (und flacher) ist die Beschichtung. Gleichzeitig wird das Profil mit steigendem Versatz welliger. Für eine glatte Oberfläche muss also mehr Material abgetragen werden, sodass die finale Beschichtungsdicke noch einmal kleiner ist. Eine absolute Aussage darüber, ob eher ein kleiner oder großer Versatz vorzuziehen ist, lässt sich aus den Ergebnissen allerdings nicht direkt ableiten. Vielmehr müssen die Anforderungen

an die Geometrie (Fläche und Dicke), die Fertigungsdauer, Akzeptanz von Nacharbeit usw. berücksichtigt werden bei der Wahl der Parameter.

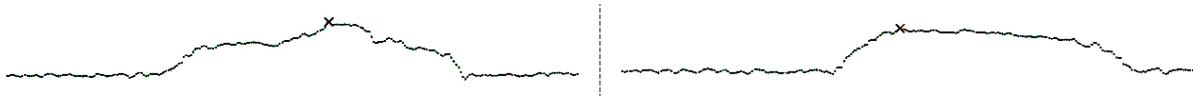


Abbildung 67 Querschnittsprofil von Beschichtung V5 bei 25% (links) und 75% (rechts) der Raupenlänge

Die Versuche, eine Fünf-Raupen-Beschichtung mit $\Delta x = 1,5 \text{ mm}$ und $h = 0,1 \text{ mm}$ zu schweißen, waren wiederholt erfolgreich (Abbildung 140). Auch mit $\Delta x = 1,4 \text{ mm}$ gelang zunächst eine Beschichtung mit dem optimalen Drahtabstand, allerdings war dieses Ergebnis nicht reproduzierbar (Abbildung 141). Auf Grund dessen wurde davon ausgegangen, dass bei einem Versatz $\Delta x < 1,5 \text{ mm}$ das Beschichten mit $h = 0,1 \text{ mm}$ auch möglich sein muss. Die Zehn-Raupen-Beschichtungen wurden deshalb mit diesem Drahtabstand gefertigt. Von den Schweißergebnissen (Abbildung 142 bis Abbildung 146) erfüllt jedoch keines die Beurteilungskriterien in vollem Umfang. Selbst bei $\Delta x = 2 \text{ mm}$ treten mehr oder weniger viele „Pickel“ auf. Es ist die Tendenz zu erkennen, dass sich die Fehler häufen, je weiter fortgeschritten die Beschichtung ist, doch bei einigen Schweißproben treten bereits ganz am Anfang Unregelmäßigkeiten auf.

5.2.2 Validierung der Toleranzfenster der Positionsparameter

Mit den Parametersets in Tabelle 20 wurde jeweils eine Fünf-Raupen-Beschichtung geschweißt. Anders als bei den Einzelraupen ist die Richtung der Abweichung des Drahts von der Mittelachse (Parameter b) bei Beschichtungen nicht irrelevant, sondern muss unterschieden werden in „positiv: in Versatzrichtung“ (also weg von dem schon existierenden Schweißgut) und „negativ: entgegen der Versatzrichtung“ (d.h. hin zum Schweißgut). Hier wurde b nur in positive Richtung verändert, weil eine Auslenkung in Richtung Schweißgut eine „Kollision“ mit selbigem begünstigt und diese der Auslenkung entgegenwirkt. Es wurde davon abgesehen, mit den erfolgreichen Parametersets Zehn-Raupen-Beschichtungen zu schweißen, da zu diesem Zeitpunkt noch keine Alternative zur Graphit-Beschichtung gefunden worden war.

Tabelle 20 Versuchsreihe „S“ zur Überprüfung der Gültigkeit der Toleranzfenster von Raupen

Set	Nr.	Graphit	h [mm]	l [mm]	b [mm]	α [°]	β [°]	Bewertung
S0	1	ja	0,1	5	0,5	21	0	+
	1.1	ja	0,1	5	0,5	21	0	+/-
	1.2	nein	0,1	5	0,5	21	0	+/-
	9	nein	0,1	5	0,5	21	0	-
	10	nein	0,1	5	0,5	21	0	+
S1	2	ja	0,1	5	0,5	21	90	+
S2	3	ja	0,7	5	0,5	21	0	+
S3	4	ja	0,1	12,5	0,5	21	0	-
S4	5	ja	0,1	10	0,5	21	0	+/-
S5	6	ja	0,1	5	+0,7	21	0	+/-
S6	7	ja	0,1	5	+0,66	21	0	-
	8	nein	0,1	5	+0,66	21	0	-

Aufnahmen der geschweißten Beschichtungen befinden sich im Anhang (Abbildung 147 bis Abbildung 153, S.125). Die Referenzbeschichtung (Abbildung 68) erfüllte wie erwartungsgemäß die Qualitätsansprüche. Das trifft auch auf die später mit demselben Parameterset geschweißten Beschichtungen Nr. 1.1 und Nr. 10 sowie eingeschränkt auf Nr. 1.2 mit Einschränkungen (Abbildung **147**). Der Versuch Nr. 9 wurde abgebrochen nach der zweiten Raupe, weil nach den beiden Raupen jeweils das Drahtdurchtrennen bei der automatisierten Stickoutherstellung nicht erfolgreich war. Zu diesem Zeitpunkt erfolgte dieser Schritt außerhalb des Drehkipptischs, damit das Laser-Draht-System einen großen Abstand zum Untergrund hat und die herabfallenden abgetrennten Drahtenden an der Anlage keinen Schaden anrichten können. Der Roboter musste mit dem Kopf dafür relativ weit nach vorne fahren. Es ist anzunehmen, dass dadurch das Glasfaserkabel Zug auf die Bearbeitungsoptik ausgeübt hat. Weil diese einen langen Hebelarm bis zur Befestigungsvorrichtung hat, reichen oben am Angriffspunkt selbst kleine Kräfte aus, um die BO aus der Senkrechte auszulenken. Dadurch verschiebt sich die Position des Laserspots relativ zum Draht, der sich dann infolgedessen nicht mehr im Bereich mit ausreichend großer Intensität befindet. Als Konsequenz wurde der Ort zum Drahtdurchtrennen in die Mitte des Tisches, wo vergleichbare Bedingungen vorliegen wie am Schweißort.

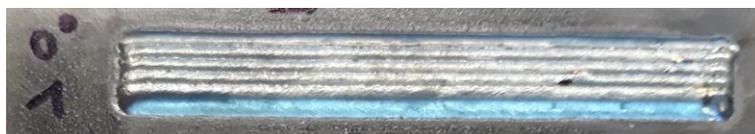


Abbildung 68 Beschichtung mit Optimalpositionierung (Set S0, Nr. 1; Referenz)

Für die Drahtzufuhrrichtung β (Abbildung 148) und den Drahtabstand h (Abbildung 149) konnte das bei den Einzelraupen ermittelte Toleranzfenster bestätigt werden. Die seitlich geschweißte Beschichtung ist etwa 1mm schmaler als die mit schleppender Drahtzufuhr, was die bei den Raupen beobachtete Tendenz untermauert. Der Drahtabstand wurde bei $h = 0,7 \text{ mm}$ überprüft, weil sich bei den Raupen der zulässige Maximalwert bei größeren Stickouts auf $h < 1 \text{ mm}$ reduzierte. Bei den Stickout-Sets S3 (Abbildung 150) und Set S4 (Abbildung 151) hat jeweils nur die fünfte Raupe eine verminderte Qualität. Bei Set S4 entspricht die letzte Raupe nahezu den Kriterien, sodass davon auszugehen ist, dass die Oberflächenfehler bereits bei einem etwas kleineren Stickout eliminiert werden können. Infolge der hier gefundenen Ergebnisse muss das Toleranzfenster für den Stickout reduziert werden auf $l < 10 \text{ mm}$. Die Überprüfung der zulässigen Auslenkung von der Mittelachse erfolgte ausgehend von dem Startwert $b = 0,7 \text{ mm}$. Die damit geschweißte Beschichtung (Abbildung 152) weist ein paar „Pickel“ insbesondere auf der letzten Raupe auf. Die Reduktion auf $b = 0,66 \text{ mm}$ führte entgegen der auf vorherigen Ergebnissen beruhenden Erwartung zu einer immensen Verschlechterung der Qualität. Weil sich der Draht im Folgenden nicht mehr zuverlässig auf einen bestimmten Wert auslenken ließ, wurden die Versuche nicht fortgeführt.

Zuletzt wurde die Theorie überprüft, dass bei Beschichtungen der notwendige minimale Abstand zwischen Draht und Substratoberfläche nicht allgemeingültig h_{opt} ist, sondern mit der Überlappungsrate steigt. Bei vorherigen Versuchen mit $h = 0,1 \text{ mm}$ waren selbst solche Beschichtungen teilweise fehlerbehaftet, die mit vergleichsweise großem Versatz (Überlappung kleiner 40 %) geschweißt worden waren. Mit $h = 0,5 \text{ mm}$ entsprechen die geschweißten 10-Raupen-Beschichtungen (Abbildung 69) den Qualitätskriterien auch noch bei $\Delta x = 1,4 \text{ mm}$ in vollem Umfang.



Abbildung 69 Beschichtungen mit $h = 0,5 \text{ mm}$ und $\Delta x = 1,5 \text{ mm}$ (oben) bzw. $\Delta x = 1,4 \text{ mm}$

Das Toleranzfenster für h muss bei Beschichtungen also eingeschränkt werden gegenüber den Einzelraupen. Der untersuchte Abstandswert $h = 0,5 \text{ mm}$ war graphisch bei $\Delta x = 1,5 \text{ mm}$ ermittelt worden basierend auf den Abmessungen von Draht und bereits existierendem Schweißgut, sodass der Draht nicht mehr ausgelenkt wird. Für den Parameter b kann an dieser Stelle keine Aussage getroffen

werden, weil mit der Positionierungsvorrichtung verschleißbedingt keine zuverlässige Einstellung mehr möglich war. Unter Einbezug dieser Ergebnisse ergeben sich für die untersuchten Parameter die Toleranzfenster in Tabelle 21:

Tabelle 21 Toleranzfenster der Positionsparameter bei Beschichtungen

Parameter	Toleranzfenster
Drahtzufuhrrichtung	$0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$
Drahtabstand	$0,5 \text{ mm} \leq h \leq 0,7 \text{ mm}$
Stickout	$5 \text{ mm} \leq l < 10 \text{ mm}$

5.3 Wände

Die Auswertung der Schweißergebnisse erfolgte hier nach jeder einzelnen Lage hinsichtlich des Höhenprofils (Seitenansicht) und des Kuppenprofils (Draufsicht). Das Endprodukt wurde zusätzlich danach beurteilt, ob sich die einzelnen Lagen klar voneinander abgrenzen lassen. Als Referenzobjekt diente dabei die Wand in Abbildung 70.

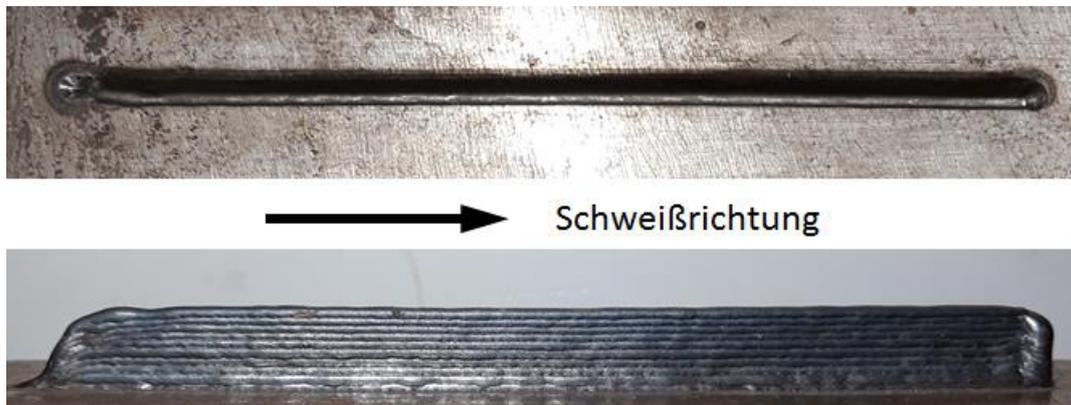


Abbildung 70 In früheren Versuchen am IWS mit Laserdrahtauftragschweißen erzeugte Wand von oben und von der Seite aufgenommen

Beim Schweißen aller Wände wurden die sich ab einer gewissen Lage einstellenden Nahtüberhöhungen mit dem Dremel abgetragen, damit für das Auftragen der nächsten Lage eine einigermaßen gleichmäßige Wandhöhe vorlag. Dies ist wichtig, weil bei einem welligen Höhenprofil der im Idealfall konstant zu haltende Drahtabstand schwankt. Ein Nebeneffekt dieser Maßnahme war, dass die Oberfläche an den behandelten Stellen blank wurde und sich dadurch von den unbehandelten, matt anthrazitfarbenen Bereichen unterschied (Abbildung 71). Außerdem entstand durch das Abschleifen an der Kuppe aus der Halbkreisform eine plane Querschnittsgeometrie.



Abbildung 71 Mit dem Dremel bearbeitete Wandkuppe

Zur Beurteilung der Welligkeit in z-Richtung wurden die mit dem Laserscanner erfassten Höhenprofile herangezogen. Diese entstanden durch Aufbereitung der Rohdaten (Abbildung 72), die jeweils aus den in regelmäßigen Abständen erfassten Minima und Maxima auf der Scannlinie bestehen. Die ersten (hier etwa 60) Werte sind identisch, weil sie prozessbedingt immer an derselben Stelle aufgenommen wurden. Wegen der Redundanz sind sie nicht im finalen Profil enthalten. Des Weiteren traten insbesondere bei den Daten der mit dem Dremel bearbeiteten Wände Peaks auf, die in der Realität nicht existieren. Eine Ursache dafür ist, dass die starke Reflektivität von blanken Oberflächen die Messung verfälschen kann. Deswegen wurden die Rohdaten um diese Ausreißer bereinigt. Die Wandhöhe berechnet sich aus der Differenz von Minimum und Maximum. In den Bereichen rechts und links von der Wand sieht man bereits einen Unterschied, weil das Blech nicht absolut plan ist, sondern kleine Grübchen hat. Dies wird auch durch das „Rauschen“ des Minimums deutlich. Dementsprechend weicht die berechnete Wandhöhe potenziell von der tatsächlichen ab.

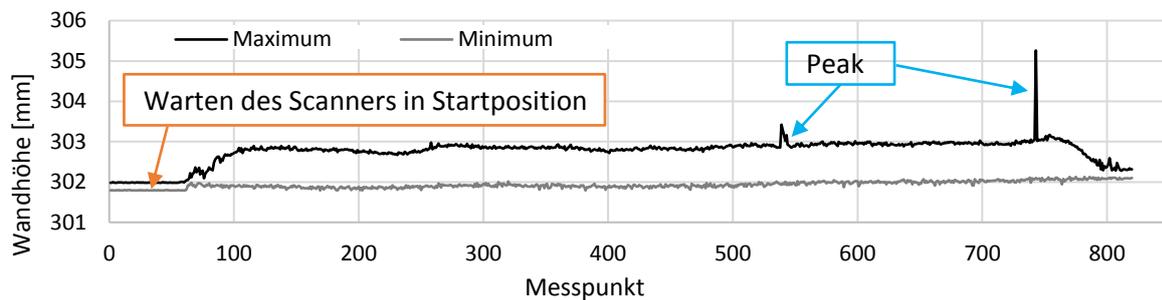


Abbildung 72 Rohdaten des Laserscanners zum Höhenprofil

5.3.1 Ermittlung der Lagenhöhe

Für die in diesem Versuchsteil geschweißten Wände wurde nach jeder Lage aus der maximalen Höhe im mittleren Wandbereich H_{max} der gegenüber dem Substrat notwendige Versatz Δz zum Schweißen der nächsten Lage bestimmt. Von der Differenz zwischen Δz_n und Δz_{n-1} kann auf die Höhe der Lage „n-1“ geschlossen werden. Die Auswertung der Ergebnisse beider Wände ergibt, dass sich ab der zweiten Lage eine in etwa gleichbleibende Höhe von 0,6...0,7mm einstellt.

Die erste Wand wurde aus sieben Lagen geschweißt. Die zwischen den einzelnen Lagen erfassten Höhenprofile sowie Aufnahmen der Stadien der Wand befinden sich im Anhang (S. 127). Bis einschließlich zur dritten Lage konnte eine gleichmäßige Geometrie erzeugt werden. Nach dem Auftragen der vierten Lage deutete sich am Anfang und Ende jeweils eine Überhöhung an, die beim Schweißgut auch mit dem bloßen Auge zu erkennen ist und im Höhenprofil eindeutig sichtbar wird.

Bei genauer Betrachtung der Höhenprofile deutet sich die Anfangsüberhöhung schon bei der zweiten Lage an. Am höchsten Punkt misst die vierlagige Wand 3,15 mm, wodurch ein Höhenunterschied von 0,5mm zum niedrigsten Punkt und von 0,3 mm zur erfassten durchschnittlichen Höhe H_{Scan} in der Mitte (Position 10...60 mm) entsteht. Betrachtet man nur diesen mittleren Bereich, schwankt die Wandhöhe noch um etwa 0,3 mm. Durch das Abschleifen wurde die maximale Höhe auf 2,9 mm reduziert. Auch bei den folgenden Lagen war stets insbesondere am Anfang der Wand eine Überhöhung zu verzeichnen. Die Differenz zwischen maximaler und durchschnittlicher Höhe in der Mitte steigt dabei (von 0,3 mm auf 0,5 mm), d.h. die Überhöhung gegenüber der restlichen Wand baut sich weiter auf. Bei der fünften Lage bildete sich im hinteren Drittel eine Delle aus, die sich im Höhenprofil als Senke mit einer Spitze auswirkte. Die Spitze wurde zwar abgeschliffen, die Senke und blieb jedoch erhalten. Beim Überschweißen mit der sechsten Lage konnte der Fehler nicht ausgemerzt werden, sondern setzte sich vielmehr fort.

Die zweite Wand wurde aus zehn Lagen geschweißt mit äquivalentem Vorgehen wie bei der oben beschriebenen Wand. Die entsprechenden Aufnahmen und Höhenprofile befinden sich im Anhang (S. 129). Hier bildete sich ab der dritten Lage trotz vorherigem Ebenen nach dem Schweißen jeweils eine Überhöhung am Anfang als auch in abgeschwächter Form am Ende. Bei Lage 7 entstand etwa nach einem Drittel der Wandlänge eine Unregelmäßigkeit, die sich beim Überschweißen mit den nächsten Lagen weiter aufbaute und verschlimmerte. Zudem folgte die Wandkuppe nach dem Auftragen der siebten Lage nicht mehr einer Geraden, sondern beschrieb eine tendenziell wellige Kontur. Die Übersicht der Querschnittprofile entlang der zehnlagigen Wand in Abbildung 73 zeigt, dass sich neben der Höhe auch die Breite und Kontur entlang der Wand verändert.

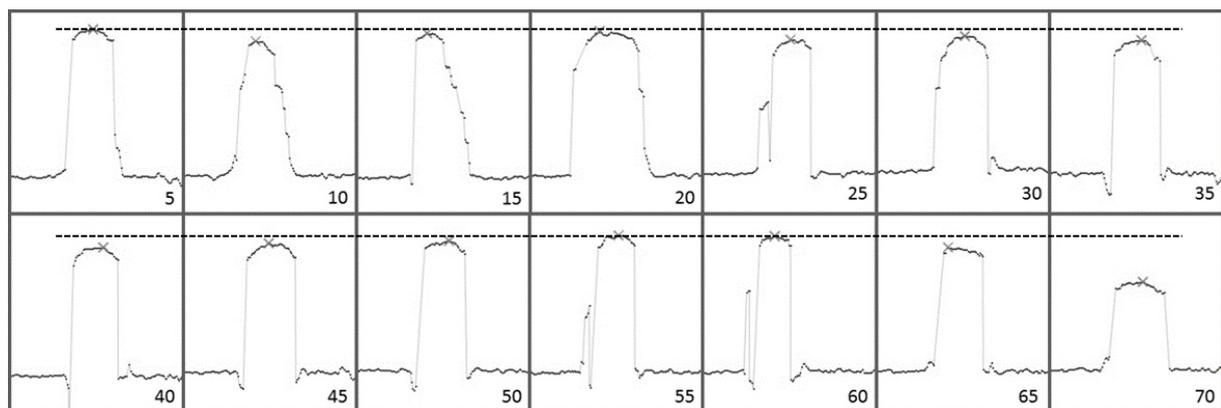


Abbildung 73 Änderung des Querschnitts entlang von Wand 2 (10 Lagen) im Abstand von 5mm

Bei beiden Wänden sind sowohl in den Zwischenstadien als auch bei dem Endprodukt die einzelnen Lagen nicht mehr deutlich voneinander zu unterscheiden, sondern es wirkt, als ob die oberen über die unteren geflossen wären (Abbildung 74). Außerdem treten an den Flanken vermehrt Silikate auf.



Abbildung 74 Detail von Wand 2 (mit 9 Lagen)

5.3.2 Minimale Leistung pro Lage

Die erste Lage wurde stets unter Standardbedingungen ($P = 2600\text{ W}$) geschweißt. Die bei den anderen Lagen getesteten Leistungen sind in Tabelle 22 verzeichnet. Die Leistung wurde so lange jeweils um 100 W reduziert, bis die Qualität der geschweißten Lage nicht mehr den Anforderungen entsprach (vgl. Abbildung 75 und Abbildung 77). Zum Schweißen der zweiten Lage kann die Leistung auf 2400 W reduziert werden. Auch wenn bei dem Versuch mit 2300 W (Set P8) im letzten Drittel eine kleine Delle entstand (Abbildung 76), konnte auch noch mit 2200 W eine hochwertige dritte Lage geschweißt werden. Dies war jedoch nicht reproduzierbar, sodass die Versuche P11 und P13, bei denen eigentlich die Leistung für Lage 4 ermittelt werden sollte, nach der dritten Lage wegen schlechter Qualität abgebrochen werden mussten. Unter einer erhöhten Leistung von 2300 W für Lage 3 konnten die Versuche fortgesetzt werden, mit dem Ergebnis, dass auch für Lage 4 eine Leistung von 2300 W notwendig war. Unabhängig von der Höhe der Leistung war hier bei allen Schweißergebnissen zu beobachten, dass die einzelnen Lagen ineinander verlaufen.



Abbildung 75 Schweißergebnis von Set P6 nach Lage 2



Abbildung 76 Schweißergebnis von Set P8 nach Lage 3



Abbildung 77 Schweißergebnis von Set P10 nach Lage 3

Tabelle 22 Versuchsreihe „P“ zur Ermittlung der pro Lage minimal notwendigen Laserleistung

Set	Lage	Δx [mm]	P_L [W]	Bemerkungen	Bewertung
P1	2	1,0	2600		+
P2	2	1,0	2600		+
P3	2	1,0	2500		+
P4	2	1,0	2400		+
P5	2	1,0	2300		+/-
P6	2	1,0	2200	Draht nicht aufgeschmolzen	-
P7	2	1,0	2400	mit Dremel geebnet	+
	3	1,6	2400		
P8	2	1,0	2400	mit Dremel geebnet kleine Delle	+/-
	3	1,6	2300		
P9	2	1,0	2400	mit Dremel geebnet	+
	3	1,6	2200		
P10	2	1,0	2400	mit Dremel geebnet Draht nicht aufgeschmolzen	-
	3	1,6	2100		
P11	2	1,0	2400	mit Dremel geebnet nach Lage 3 abgebrochen wegen schlechter Qualität	
	3	1,6	2200		
	4				
P12	2	1,0	2400	mit Dremel geebnet mit Dremel geebnet	+
	3	1,6	2300		
	4	2,2	2300		
P13	2	1,0	2400	mit Dremel geebnet nach Lage 3 abgebrochen wegen schlechter Qualität	
	3	1,6	2200		
	4				
P14	2	1,0	2400	mit Dremel geebnet mit Dremel geebnet	-
	3	1,6	2300		
	4	2,2	2200		

Die in Versuchsreihe P festgestellten lagespezifischen Minimalleistungen sollten anschließend auf ihre Prozesssicherheit hin überprüft werden. Bis einschließlich zur dritten Lage waren alle Schweißungen erfolgreich. Bei der dritten und vierten Lage bildete sich die bekannte Überhöhung am Anfang der Wand aus. Nach dem Auftragen der vierten Lage war bei allen drei Wänden in unterschiedlichem Ausmaß zu beobachten, dass die Wandkuppe in der Draufsicht statt einer geraden eine schlangenförmige Linie beschreibt. Die Aufnahmen der Wände und Höhenprofile befinden sich im Anhang (S. 134).

Tabelle 23 Überprüfung der Prozesssicherheit der Ergebnisse von Versuchsreihe P

Wand	Lage	P_L [W]	Δz [mm]	h [mm]	Bewertung
a	1	2600	-	0,5	+
	2	2400	1,0	0,5	
	3	2300	1,6	0,5	
	4	2300	2,2	0,5	
b	1	2600	-	0,5	-
	2	2400	1,0	0,5	
	3	2300	1,6	0,5	
	4	2300	2,2	0,5	
	5	x	x	x	
c	1	2600	-	0,5	+/-
	2	2400	1,0	0,5	
	3	2300	1,6	0,5	
	4	2300	2,2	0,5	
	5	x	x	x	

6 Diskussion und Ausblick

Die Frage, die mit dieser Studie beantwortet werden sollte, war, wie weit die Drahtposition von dem bekannten Optimum abweichen darf, ohne dass die Schweißparameter angepasst werden müssen, damit die Qualität des Schweißergebnisses erhalten bleibt. Die gefundenen Grenzwerte müssen also vor diesem Hintergrund betrachtet werden. Grundsätzlich ist es also möglich, dass diese Werte überschritten werden können, wenn z.B. die Streckenenergie verändert wird. Mit dem Schweißen von Einzelraupen sollte zunächst ein sicheres Prozessfenster definiert und im Folgenden für Beschichtungen und Wänden bestätigt bzw. angepasst werden.

6.1 Einzelraupen

Mit den angenommenen Idealwerten der Positionierung (Tabelle 7, S.54) konnten wiederholt qualitativ sehr hochwertige Raupen gefertigt werden. Dementsprechend konnte die Idealposition als prozesssicher bestätigt werden. Das Raupenende unterscheidet sich vom Raupenanfang durch einen charakteristischen Schweißpunkt, der etwas breiter ist als die Raupe selbst. Eine mögliche Erklärung dafür ist die Kopplung des Ein- und Ausschaltens des Lasers an die Roboterbewegung über den Trigger-Befehl (vgl. Abschnitt 4.1.4). Der Laser startet, wenn der Roboter losfährt und geht aus, wenn die Endposition erreicht ist. Das bedeutet potenziell, dass sich das System bei Laserstart schon in Bewegung findet und bei Laserstopp bereits ruht. Dadurch würde der Laserstrahl am Raupenende länger auf das Blech einwirken und so ein größeres Schmelzbad erzeugen. Hinzu kommt, dass der Delay vom Draht gegenüber dem Laser am Ende länger ist als am Anfang. Folglich steht auch mehr Energie zur Verfügung zum Aufschmelzen des Substrats. Die Raupe wird von einem schmalen Streifen (WEZ) auf dem Blech gesäumt. Hier wurde das Substrat nicht aufgeschmolzen, hat aber durch die aus der Schweißzone abfließende Wärme eine Veränderung erfahren. Inwieweit sich das Gefüge geändert hat und ob die etwaige Änderung auf den schmalen Streifen begrenzt ist oder darüber hinausgeht, könnte mit einem Schlibfbild geprüft werden.

Aus der Kombination der hier untersuchten Parameter

Drahtzufuhrrichtung,

Drahtabstand h ,

Stickout l und

Position auf dem Spot a und b

ergibt sich theoretisch eine *fünfdimensionale* Matrix, wenn jeder Wert einer Variable mit jedem Wert aller anderen Variablen kombiniert wird. Statt all diese Parametersets zu untersuchen, wurde ein

ökonomischerer Ansatz gewählt. In den einzelnen Messreihen wurde zunächst immer nur bei einem Parameter sein Maximalwert ermittelt und im Anschluss auf seine Gültigkeit bei Kombination mit den in vorhergehenden Messreihen gefundenen Maximalwerten anderer Parameter geprüft. Frühere Messreihen wurden jedoch nicht um die Kombination mit den Grenzwerten späterer Messreihen erweitert. Dieses Vorgehen hat zur Folge, dass die Grenzwerte der Parameter hinsichtlich ihrer Stabilität unterschiedlich stark elaboriert sind. Inwieweit die ausstehenden Versuche nachgeholt werden müssen, ist abhängig von der Vorrichtung, mit der Draht und Laserstrahl zueinander ausgerichtet werden, d.h. mit welcher Sicherheit die entsprechende Positionierung eingestellt und beibehalten werden kann.

6.1.1 Winkel β

Die Auswertung der Messreihe zum Drahtzuführwinkel β führt zu dem in Abbildung 78 illustrierten Toleranzfenster. Es wurde die Annahme getroffen, dass die Ergebnisse bei kleineren Winkeln als der getestete eine mindestens genauso gute Qualität aufweisen. Deshalb ist das Spektrum kontinuierlich dargestellt anstatt mit diskreten Werten. Um die Grenzen bzw. Übergänge des Fensters feiner zu definieren und eine genauere Aussage über den Zusammenhang zwischen Winkel und Raupenquerschnitt machen zu können, sollte eine Geometrie mit kontinuierlichem Winkelwechsel wie z.B. ein Kreis geschweißt werden. Dabei wäre auch erkennbar, wie sich das Schweißgut verhält, wenn während der Schweißbewegung eine Winkeländerung stattfindet. Zudem kann der Winkel sowohl durch Drehen „im Uhrzeigersinn“ (nach unten) als auch „entgegen dem Uhrzeigersinn“ (nach oben) eingeschlagen werden. Hier wurde zwar nur eine Richtung überprüft, es ist aber davon auszugehen, dass bei Einzelraupen die Ergebnisse auf die andere Richtung übertragbar sind. Deswegen ist der komplette Kreis vertreten. Die Farben können wie bei einer Ampel interpretiert werden.

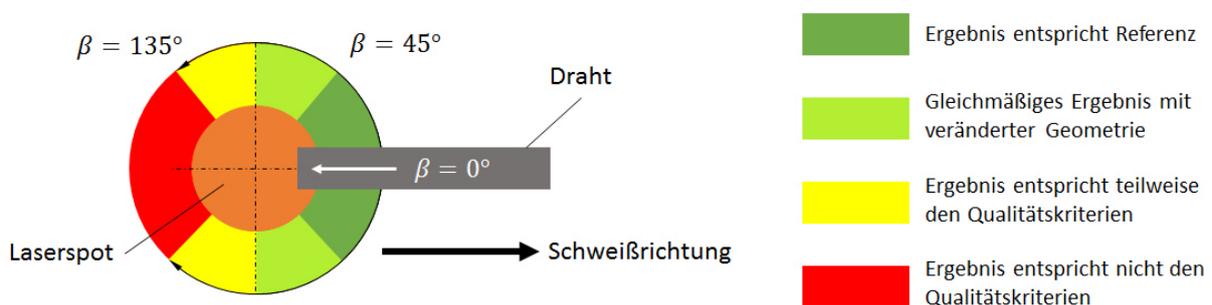


Abbildung 78 Toleranzfenster für den Parameter β

Die Querschnittsgeometrie der Referenzraupe beizubehalten war hier nicht als Qualitätskriterium gesetzt, sondern nur die gleichmäßige und vollständige Ausbildung der Raupe über die gesamte Länge. Folglich kann auch die seitlich-stechend geschweißte Raupe für sich allein genommen prinzipiell als akzeptables Ergebnis betrachtet werden, auch wenn am Raupenende eine geringe Abweichung auftritt. Bei $\beta = 135^\circ$ ist die Raupe deutlich schmaler als das Referenzobjekt, so als ob der

nachkommende Draht das noch weiche Schweißgut zusammengeschieben hätte. Grundsätzlich stellt das kein Problem dar, solange die Raupe konstant schmaler ist. Gegebenenfalls kann man diesen Effekt sogar aktiv nutzen, um bestimmte Zielmaße zu erreichen. In der Praxis werden allerdings eher Geometrien erzeugt, bei denen die Zufuhrrichtung potenziell zwischen schleppend und stechend variieren kann, als solche, bei denen sich der Winkel β gar nicht oder wenn, dann nur minimal ändert. In diesen Fällen würde sich mit dem Winkel auch die Raupenbreite ändern. Berücksichtigt man diesen Umstand, dann muss die Geometrie miteinbezogen werden bei der Festlegung des Toleranzfensters. Aus diesem Grund ist die Machbarkeit für seitliches Schweißen mit dem Zusatz „ja, aber“ zu versehen, weshalb der Winkel $\beta = 90^\circ$ farblich mit einem zu „gelb-grün“ versehen wurde. Das stechende Schweißen führte unter den hier gegebenen Bedingungen zu einem inakzeptablen Ergebnis. Ohne Anpassung anderer Positionierungsparameter ist das Schweißen so nicht machbar. Eine Möglichkeit, auch stark gekrümmte Bahnen schweißen zu können, besteht darin, mit einem Dreh-(Kipp-)Tisch der Fahrtrichtungsänderung des Laser-Draht-Systems gegenzusteuern, um dadurch nach Möglichkeit den Winkel β so klein wie möglich zu halten. Zudem lässt sich gegebenenfalls der Grenzwert vergrößern.

Die Versuche zur Drahtzufuhrrichtung fanden unabhängig von den anderen Parametern statt, die stets auf dem Optimalwert eingestellt blieben. Das obige Toleranzfenster beantwortet also nur die Frage, bis zu welchem Winkel gearbeitet werden kann, ohne dass andere Positionsparameter verändert werden müssen. Ein Erhöhen des Abstands zwischen Draht und Substrat könnte unter Umständen das „Zusammenschieben“ des Schweißguts reduzieren, das zu der verminderten Raupenbreite führte. Auch ein steilerer Winkel α könnte den gleichen Effekt haben, weil der Draht dann früher auf das Blech aufsetzt.

6.1.2 Drahtabstand h

Basierend auf den Schweißergebnissen der Messreihe h entsteht das in Abbildung 79 dargestellte Toleranzfenster. Innerhalb des grünen Bereichs ($h = 0,1 \dots 1,2 \text{ mm}$) ist die Prozessstabilität gegeben, d.h. es konnten wiederholt gute Schweißergebnisse erzielt werden. Teilweise wiesen die Raupen eine leicht schuppige Oberfläche auf. Dies war allerdings auch der Fall in vorherigen Versuchen mit ansonsten sehr stabilen Parametern. Eine mögliche Erklärung dafür sind Schwankungen der Laserleistung oder unterschiedliches Einkoppelverhalten, z.B. auf Grund der Substratoberfläche. Ab einem Abstand von $h = 0,7 \text{ mm}$ war bei Schweißbeginn häufig ein kurzes Aufblitzen zu beobachten, das von einer leichten Rußablagerung begleitet wurde. Möglicherweise befindet sich die Drahtspitze in diesen Fällen zu Beginn außerhalb des Laserstrahls und tritt erst kurz nach Drahtförderbeginn ein. Bei einer Kollimation von 0 entsteht im Abstand von 28mm von der Fokusslage ein 3mm-Spot. Der Spotdurchmesser verändert sich um etwa 0,1mm, wenn sich der Abstand um 1 mm ändert. Hier betrug die Kollimation 4.1, sodass bereits bei einem Abstand von 18 mm ein 3mm-Spot erzeugt werden

konnte. Folglich ist der Divergenzwinkel größer, d.h. eine Abstandsänderung bewirkt eine stärkere Veränderung des Spotdurchmessers.

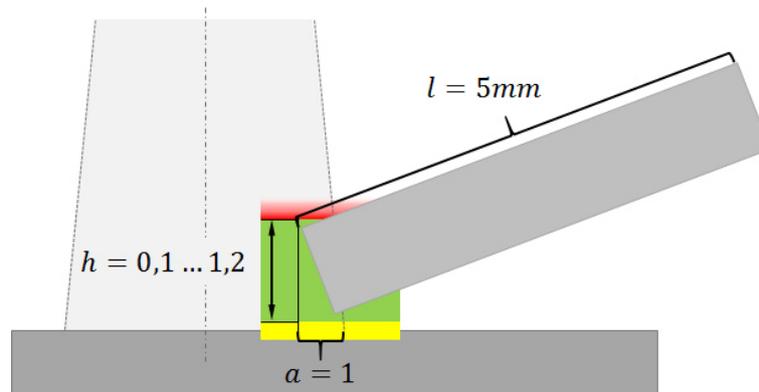


Abbildung 79 Toleranzfenster für den Drahtabstand h

Im gelben Bereich ($h = -0,2 \dots 0 \text{ mm}$) entsprechen nur einige der geschweißten Raupen den gesetzten Qualitätskriterien im vollen Umfang. Inwieweit das auf den (möglicherweise zu geringen) Abstand h zurückzuführen ist, sollte in weiteren Untersuchungen hinterfragt werden. Mögliche andere Fehlerquellen sind beispielsweise eine schwankende Laserleistung (innerhalb einer Raupe und zwischen den Raupen) oder eine eingeschränkte Steifigkeit der Positioniervorrichtung. Im roten Bereich ($h \geq 1,4 \text{ mm}$) war die geschweißte Raupe in der Länge mehrfach unterbrochen. Ein solches Schweißbild deutet darauf hin, dass die Streckenenergie zu groß ist für den Drahtvorschub, sodass der Draht zurückschmilzt. Die Streckenenergie ändert sich zwar nicht direkt mit steigendem Drahtabstand, aber die Intensität durch den dort kleineren Spotdurchmesser. Der Draht verliert dann immer wieder den Kontakt zum Schmelzbad und muss erneut in den Laserstrahl eintreten. Diese Theorie deckt sich mit der Beobachtung, dass es während des Schweißprozesses immer wieder aufgeblitzt hat. Bei den vollständig ausgebildeten Raupen dieser Messreihe blitzte es wenn überhaupt dann nur einmal am Anfang bei Beginn der Drahtförderung. Interessanterweise trat dieser Effekt bei einem Abstand von 1,5 mm zunächst nicht auf, sondern es konnte sogar eine Raupe erzeugt werden, die die Kriterien vollkommen erfüllte. Selbst die qualitativ schlechteste Raupe wies in der Länge ununterbrochen Materialauftrag auf und war nur in der Breite zum Teil nicht vollständig ausgefüllt. Der enorme Qualitätsunterschied von $h = 1,4 \text{ mm}$ gegenüber $h = 1,2 \text{ mm}$ und auch $h = 1,5 \text{ mm}$ (Abbildungen auf S. 115) ist ungewöhnlich, weil eher eine langsamere Veränderung des Schweißergebnisses zu erwarten wäre, nicht eine so abrupte. Dies legt nahe, dass der Schweißversuch mit $h = 1,4 \text{ mm}$ möglicherweise durch andere Einflüsse verfälscht wurde und das Ergebnis einen „Ausreißer“ darstellt. Ein Positionseffekt auf dem Blech – etwa weil das Koordinatensystem des Roboters relativ zur Kühlplatte nicht sauber eingemessen wurde – kann weitestgehend ausgeschlossen werden. Jede Raupe hatte (vom Roboter aus gesehen) dieselben Start- und Endpunktkoordinaten, weil das Blech verschoben wurde, nicht das Laser-Draht-System. Das Einstellen des Abstands h fand ebenfalls immer

an derselben Position statt. Die Überprüfung der Drahtfördergeschwindigkeit ergab, dass diese sich im Soll befand. Das Schwanken der Laserleistung als mögliche Ursache ist auch unwahrscheinlich, da die bereitgestellte Leistung eher kleiner denn größer ist als die geforderte.

Eine mögliche Erklärung, weshalb der Abstand zwischen Draht und Blech nicht beliebig groß sein darf, basiert auf der Annahme, dass der Draht immer an der Stelle des Laserstrahls aufgeschmolzen wird, wo die Intensität gerade ausreicht – unabhängig davon, ob die Drahtspitze bei Schweißbeginn eigentlich an der Vorderkante, in der Mitte oder der Hinterkante positioniert wurde. Dementsprechend könnte man mit unterschiedlichen Startpositionierungen die gleichen Bedingungen am Aufschmelzort erzeugen. In Abbildung 80 ist diese Theorie am Beispiel von $h = 1,4 \text{ mm}$ dargestellt. Die linke Grafik zeigt das in dieser Studie verwendete Parameterset (h10), bei dem mit Ausnahme von h alle anderen Parameter der Referenz entsprechen. In der rechten Grafik herrschen am angenommenen Aufschmelzort (nämlich bei $a = 1$) die identischen Bedingungen wie in der linken. Allerdings befindet sich die Drahtspitze in der initialen Positionierung sogar außerhalb der Spothinterkante. Wie in Abschnitt 2.3.2.2 erläutert sollte der Draht an der Vorderkante positioniert werden, weil er dann direkten Kontakt mit dem Schmelzbad hat [32]. Bei einem größeren Abstand h bzw. gleichbedeutend der Positionierung an der Hinterkante wird der Draht eher von dem Laserstrahl selbst als von dem Schmelzbad verflüssigt. Dadurch tropft der Draht in das Schmelzbad, was potenziell zu Irritationen führen kann wie z.B. der Beeinträchtigung der Marangoni-Strömung. Weil mit steigendem Abstand zur Substratoberfläche der Spotdurchmesser abnimmt, steigt zudem die Intensität und wird möglicherweise zu groß für die Drahtfördergeschwindigkeit. Ein 3mm-Spot hat eine Fläche von $A_{3\text{mm}} = 7,068 \text{ mm}^2$. Mit einer angenommenen Durchmesserreduzierungen von (mindestens) 0,1 mm pro 1 mm Höhenunterschied stellt sich bei $h = 1,4\text{mm}$ in etwa ein 2,86mm-Spot ein mit einer Fläche von $A_{2,86\text{mm}} = 6,424 \text{ mm}^2$. Wenn man von einer absoluten Gleichverteilung der Intensität im Spot ausgeht, ergeben sich bei $P = 2600 \text{ W}$ Intensitäten von $I_{3\text{mm}} = 367,9 \text{ W/mm}^2$ und $I_{2,86\text{mm}} = 404,7 \text{ W/mm}^2$. Inwieweit der Intensitätsunterschied die Ursache für das Schweißergebnis mit dem Parameterset h10 ist, wäre zu überprüfen, z.B. indem man bei $h = 0,1 \text{ mm}$ eine Raupe mit $P \approx 2860 \text{ W}$ fertigt, sodass sich bei einem (nahezu) 3mm-Spot die Intensität $I_{2,86\text{mm}}$ ergibt. In der Realität ist die Intensität am Spotrand jedoch geringer als im Zentrum, sodass der tatsächliche Unterschied kleiner sein wird. Eine genaue quantitative Aussage kann auf Grund der fehlenden Kenntnis über die tatsächliche Intensitätsverteilung im Laserstrahl der hier verwendeten Laserquelle nicht getroffen werden.

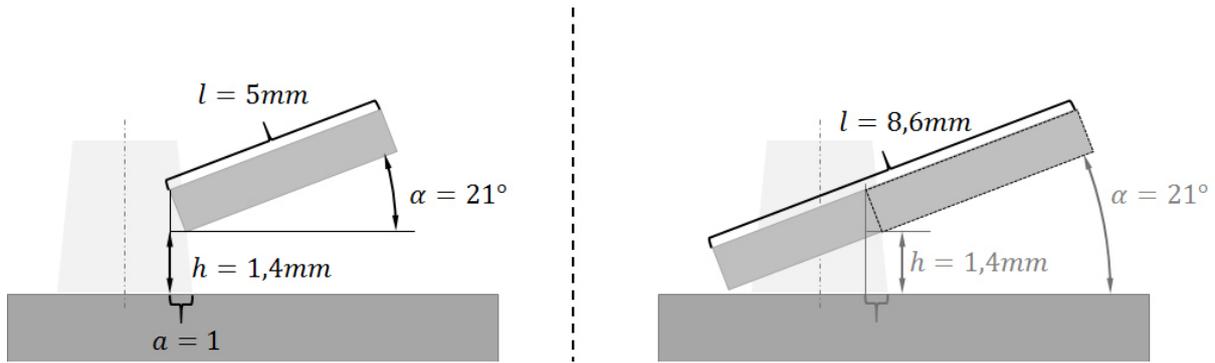


Abbildung 80 Drahtposition bei $h = 1,4 \text{ mm}$ (links) und potenziell vergleichbare Positionierung (rechts) bei $\alpha = 21^\circ$

Es ist zudem fraglich, ob das hier gefundene Parameterfenster universell angewendet werden kann oder nur bei $\alpha = 21^\circ$ bzw. ähnlich großen Winkeln. Wenn mit einer steileren Drahtzufuhr geschweißt wird, sollte die Gültigkeit überprüft werden, insbesondere wenn die Stabilität der Positionierung bezüglich h nicht gewährleistet ist.

6.1.3 Stickout l

Das aus den Versuchen resultierende Toleranzfenster für den Stickout ist in Abbildung 81 dargestellt. Auch wenn in dieser Studie Stickouts bis $12,5 \text{ mm}$ qualitativ gute Schweißergebnisse hervorbrachte, sollte er nach Möglichkeit nur länger als $l_{opt} = 5 \text{ mm}$ gewählt werden, wenn die Umstände wie etwa eine sonst eingeschränkte Zugänglichkeit es erfordern. Zum einen, weil dann das Toleranzfenster für den Abstand h zwischen Draht und Blech größer ist. Zum anderen lässt sich ein längerer Stickout weiter und wegen der Hebelwirkung auch leichter auslenken, wodurch der Prozess instabiler wird. Insbesondere bei unebenen Substratoberflächen ist eine gewisse Steifigkeit der Drahtzuführung wichtig, damit der Draht nicht von der Solllage (d.h. der Mittelachse) abweicht. Hinzukommt, dass der Draht beim Austritt aus der Düse ein wenig gebogen ist, sofern kein Richtsystem zwischen Drahtspule und Fördereinheit integriert ist. Für das bloße Auge ist die Krümmung zwar erst ab ein paar Zentimetern sichtbar, für die Prozessstabilität sind aber zum Teil schon Abweichungen von wenigen Zehntelmillimetern ausschlaggebend. In den Versuchen mit l_{opt} brannte der Draht teilweise bis kurz vor die Kontaktspitze zurück. Ein Stickout kürzer als 5 mm ist also nicht sinnvoll, weil dann die Gefahr besteht, dass die Düse beschädigt wird.

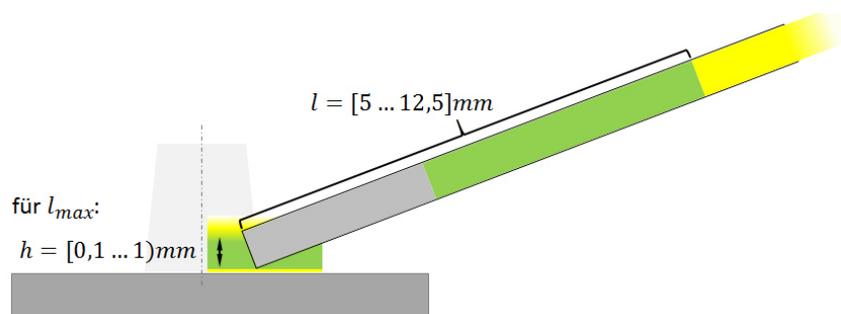


Abbildung 81 Toleranzfenster für den Stickout l und Anpassung von h bei l_{max}

6.1.4 Auslenkung b in Abhängigkeit von Position a

Aus den Ergebnissen der Versuche zur maximal möglichen Auslenkung des Drahts von der Mittelachse (b) in Abhängigkeit der Position der Drahtspitze zwischen Spotrand und -mittelpunkt (a) ergibt sich das in Abbildung 82 gezeigte Toleranzfenster. Im Allgemeinen darf der Draht nur sehr geringfügig von der Lage auf der Mittelachse abweichen, ohne dass die Qualität des Schweißergebnisses sinkt. Bei den Raupen, die in der Breite nicht vollständig ausgebildet sind oder einen gezackten Fuß haben, liegen die Fehler stets an der unteren Flanke, also der Seite, zu der der Draht ausgelenkt wurde. Dies spricht dafür, dass sich der Draht in diesen Fällen beim Schweißen partiell außerhalb des Bereichs im Laserstrahl mit ausreichender Intensität befand.

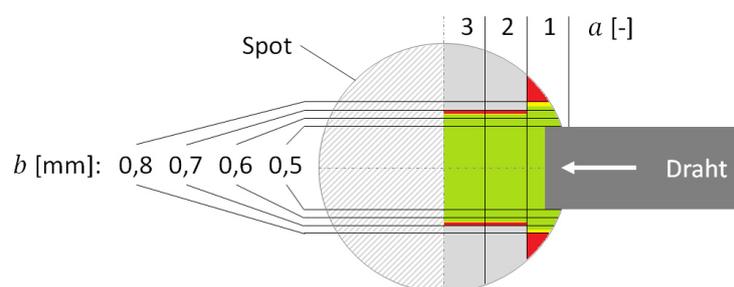


Abbildung 82 Toleranzfenster für die Auslenkung b

Die für alle a -Werte machbare Auslenkung $b = 0,65 \text{ mm}$ hatte auch für $h = 1 \text{ mm}$ und $l = 12,5 \text{ mm}$ Bestand, wenn man nur die Raupengeometrie und Oberflächengüte berücksichtigt. Der erhöhte Drahtabstand verursachte allerdings die Entstehung von Rauch und dementsprechend Ruß auf dem Blech am Raupenanfang, der durch Nacharbeit entfernt werden müsste. Durch reduzieren von h auf $0,5 \text{ mm}$ konnte dieser Effekt unterbunden werden. Die Untersuchung des umgekehrten Einflusses, also ob die Erhöhung der anderen Parameter eine größere Drahtauslenkung erlaubt, wurde hier nicht durchgeführt. Dies könnte bei dem Drahtabstand aber möglicherweise der Fall sein, weil der Draht unter diesen Bedingungen erst später und dadurch an einer breiteren Stelle in den Spot eintritt.

Man hätte erwarten können, dass der für b zulässige Bereich in der Spotmitte größer ist, weil der Laserstrahl dort am breitesten ist und die Intensität bei gleicher Auslenkung höher als am Rand. Die Hypothese konnte nicht bestätigt werden, sondern die Auswertung der hier geschweißten Raupen deutet sogar eine umgekehrte Tendenz an. Die weitgehende Unabhängigkeit der maximal möglichen Auslenkung von der Position a unterstützt jedoch die oben aufgestellte Theorie, dass der Draht stets beim Eintritt in den Spot aufgeschmolzen wird. Auf der anderen Seite stehen die Ergebnisse im Widerspruch zu denen einer vorherigen Bachelorarbeit, die an derselben Laserquelle mit denselben Schweißparametern durchgeführt wurde. Dort konnten mit $a = 3$ auch noch bei einer Auslenkung von $b = 1 \text{ mm}$ Raupen guter Qualität erzeugt werden [41]. Bei den hier präsentierten Versuchen war eine gewisse Unzuverlässigkeit zu beobachten in Bezug auf Stabilität und Wiederholgenauigkeit einer

bestimmten Positionierung für den Drahtabstand. Die Qualität der mit einem Parameterset geschweißten Raupen unterschied sich mitunter stark voneinander. Manchmal hatte der Draht nach dem Schweißen eine andere Auslenkung als vor dem Schweißen. Schon beim Einstellen von b war zu beobachten, dass der Draht bereits durch eine geringe Krafteinwirkung auf das Pistolenkopfrohr oder den Drahtförderer auslenkbar war, selbst wenn die Vorrichtung arretiert war. Zum Teil musste das System manuell (ohne Betätigen der Stellschraube) in die gewünschte Mittelposition gedrückt und mit dem Arretierhebel fixiert werden. Diese Einstellung war aber sehr instabil. Nach einer Kollision des Drahtförderers mit dem Tisch verschlechterte sich die Situation zusätzlich.

Die Ursache für die Instabilität liegt vermutlich in der Konstruktion der Positionier Vorrichtung (Abbildung 83), die aus mehreren, relativ zueinander verschiebbaren Platten besteht. Das Einstellen von b erfolgt, indem durch eine Stellschraube der Abstand zwischen der Basisplatte und dem vorderen Aufbau verändert wird. Steifigkeit erhält die Konstruktion durch die Führung mit vier Stiften, auf denen jeweils eine Feder steckt, die sicherstellen soll, dass der Abstand zwischen den Platten überall gleich ist. Dies ist auch deswegen erforderlich, weil der Drahtförderer mit seinem Gewicht wegen seiner Entfernung zu der Aufhängung eine nicht zu vernachlässigende Hebelkraft auf die Vorrichtung ausübt. Beim Vermessen des Spalts zwischen Basisplatte und Aufbau stellte sich jedoch heraus, dass der Abstand zwischen ihnen keineswegs gleich war, sondern um bis zu 3mm variierte. Die ursprünglich als Passung konzipierten Bohrungen für die Führungsstifte sind mittlerweile ausgeweitet. In Kombination mit der kurzen Führungsstrecke ergibt sich daraus ein vergleichsweise großes Spiel, sodass der Aufbau nicht mehr fest sitzt, sondern wackeln kann. Hinzukommt, dass die Länge der Stifte und der Stellschraube so kurz war, dass diese in einigen Fällen nur zur Hälfte in der Basisplatte steckten. Die Führungsstrecke war hier also kürzer und die Steifigkeit folglich noch geringer.

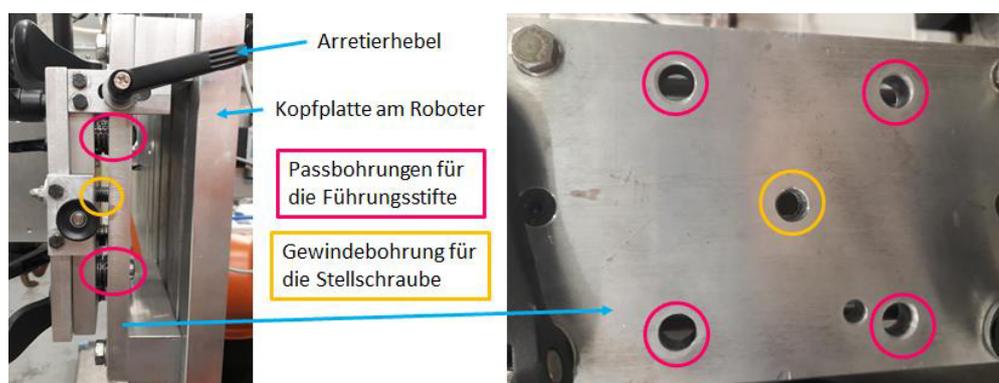


Abbildung 83 Positionier Vorrichtung in der Seitenansicht (links) und Basisplatte (rechts)

Auf Grund dieser Erkenntnisse müssen mit dem Parameter b erzielte Ergebnisse – auch die von den Beschichtungen – mit Vorsicht behandelt werden. Um eine reliable Aussage treffen zu können über das tatsächliche Toleranzfenster für den Abstand des Drahts von der Mittelachse, müssten die Versuche mit einer hinsichtlich der Steifigkeit optimierten Vorrichtung wiederholt werden.

Beispielsweise könnten die Auswirkungen einer abgenutzten, aufgeweiteten Passung reduziert werden durch eine größere Wandstärke der Basisplatte. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, einen verschleißbeständigeren Werkstoff für die unter Belastung stehenden Komponenten zu verwenden. Aktuell bestehen alle metallenen Teile der Vorrichtung aus einer Aluminium-Legierung. Der Vorteil liegt in dem durch die geringe Dichte geringeren Gesamtgewicht. Gleichzeitig hat es bei elastischen Deformationen einen kleineren E-Modul sowie eine geringere Festigkeit gegen plastische Deformation und ist dadurch anfälliger für Deformation und Abnutzung unter Beanspruchung. Betrachtet man nur die Eigenschaften Härte und Festigkeit, stellt Stahl eine gute Lösung dar. Mit einer nahezu dreimal so großen Dichte wie Aluminium wäre die Vorrichtung aber sehr schwer, selbst wenn nur die Basisplatte vollständig aus Stahl gefertigt werden würde. Alternativ könnten die Passbohrungen mit Stahlhülsen verstärkt werden.

Grundsätzlich anzumerken, dass die Konstruktion der Positioniervorrichtung auf Flexibilität ausgerichtet ist, um den Anforderungen im Laborumfeld gerecht zu werden. Demensprechend müssen insbesondere nach intensiver Nutzung Einbußen bei der Positionsstabilität in Kauf genommen werden. In der Praxis hingegen ist davon auszugehen, dass das Ziel verfolgt wird, die Positionierung des Drahts zum Laserstrahl einmalig einzustellen und diese dann konstant beizubehalten. Anstatt auf einer beweglichen Vorrichtung kann der Drahtförderer folglich auf einer starren, ortsfesten Halterung montiert werden. Die Konstruktion der Aufnahme für den Drahtförderer sollte dann so ausgelegt werden, dass insbesondere dort große Steifigkeit gegeben ist, wo bereits eine kleine Auslenkung zum Verlassen eines der Toleranzfenster der Positionsparameter führt. Ein besonderes Augenmerk sollte hier auf die Stabilität der Lage des Drahts auf der Spotmittelachse gelegt werden, weil in den Versuchen deutlich wurde, dass hier schon minimale Abweichungen die Prozesssicherheit gefährden.

6.2 Beschichtungen

Zu Beginn wurde der Zusammenhang zwischen Versatz Δx und der Höhe bzw. Breite der Beschichtung untersucht. Wie erwartet nimmt die Breite bei sinkendem Versatz linear ab. Gleichzeitig steigt die Höhe, weil auf Grund der identischen Schweißparameter der Materialauftrag und damit das Volumen pro Streckenelement konstant ist. Es zeigte sich zudem, dass bei $\Delta x = 1,5 \text{ mm}$ ($\approx 48\%$ Überlappung) mit dem optimalen Drahtabstand $h_{opt} = 0,1 \text{ mm}$ Fünf-Raupen-Beschichtungen prozesssicher geschweißt werden. Weil mit steigendem Versatz die zu schweißende Raupe immer weniger von dem schon bestehenden Schweißgut beeinträchtigt wird, wurde angenommen, dass h_{opt} folglich auch bei $\Delta x > 1,5 \text{ mm}$ erfolgreich eingesetzt werden kann. Des Weiteren wurde angenommen, dass eine Positionierung, die bei Fünf-Raupen-Beschichtungen funktioniert, dies auch bei Zehn-Raupen-Beschichtungen erfüllen müssten. In den Versuchen, die diese Theorie bestätigen sollten, konnte jedoch keine einzige qualitativ hochwertige Beschichtung aus zehn Raupen gefertigt

werden. Selbst bei einem Versatz von 2mm traten bei allen drei Beschichtungen Fehler auf, die auf eine zu geringe Streckenenergie hinweisen. Als Ursache wurde vermutet, dass die zur Verfügung stehende Leistung schwankt, weil der Laserstrahl unterschiedlich gut einkoppelt. Die Positionierung stand nicht unter Verdacht, weil die Fehler bei den Fünf-Raupen-Beschichtungen nicht aufgetreten waren. Deswegen wurden verschiedene Methoden (das Blech sandstrahlen, das Blech beschichten mit Graphit bzw. Kreide) getestet, die das Einkoppelverhalten potenziell verbessern sollten. Lediglich das Beschichten mit Graphit hatte den Effekt, dass die darauf geschweißten Beschichtungen die geforderte Qualität hatten. Wegen der starken Aufkohlung (mehr als doppelt so hoher Kohlenstoffgehalt) ist dieser Ansatz jedoch nicht universell einsetzbar.

In den Versuchen zur Drahtpositionierung bei Beschichtungen zeigte sich, dass die Toleranzfenster der einzelnen Variablen sich von denen für Raupen unterscheiden. Beispielsweise ist der zulässige maximale Stickout l geringer. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass der Draht bei einem längeren Stickout der Auslenkung durch das schon bestehende Schweißgut auf Grund der Hebelwirkung mehr nachgibt. Infolgedessen würde er in Bereiche im Laserstrahl geringerer Intensität gelangen, wo er nur unvollständig aufgeschmolzen wird. In Bezug auf den Drahtabstand h zur Blechoberfläche musste der Optimalwert von 0,1mm auf 0,5mm nach oben korrigiert werden. Ursprünglich war angenommen worden, dass der für Raupen deklarierte Wert auch bei Beschichtungen Gültigkeit hat. Diese Einschätzung muss allerdings revidiert werden angesichts der deutlichen Verbesserung der Oberflächenqualität, nachdem der Abstand erhöht worden war. Auch bei $\Delta x = 1,4 \text{ mm}$ konnte unter diesen Bedingungen eine Zehn-Raupen-Beschichtung höchster Qualität gefertigt werden ohne jegliche Anzeichen von Unregelmäßigkeiten. Die Theorie, dass der Draht bei einem kleineren Abstand das bestehende Schweißgut berührt und dadurch aus der Solllage ausgelenkt wird, scheint damit bestätigt. Vor dem Hintergrund, dass diese Erkenntnisse erst nach der Durchführung von Messreihe S erlangt wurden, sind die Ergebnisse in Bezug auf den Stickout zu hinterfragen. Es ist denkbar, dass ohne die Auslenkung auch ein längerer Stickout möglich ist. Inwieweit sich h noch auf 0,3mm reduzieren lässt, wäre ebenfalls zu prüfen. Eine Auswirkung auf den Zufuhrwinkel ist unwahrscheinlich. Bei $\beta = 90^\circ$ würde der Draht hier (mit $d_{spot} = 3 \text{ mm}$ und $a = 1$) erst bei einem Versatz $\Delta x < 1 \text{ mm}$ (graphisch ermittelt theoretisch $\Delta x \approx 0,5 \text{ mm}$) mit dem bereits existierenden Schweißgut in Berührung kommen. In diesem Zusammenhang wäre es von Nutzen, die tatsächliche Untergrenze für den Versatz zu kennen, um die unter ansonsten identischen Bedingungen erzeugbare Schichtdicke zu maximieren. Über die maximal mögliche Auslenkung des Drahts von der Mittelachse kann keine Aussage getroffen werden, weil die Versuche wegen der oben beschriebenen Probleme mit der Positioniervorrichtung abgebrochen wurden.

Insbesondere bei einem langen Stickout war der Effekt zu beobachten, dass die ersten Raupen eine gute Qualität hatten, während die letzte(n) Fehler aufwies(en). Dies lässt vermuten, dass die

Auslenkung des Drahts aus der Solllage mit steigender Raupenzahl zunimmt. Der Versatz Δx war konstant, weil angenommen worden war, dass auch die Raupenbreite konstant bei 2,9 mm liegt. Bei einem Versatz von 1,5 mm und fünf Raupen müsste die Beschichtung also theoretisch 8,9 mm breit sein (mit 2,9 mm für die erste Raupe und 1,45 mm Breitenzuwachs pro weitere Raupe). Die entsprechende Beschichtung aus Messreihe V ist allerdings 9,2 mm breit. Die Beschichtung mit zehn Raupen misst etwa 17 mm in der Breite anstatt der 15,95 mm, die sich rechnerisch ergeben. Das heißt, obwohl der Versatz konstant ist, nimmt die Überlappung mit steigender Raupenzahl zu. Es wäre zu prüfen, ob hier ein linearer Zusammenhang zwischen Raupenzahl und Verbreiterung besteht oder ob es einen Grenzwert gibt bei der Differenz zwischen theoretischer und tatsächlicher Breite. Bei großflächigen Beschichtungen muss dann gegebenenfalls der Versatz bei steigender Raupenzahl entsprechend vergrößert werden. Der Effekt der Auslenkung aus der Sollachse auf die Schweißqualität verdeutlicht auch, wie wichtig es ist, den Fokus bei der Konstruktion der Vorrichtung für den Drahtförderer auf die Steifigkeit in dieser Richtung zu legen. Zusätzlich kann die Stabilität der Lage auf der Mittelachse durch den Einsatz von Kontaktspitzen mit einem möglichst geringen Spiel gesteigert werden. Des Weiteren ist es im Hinblick auf großflächige Beschichtungen sinnvoll zu untersuchen, ob die Leistung bzw. die Streckenenergie ab einer bestimmten Raupenzahl reduziert werden kann, um den Wärmeeintrag zu reduzieren. Dies ist insbesondere dann relevant, wenn sich die Wärme im Werkstück staut, z.B. auf Grund dessen kleinen Volumens oder weil die Wärme wegen der Einspannvorrichtung wegen der geringen Kontaktflächen nicht abfließen kann.

6.3 Wände

Die Ergebnisse von den Versuchen zu den Wänden zeigen, dass die für Einzelraupen und Beschichtungen qualifizierten Schweißparameter nicht ohne Weiteres für das mehrlagige Schweißen dünnwandiger Geometrien angewendet werden können. Die zu Beginn gefertigten fünfteiligen Wände entstanden mit dem für Raupen und Beschichtungen qualifizierten Standardschweißparametern und einem konstanten Versatz in der Höhe einer Einzelraupe. Im mittleren Bereich überzeugten diese durch eine ebene Wandkuppe und deutlich voneinander abgrenzbaren Lagen. Allerdings wich die erste Wand an den Außenkanten dahingehend von der Sollgeometrie ab, dass sie insbesondere am Ende abflacht statt steil aufsteigt. Bedingt durch den Delay zwischen Draht und Laser ist das schon bei einer Einzelraupe der Fall. Dort und vor allem bei Beschichtungen ist das jedoch nicht unerwünscht, sondern im Zweifelsfall sogar erstrebenswert, weil dadurch ein kerbarmer Übergang zwischen Blech und Auftrag entsteht. Bei Wänden wirkt sich das nachteilig aus, weil dort die normale Raupenhöhe als Basis der nächsten Lage fehlt und sich somit die Schmelze der obersten Lage auch auf die Enden der darunterliegenden Raupen mitverteilt. Die Länge des „normalhohen“ Raupenabschnitts wird immer kürzer, während der Endbereich mehr Länge bei zunehmender Abflachung einnimmt (Abbildung 84).

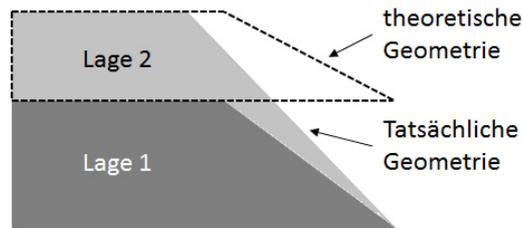


Abbildung 84 Einfluss des Raupenendes auf das Wandende

Durch das Senken der Delay-Zeiten konnte die Abflachung zwar reduziert werden, gleichzeitig entstand dadurch aber am Anfang der Wand stets eine Überhöhung. Diese wurde spätestens bei der vierten Lage sichtbar und baute sich mit steigender Lagenzahl weiter auf. Die Problematik hierbei besteht darin, dass der Draht in Folge dessen an diesen Stellen stets deutlich auf das schon bestehende Schweißgut aufsetzt, weil der automatisch aus der durchschnittlichen Wandhöhe ermittelte Versatz in z-Richtung geringer ist als die Überhöhung. Den Versatz an der Überhöhung auszurichten ist ebenso wenig empfehlenswert, weil dadurch der Drahtabstand in der Mitte der Wand verhältnismäßig groß wird. Bei den Versuchen hier wurde sich durch Abschleifen der Überhöhung beholfen, um für das Auftragen der nächsten Lage eine vergleichsweise ebene Basis zu schaffen. In der automatisierten Fertigung könnte dies sehr präzise mit einer Fräsmaschine umgesetzt werden, allerdings beseitigt dieses Vorgehen nur die Symptome, nicht die Ursache. In Folgeversuchen sollte daher untersucht werden, wie durch die Anpassung welcher Parameter die Nahtüberhöhung unterbunden werden kann. Ein Ansatz wäre, pendelnd zu schweißen, also nach jeder Lage Start- und End-Punkt zu vertauschen, sodass sich Überhöhung am Anfang und Abflachung am Ende potenziell kompensieren. Des Weiteren könnte das schleichende Anfahren und Anhalten des Roboters beim Schweißweg den gewünschten Effekt bringen. In dem hier genutzten Schweißprogramm fährt der Roboter am Startpunkt aus dem Stillstand los – muss also beschleunigen, während simultan (Delay von 0 s) der Laser startet. Dieser schaltet sich in dem Moment aus, wenn der Endpunkt erreicht ist, also gleichzeitig mit dem Anhalten des Roboters, der vorher abbremsen muss. Möglicherweise verbessert sich die Wandgeometrie am Anfang und Ende, wenn der Laser ein- und ausgeschaltet wird, während der Roboter schon bzw. noch mit voller Geschwindigkeit fährt. Dies ließe sich z.B. realisieren, indem der Laser wie auch der Draht über Trigger-Befehle während der Fahrt startet und stoppt. Dementsprechend müssten dann die Distanz zwischen Start- und Endpunkt sowie die Delay-Zeiten des Drahts angepasst werden.

Beim Schweißen der Wände war bei gleichbleibender Leistung mit steigender Lagenzahl ein längeres Nachglühen („Glühschweiß“) des gerade aufgetragenen Materials zu beobachten. Bei den Einzelraupen und auch den Beschichtungen trat hingegen kein Glühschweiß auf. Dies steht im Einklang mit der oben getroffenen theoretischen Betrachtung, dass sich die eingebrachte Wärme in Wänden wegen der dünnwandigen Geometrie staut, wohingegen sie aus der unmittelbar auf das Substrat geschweißten Raupe schnell in das großvolumige Blech abfließen kann. Wegen des Wärmestaus steht

die eingebrachte Energie länger zur Verfügung, sodass insgesamt weniger Leistung ausreicht zum Aufschmelzen von Draht und Untergrund. Für die ersten vier Lagen wurde hier bereits untersucht, wie weit die Leistung reduziert werden kann bzw. muss. Es zeigte sich, dass für das Schweißen der zweiten Lage bereits 200 W weniger notwendig sind als bei der Basisraupe ($P = 2600 \text{ W}$). Auch bei der dritten und vierten Lage schien eine weitere Reduzierung der Leistung möglich, die Ergebnisse für das zunächst gefundene Minimum waren aber nicht wiederholbar. In weiteren Versuchen sollte diese Messreihe fortgesetzt werden, unter anderem um zu untersuchen, ob eine kontinuierliche (z.B. pro Lage 50 W weniger) oder diskrete (alle n Lagen 100 W) Senkung der Leistung sinnvoller ist. Hierbei wäre zu erwarten, dass die mögliche bzw. erforderliche Leistungsreduzierung pro zusätzlicher Lage mit wachsender Wandhöhe zunimmt, wegen der steigenden Strecke, die zum großen Volumen des Substrats zurückgelegt werden muss.

Ebenso konnte die Annahme bestätigt werden, dass die Lagenhöhe nicht der Höhe einer Einzelraupe entspricht, sondern abnimmt. Bei der zehnlagigen Wand betrug der Höhenunterschied je zusätzlicher Lage etwa 0,6...0,7 mm. Im Gegensatz zu den am Stück geschweißten fünfteiligen Wänden waren die einzelnen Lagen bei den mit Unterbrechung geschweißten Wänden nicht deutlich voneinander abgesetzt. Es schien, als ob bei Letzteren das gerade erzeugte, noch flüssige Schweißgut an den Flanken der Wand heruntergelaufen wäre, was eine viskosere, also heißere Schmelze vermuten lässt. Dies ist insofern überraschend, als dass die Wand beim kontinuierlichen Schweißen wärmer sein müsste, weil sie sich zwischen den Lagen nicht abkühlen kann. Beim unterbrochenen Schweißen lagen hingegen mehr als 15 Minuten zwischen den einzelnen Lagen. Möglicherweise ist aber auch die Aufschmelztiefe bei den abgekühlten Wänden geringer, weshalb das Schmelzbad beim Hinzufügen des flüssigen Drahtmaterials zum „Überlaufen“ gebracht wird. Ein Schliffbild von den Wänden könnte Aufschluss darüber bringen.

Das ursprünglich gesetzte Ziel, das gefundene Toleranzfenster der Drahtpositionierung auch bei Wänden zu überprüfen, musste letzten Endes verworfen werden. In den Versuchen mit den Einzelraupen und Beschichtungen wurde mit den Standardparametern zunächst ein Referenzobjekt gefertigt, mit dem die unter veränderter Position erzeugten Schweißergebnisse verglichen werden konnten. Da es im zeitlichen Rahmen der Arbeit nicht gelungen war, mit den hier genutzten Parametern (3mm-Spot und 1mm-Draht) eine qualitativ hochwertige Wand zu generieren, erschien das Variieren der Positionsparameter wenig sinnvoll. Die Tatsache, dass bei den fünfteiligen Wänden die Qualität im mittleren Bereich der Raupenlänge ähnlich hoch ist wie bei dem Vergleichsobjekt, deutet zumindest darauf hin, dass mit der Optimalpositionierung grundsätzlich das Schweißen von Wänden möglich ist. In Anbetracht der oben beschriebenen Herausforderungen, die bei den Schweißversuchen auftraten, bedarf es also vor der Ermittlung von Toleranzfenstern für die Positionierung zuerst einer Qualifizierung des Schweißens von Wänden.

7 Zusammenfassung und Fazit

In der vorliegenden Arbeit wurde der Einfluss der Drahtpositionierung auf die Fertigungsqualität beim Laserdrahtauftragschweißen untersucht. Ziel war die Ermittlung der jeweiligen Grenzwerte, innerhalb derer die Positionierung von dem angenommenen Ideal abweichen darf, ohne die Qualität des erzeugten Schweißguts zu beeinträchtigen. Das Toleranzfenster sollte zunächst mit dem Schweißen von Einzelraupen aufgestellt und anschließend bei Beschichtungen und Wänden bestätigt bzw. bei Bedarf angepasst werden. Die Schweißergebnisse wurden dafür in einer Sichtprüfung danach beurteilt, inwieweit sie die festgelegten Qualitätskriterien hinsichtlich der Oberflächenbeschaffenheit und der zu erreichenden Zielgeometrie erfüllten. Die Versuche wurden mit einem auf 3 mm fokussierten Laserstrahl aus einer Nd:YAG-Laserquelle, handelsüblichem 1mm-starken MSG-Massivdraht sowie herkömmlichen Baustahlplatten als Substrat durchgeführt. Die im Laufe der Studie aufgetretenen Herausforderungen wurden auf ihre Ursache hin analysiert, sodass zielgerichtet Lösungen zur Prozessoptimierung entwickelt werden konnten. Beispielsweise wurden die bestehenden stetig Roboterprogramme weiterentwickelt, wodurch eine effizientere Versuchsdurchführung ermöglicht und in Ansätzen ein Safe-Robot-Konzept integriert wurde.

7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die wesentlichen Erkenntnisse dieser Arbeit sind im Folgenden zusammengefasst:

- Basierend auf Forschungsergebnissen und der Praxiserfahrung am IWS wurden folgende Werte für die einzelnen Parameter als optimale Drahtpositionierung angenommen:
 - Zufuhrrichtung..... $\beta_{opt} = 0^\circ \hat{=}$ schleppend
 - Zufuhrwinkel..... $\alpha_{opt} \approx 20^\circ$
 - Drahtabstand zum Werkstück..... $h_{opt} = 0,1mm$
 - Stickout..... $l_{opt} = 5mm$
 - Position auf dem Spot
 - in Schweißrichtung..... an der Vorderkante
 - quer zur Schweißrichtung..... mittig
- Mit den angenommenen Optimalwerten konnten reproduzierbar qualitativ hochwertige Einzelraupen prozesssicher geschweißt werden.
- Für den Drahtabstand und den Stickout wurde der jeweilige Optimalwert gleichzeitig als unterer Grenzwert identifiziert. Bei den anderen beiden untersuchten Parametern Zufuhrrichtung und der Position auf dem Spot quer zur Schweißrichtung stellt der Optimalwert die natürliche Untergrenze dar.

- Bei steigendem Winkel der Zufuhrrichtung ist eine Verschmälerung der Raupe zu beobachten. Bis zu einem Winkel von 90° (seitliche Drahtzufuhr) bewegte sich die Abweichung von der Sollbreite in einem akzeptablen Rahmen. Schleppendes Schweißen ($\beta = 180^\circ$) führte hier unter Einhaltung der Optimalwerte der anderen Parameter zu einer gefurchten „Raupe“.
- Bis zu einem Drahtabstand von 1,2 mm und einem Stickout von 12,5 mm wurden unter Einhaltung der Optimalwerte der anderen Parameter gute Schweißergebnisse erzielt. Die Position des Drahts quer zur Schweißrichtung erlaubte hier nur eine Abweichung von weniger als 0,2 mm von der Mittellage und stellt damit den für den Schweißerverfolg kritischsten Parameter dar. Dieser Umstand muss berücksichtigt werden bei der Konstruktion der Vorrichtung, mit der der Drahtförderer in dem Laser-Draht-System montiert wird.
- Die Versuche zu den Beschichtungen zeigten, der untere Grenzwert für den Drahtabstand nach oben auf 0,5mm korrigiert werden muss. Zudem reduzierten sich der maximal zulässige Stickout (10 mm) als auch der Drahtabstand (0,7 mm).
- Durch das Besprühen der Bleche mit Graphit vor dem Schweißen konnten auch bei einem Drahtabstand von 0,1 mm den Qualitätskriterien entsprechende Beschichtungen erzeugt werden. Wegen der resultierenden starken Aufkohlung ist diese Methode nur eingeschränkt anwendbar in der Praxis.
- Durch die Integration des Prozessschritts der automatisierten Stickout-Herstellung, bei der der Draht mit einem Laserimpuls auf eine definierte Länge abgetrennt wird, konnte die Qualität der Geometrie auf der Startseite von Beschichtungen gesteigert werden.
- Die Analyse der Wände zeigte, dass die Lagenhöhe geringer ist als die Höhe einer Einzelraupe.
- Ein größerer Delay zwischen Laser und Drahtförderung bewirkt eine Abflachung der Anfangs- und Endgeometrie bei Wänden.
- Mit steigender Wandhöhe sinkt die für den Prozess notwendige Laserleistung.

7.2 Fazit

Die anfangs gesteckten Ziele konnten in Bezug auf Einzelraupen und Beschichtungen erreicht werden. Es zeigte sich, dass bei der Positionierung des Drahts relativ zum Laserstrahl ein gewisser Spielraum gegeben ist. Die Lage des Drahts quer zur Schweißrichtung bildete mit einem sehr engen Toleranzfenster die Ausnahme. Bei den Versuchen zu den Wänden zeigte sich, dass es zunächst einer Qualifizierung des Prozesses zum Schweißen von Wänden bedarf, was im zeitlichen Rahmen dieser Arbeit nicht geleistet werden konnte. Dementsprechend gelang es nicht, ein Toleranzfenster der Drahtpositionierung für Wände zu definieren.

8 Quellen

- [1] VDI-Fachbereich Produktionstechnik und Fertigungsverfahren: VDI 3405. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik, Dez. 2014.
- [2] Gebhardt, A.: Generative Fertigungsverfahren. Carl Hanser Verlag, München, 4. Auflage, 2013.
- [3] Yan, M., Yu, P.: An overview of densification, microstructure and mechanical selective laser melting, electron beam melting, laser metal deposition and selective laser sintering, and with conventional powder metallurgy, in: A. Lakshmanan (Ed.), Sintering Techniques of Materials, Intech., 2015.
- [4] Herderick, E.: Additive Manufacturing of Metals: A Review. Journal of Materials Science and Technology 1413-1425, 2011
- [5] Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E. & Emmelmann, C.: Additive manufacturing of metals. Acta Materialia 117:371-392, 2016.
- [6] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., DIN 8580. Beuth Verlag GmbH, Sept. 2003.
- [7] Abdulrahman, K.O., Akinlabi, E.T. & Mahamood, R.M.: Laser metal deposition technique: sustainability and enviromental impact. Procedia Manufacturing 21:109-116, 2018.
- [8] Kranz, J., Herzog, D. & Emmelmann, C.: Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4. Journal of Laser Applications 27:S14001, 2015.
- [9] Frazier, W.E.: Metal Additive Manufacturing: A Review. Journal of Materials Engineering and Performance 23:1917-1928, 2014.
- [10] ASTM F2792-10, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010, www.astm.org.
- [11] Hügel, H. & Graf, T.: Laser in der Fertigung. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2. Auflage, 2009.
- [12] Buchfink, G.: Werkzeug Laser. TRUMPF GmbH + Co. KG, Ditzingen, 1. Auflage, 2006.
- [13] Bliedtner, J., Müller, H. & Barz, A.: Lasermaterialbearbeitung. Carl Hanser Verlag, München, 2013.
- [14] Siegrist, M.W.: Laser: Theorie, Typen und Anwendungen. Springer Spektrum, Berlin, 8. Auflage, 2018.

- [15] Eichler, J. & Eichler, J.H.: Laser: Bauformen, Strahlführung, Anwendungen. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 7. Auflage, 2010.
- [16] <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/laser/8789>
Zugriff: 08.08.2019
- [17] <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/dauerstrichlaser/2771>
Zugriff: 08.08.2019
- [18] <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/puls laser/11752>
Zugriff: 08.08.2019
- [19] <https://de.wikipedia.org/wiki/Laser#/media/Datei:Laguerre-gaussian.png>
Zugriff: 08.08.2019
- [20] <https://it.wikipedia.org/wiki/File:Hermite-gaussian.png>
Zugriff: 08.08.2019
- [21] Haas Laser, Handbuch Lasergerät HL 4006D
- [22] Abioye, T.E., Folkes, J. & Clare, A.T.: A parametric study of Inconel 625 wire laser deposition. *Journal of Materials Processing Technology* 213:2145-2151, 2013.
- [23] Beyer, E.: *Schweißen mit Laser: Grundlagen*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1995.
- [24] Schulze, G.: *Die Metallurgie des Schweißens*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 3. Auflage, 2004.
- [25] Mok, S.H., Bi, G., Folkes, J. & Pashby, I.: Deposition of Ti-6Al-4V using a high power diode laser and wire, Part I: investigation on the process characteristics. *Surf Coat Technol* 202:3933-3939, 2008.
- [26] Mok, S.H., Pashby, I.R., Segal, J.I. & Bi, G.: 3rd International WLT-conference on Lasers in Manufacturing, Munich, p. 773, 2005.
- [27] Borges, B., Quintino, L., Miranda, R.M. & Carr, P.: Imperfections in Laser cladding with powder and wire fillers. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 50:175-183, 2010.
- [28] Syed, W.U.H., Pinkerton, A.J. & Li, L.: A comparative study of wire feeding and powder feeding in direct diode laser deposition for rapid prototyping. *Applied Surface Science* 247: 268-276, 2005.

- [29] Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D. & Li, H.: Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 81:465-481, 2015.
- [30] Hagqvist, P., Heralic, A., Christiansson, A.-K. & Lennartson, B.: Resistance measurements for control of laser metal wire deposition. *Optics and Lasers in Engineering* 54:62-67, 2014.
- [31] https://www.iws.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/thermische_oberflaechentechnik/auftragschweissen/systemtechnik/COAXwire.html
Zugriff: 08.08.2019
- [32] Syed, W.U.H. & Li, L.: Effects of wire feeding direction and location in multiple layer diode laser direct metal deposition. *Applied Surface Science* 248:518-524, 2005.
- [33] Syed, W.U.H, Pinkerton, A.J. & Li, L.: Combining wire and coaxial powder feeding in laser direct metal deposition for rapid prototyping. *Applied Surface Science* 252:4803-4808, 2006.
- [34] Kim, J.-D. & Peng, Y.: Plunging method for Nd: YAG laser cladding with wire feeding. *Optics and Lasers in Engineering* 33:299-309, 2000.
- [35] Beyer, E.: Experimentelle Untersuchung des Laserauftragschweißens mit drahtförmigem Zusatzmaterial. Bachelorarbeit, Universität Stuttgart, Institut für Strahlwerkzeuge, 2018.
- [36] Xu, X., Mi, G., Luo, Y., Jiang, P., Shao, X. & Wang, C.: Morphologies, microstructures, and mechanical properties of samples produced using laser metal deposition with 316 L stainless steel wire. *Optics and Lasers in Engineering* 94:1-11, 2017.
- [37] Teli, M., Klocke, F., Arntz, K., Winands, K., Schulz, M. & Oliari, S.: Study for Combined Wire + Powder Laser Metal Deposition of H11 and Niobium. *Procedia Manufacturing* 25:426-434, 2018.
- [38] Liu, S., Liu, W., Harooni, M., Ma, J. & Kovacevic, R.: Real-time monitoring of laser hot-wire cladding of Inconel 625. *Optics and Laser Technology* 62:124-134, 2014.
- [39] Brandl, E., Michailov, V., Viehweger, B. & Leyens, C.: Deposition of Ti-6Al-4V using laser and wire, part 1: Microstructural properties of single beads. *Surface & Coatings Technology* 206:1120-1129, 2011.
- [40] Salminen, A: The effects of filler wire feed on the efficiency of laser welding. *Proceedings of the SPIE* 4831:263-268, 2003.

- [41] İşlemeciöğlü, E.E.: Einfluss von Schweißparametern auf die Reproduzierbarkeit der Nahtqualität beim roboterbasierten Laserdrahtauftragsschweißen. Bachelorarbeit, HAW Hamburg, Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik, 2018.
- [42] Heralic, A., Christiansson, A.-K. & Lennartson, B.: Height control of laser metal-wire deposition based on iterative learning control and 3D scanning. *Optics and Lasers in Engineering* 50:1230-1241, 2012.
- [43] Heralic, A., Christiansson, A.-K., Ottosson, M. & Lennartson, B.: Increased stability in laser metal wire deposition through feedback from optical measurements. *Optics and Lasers in Engineering* 48:478-485, 2010.
- [44] Hagqvist, P., Heralic, A., Christiansson, A.-K. & Lennartson, B.: Resistance based iterative learning control of additive manufacturing with wire. *Mechatronics* 31:116-123, 2015.
- [45] Schuler, V. & Twrdek, J.: *Praxiswissen Schweißtechnik*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 6. Auflage, 2019.
- [45] Abioye, T.E., McCartney, D.G. & Clare, A.T.: Laser cladding of Inconel 625 wire for corrosion protection. *Journal of Materials Processing Technology* 217:232-240, 2014.
- [47] Dornheim, C.-F.: Einführung, Inbetriebnahme und Erprobung von roboterbasiertem Laserdrahtauftragschweißen. Bachelorarbeit, HAW Hamburg, Department Maschinenbau und Produktion & MAN Turbo & Diesel SE, 2015.
- [48] Donnadello, S., Motta, M., Demir, A.G. & Previtali, B.: Monitoring of laser metal deposition height by means of coaxial laser triangulation. *Optics and Lasers in Engineering* 112:136-144, 2019.

9 Anhang

9.1 Einzelraupen

9.1.1 Versuchsreihe „ β “



Abbildung 85 Raupe mit $\beta = 0^\circ$ (schleppend; Referenz)

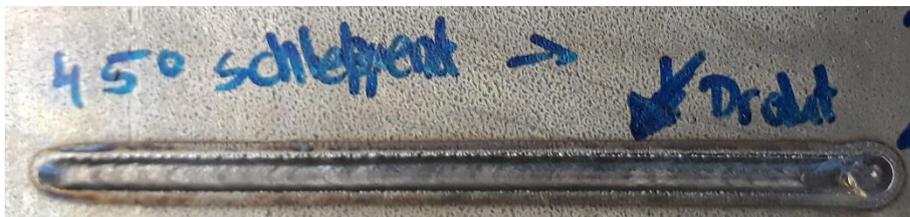


Abbildung 86 Raupe mit $\beta = 45^\circ$ (seitlich-schleppend)



Abbildung 87 Raupe mit $\beta = 90^\circ$ (seitlich)

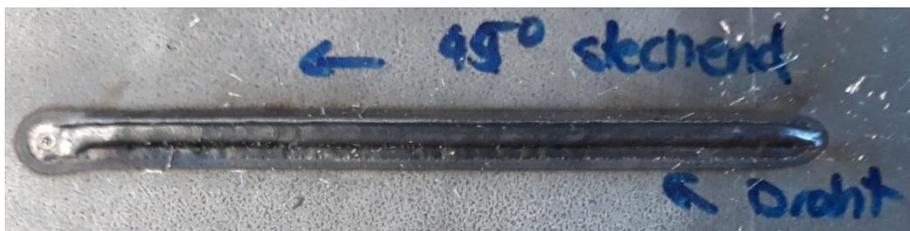


Abbildung 88 Raupe mit $\beta = 135^\circ$ (seitlich-stechend)



Abbildung 89 Raupe mit $\beta = 180^\circ$ (stechend)

9.1.2 Versuchsreihe „h“



Abbildung 90 Raupen mit $h = 0,1 \text{ mm}$

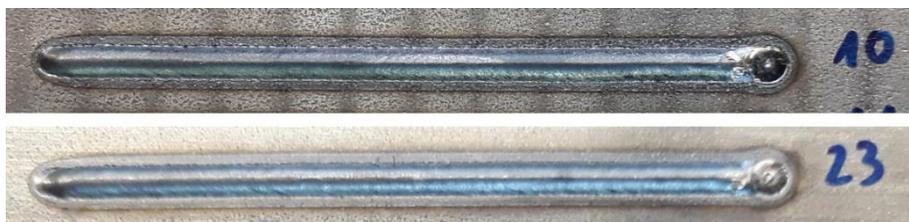


Abbildung 91 Raupen mit $h = 0,3 \text{ mm}$

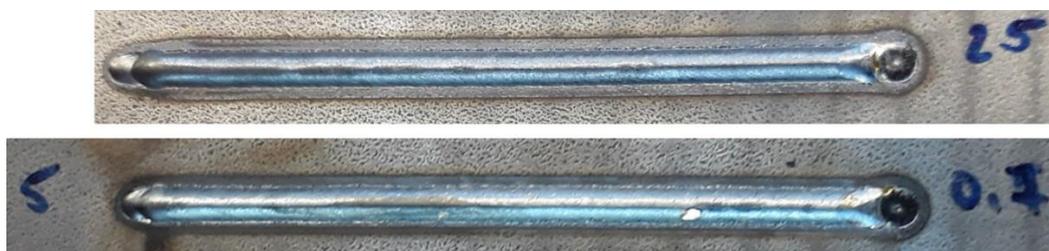


Abbildung 92 Raupen mit $h = 0,7 \text{ mm}$

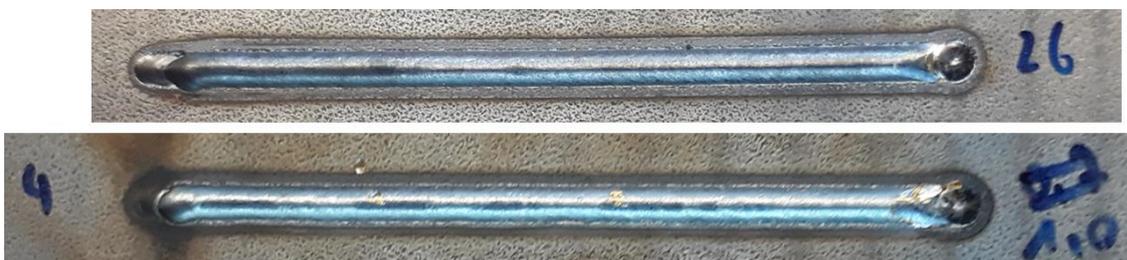


Abbildung 93 Raupen mit $h = 1 \text{ mm}$

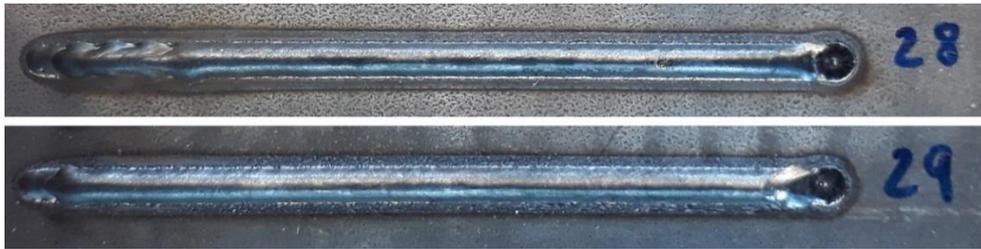


Abbildung 94 Raupen mit $h = 1,5 \text{ mm}$

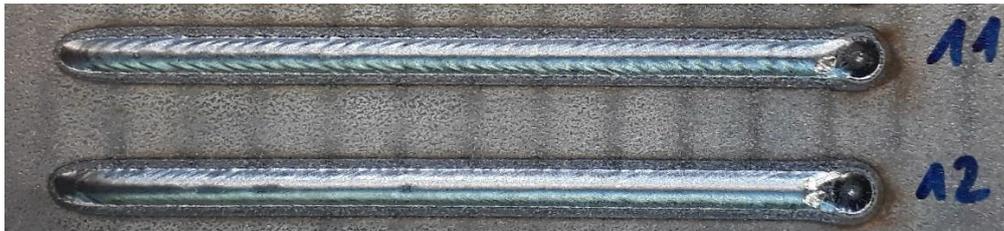


Abbildung 95 Raupen mit $h = -0,2 \text{ mm}$

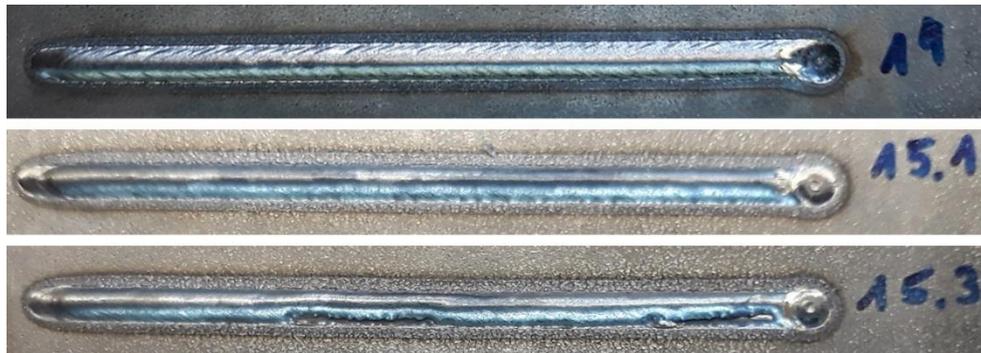


Abbildung 96 Raupen mit $h = 0 \text{ mm}$

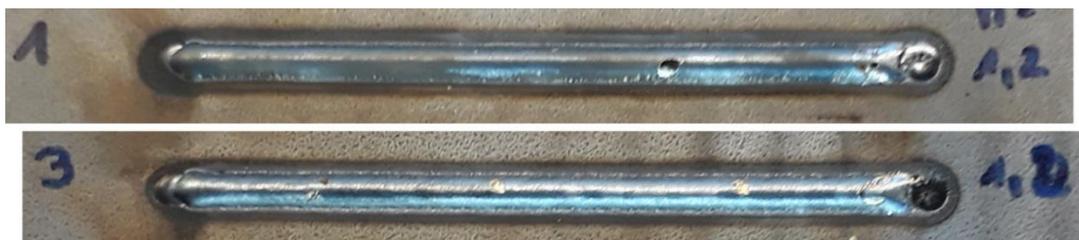


Abbildung 97 Raupen mit $h = 1,2 \text{ mm}$



Abbildung 98 Raupe mit $h = 1,4 \text{ mm}$

9.1.3 Versuchsreihe „I“

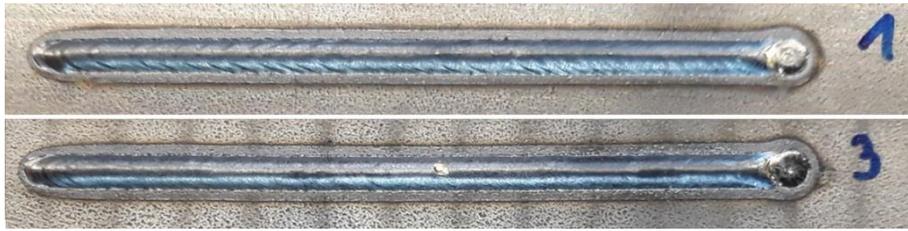


Abbildung 99 Raupen mit $l = 5$ mm (Referenz, Set I0)

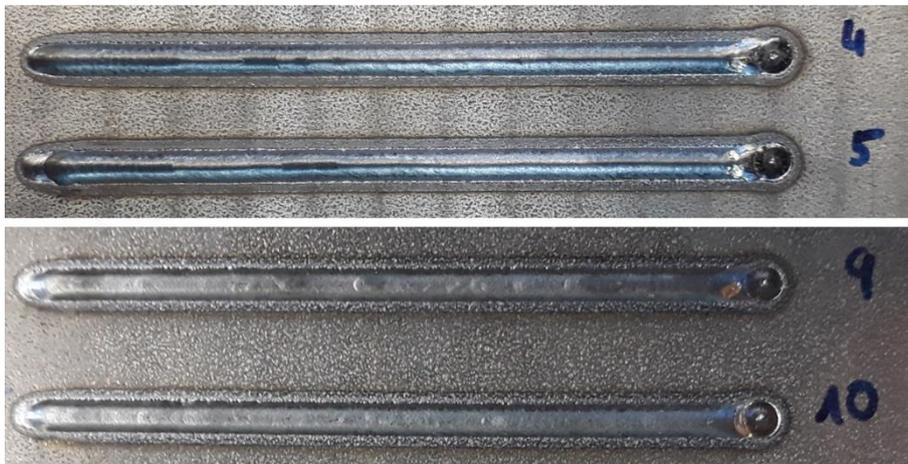


Abbildung 100 Raupen mit $l = 7,5$ mm (Set I1)



Abbildung 101 Raupen mit $l = 10$ mm (Set I2)



Abbildung 102 Raupen mit $l = 12,5$ mm (Set I3)

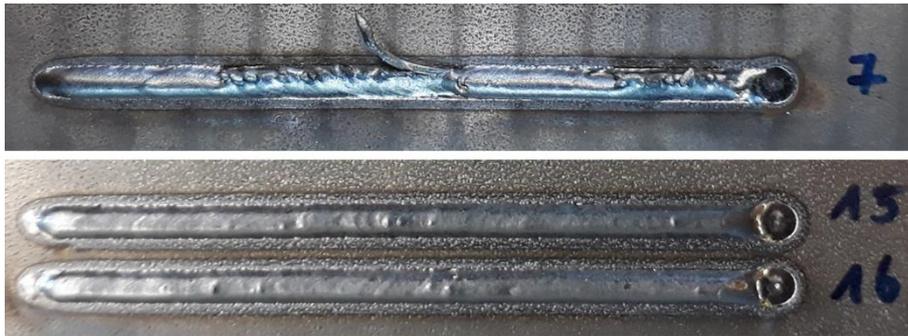


Abbildung 103 Raupen mit $l = 15 \text{ mm}$ (Set I4)



Abbildung 104 Raupen mit $l = 12,5 \text{ mm}$ und $h = 0,7 \text{ mm}$ (Set I5)



Abbildung 105 Raupen mit $l = 12,5 \text{ mm}$ und $h = 1 \text{ mm}$ (Set I6)

9.1.4 Versuchsreihe „ab“

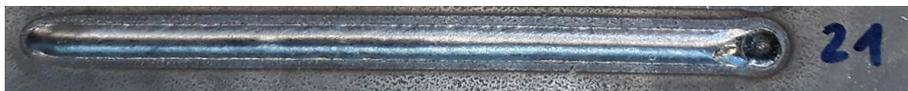


Abbildung 106 Raupe mit $a = 1$ und $b = 0,5 \text{ mm}$ (Set ab0; Referenz)



Abbildung 107 Raupe mit $a = 1$ und $b = 0,53 \text{ mm}$ (Set ab1)



Abbildung 108 Raupe mit $a = 1$ und $b = 0,61 \text{ mm}$ (Set ab2)

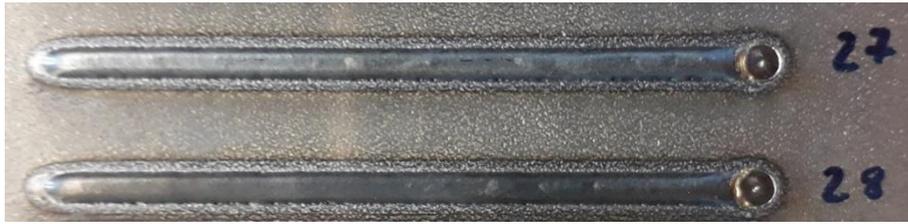


Abbildung 109 Raupen mit $a = 1$ und $b = 0,65$ mm (Set ab3)

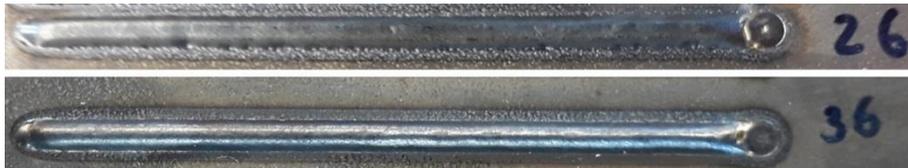


Abbildung 110 Raupen mit $a = 1$ und $b = 0,69$ mm (Set ab4)

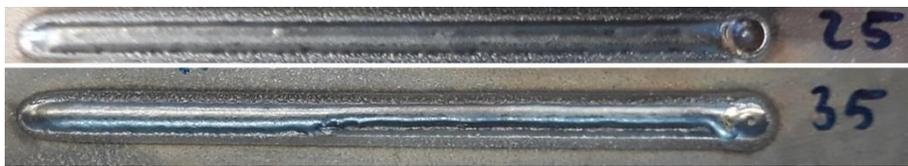


Abbildung 111 Raupen mit $a = 1$ und $b = 0,73$ mm (Set ab5)



Abbildung 112 Raupen mit $a = 1$ und $b = 0,76$ mm (Set ab6)



Abbildung 113 Raupe mit $a = 2$ und $b = 0,8$ mm (Set ab11)



Abbildung 114 Raupe mit $a = 2$ und $b = 0,76$ mm (Set ab10)



Abbildung 115 Raupe mit $a = 2$ und $b = 0,73$ mm (Set ab9)

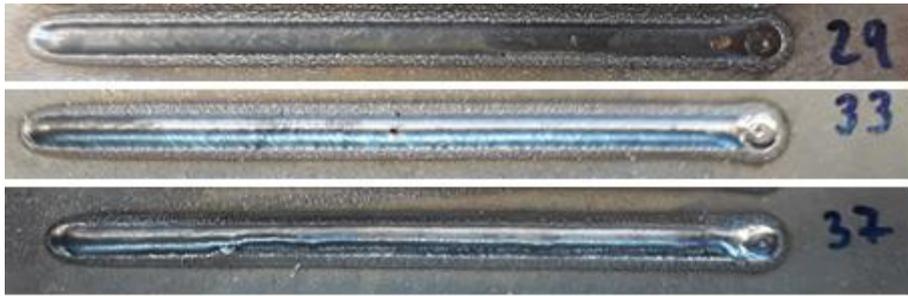


Abbildung 116 Raupe mit $a = 2$ und $b = 0,69$ mm (Set ab8)



Abbildung 117 Raupe mit $a = 2$ und $b = 0,65$ mm (Set ab7)

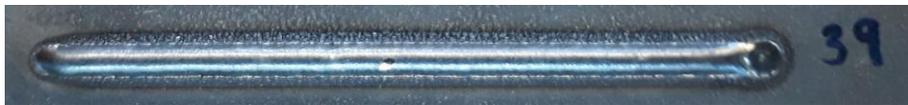


Abbildung 118 Raupe mit $a = 3$ und $b = 0,65$ mm (Set ab12)



Abbildung 119 Raupe mit $a = 3$ und $b = 0,69$ mm (Set ab13)



Abbildung 120 Raupe mit $a = 3$, $b = 0,65$ mm und $h = 1$ mm (Set ab14)



Abbildung 121 Raupe mit $a = 2$, $b = 0,65$ mm und $h = 1$ mm (Set ab15)



Abbildung 122 Raupe mit $a = 1$, $b = 0,65$ mm und $h = 1$ mm (Set ab16)



Abbildung 123 Raupe mit $a = 1$, $b = 0,65$ mm und $h = 0,7$ mm (Set ab17)



Abbildung 124 Raupe mit $a = 3$, $b = 0,65$ mm, $h = 0,7$ mm und $l = 12,5$ mm (Set ab18)

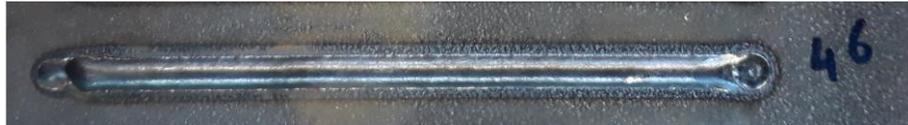


Abbildung 125 Raupe mit $a = 2$, $b = 0,65$ mm, $h = 0,7$ mm und $l = 12,5$ mm (Set ab19)



Abbildung 126 Raupe mit $a = 1$, $b = 0,65$ mm, $h = 0,7$ mm und $l = 12,5$ mm (Set ab20)



Abbildung 127 Raupen mit $a = 1$, $b = 0,65$ mm, $h = 0,7$ mm und $l = 10$ mm (Set ab21)



Abbildung 128 Raupe mit $a = 1$, $b = 0,65$ mm, $h = 0,5$ mm und $l = 10$ mm (Set ab22)



Abbildung 129 Raupe mit $a = 1$, $b = 0,65$ mm, $h = 0,5$ mm und $l = 12,5$ mm (Set ab23)



Abbildung 130 Raupe mit $a = 3$, $b = 0,65$ mm, $h = 0,5$ mm und $l = 12,5$ mm (Set ab24)

9.2 Beschichtungen

9.2.1 Versuchsreihe „V“

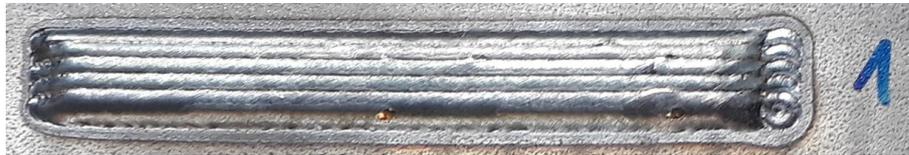


Abbildung 131 Beschichtung mit $\Delta x = 1,5 \text{ mm}$ und $h = 0,5 \text{ mm}$ (Set V1)



Abbildung 132 Beschichtung mit $\Delta x = 1,6 \text{ mm}$ und $h = 0,5 \text{ mm}$ (Set V2)



Abbildung 133 Beschichtung mit $\Delta x = 1,7 \text{ mm}$ und $h = 0,5 \text{ mm}$ (Set V3)



Abbildung 134 Beschichtung mit $\Delta x = 1,8 \text{ mm}$ und $h = 0,5 \text{ mm}$ (Set V4)



Abbildung 135 Beschichtung mit $\Delta x = 1,4 \text{ mm}$ und $h = 0,5 \text{ mm}$ (Set V5)



Abbildung 136 Beschichtung mit $\Delta x = 1,4 \text{ mm}$ und $h = 1 \text{ mm}$ (Set V6)

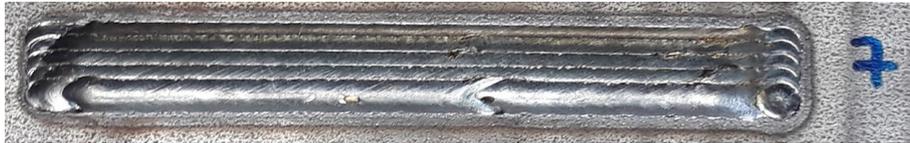


Abbildung 137 Beschichtung mit $\Delta x = 1,3 \text{ mm}$ und $h = 1 \text{ mm}$ (Set V7)



Abbildung 138 Beschichtung mit $\Delta x = 1,9 \text{ mm}$ und $h = 0,5 \text{ mm}$ (Set V8)



Abbildung 139 Beschichtung mit $\Delta x = 2 \text{ mm}$ und $h = 0,5 \text{ mm}$ (Set V9)



Abbildung 140 Beschichtungen ($n=5$) mit $\Delta x = 1,5 \text{ mm}$ und $h = 0,1 \text{ mm}$

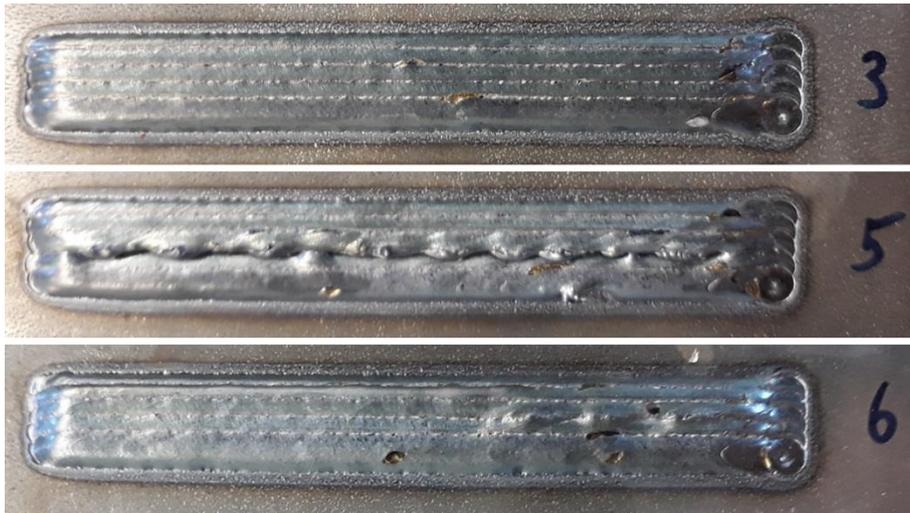


Abbildung 141 Beschichtungen ($n=5$) mit $\Delta x = 1,4 \text{ mm}$ und $h = 0,1 \text{ mm}$



Abbildung 142 Beschichtung ($n=10$) mit $\Delta x = 1,6 \text{ mm}$ und $h = 0,1 \text{ mm}$



Abbildung 143 Beschichtung ($n=10$) mit $\Delta x = 1,7 \text{ mm}$ und $h = 0,1 \text{ mm}$

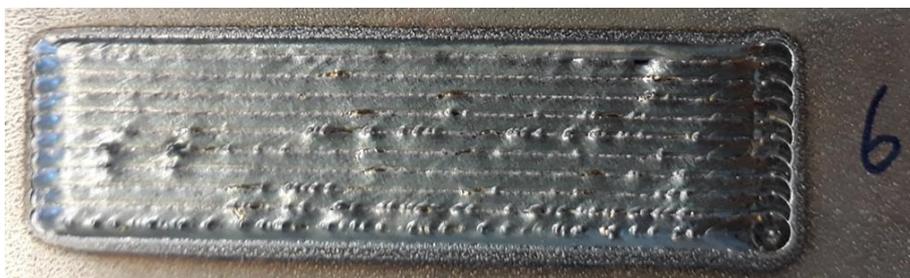


Abbildung 144 Beschichtung ($n=10$) mit $\Delta x = 1,8 \text{ mm}$ und $h = 0,1 \text{ mm}$



Abbildung 145 Beschichtung ($n=10$) mit $\Delta x = 1,9 \text{ mm}$ und $h = 0,1 \text{ mm}$



Abbildung 146 Beschichtungen ($n=10$) mit $\Delta x = 2 \text{ mm}$ und $h = 0,1 \text{ mm}$

9.2.2 Versuchsreihe „S“

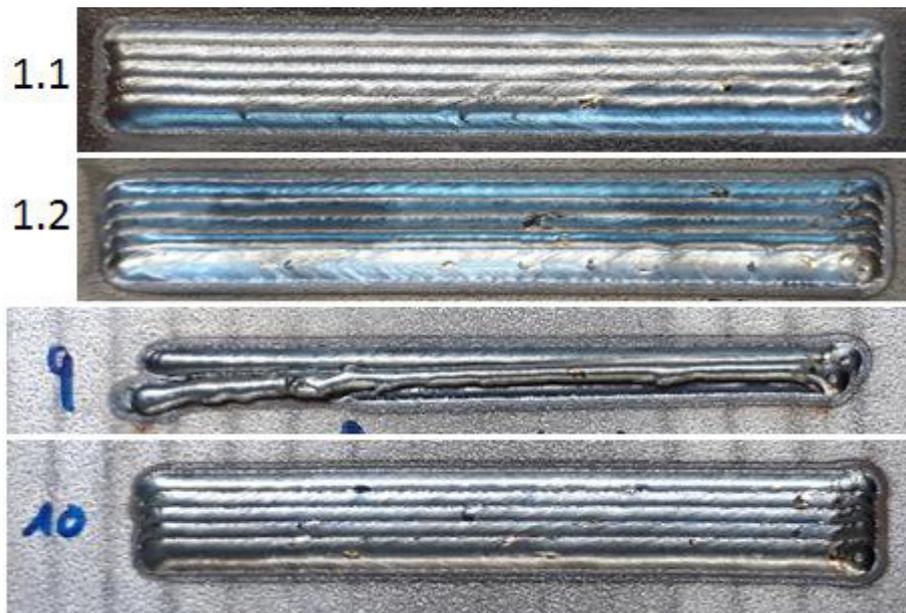


Abbildung 147 Beschichtungen mit Set S0 zur Überprüfung der Anlagenfunktionalität

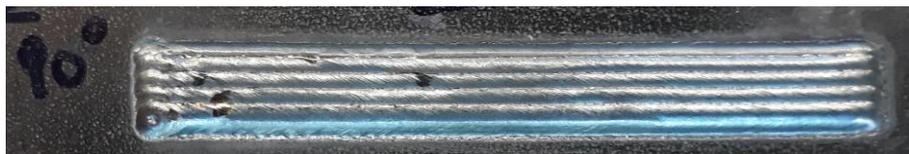


Abbildung 148 Beschichtung mit $\alpha = 90^\circ$ (Set S1)



Abbildung 149 Beschichtung mit $h = 0,7 \text{ mm}$ (Set S2)



Abbildung 150 Beschichtung mit $l = 12,5 \text{ mm}$ (Set S3)

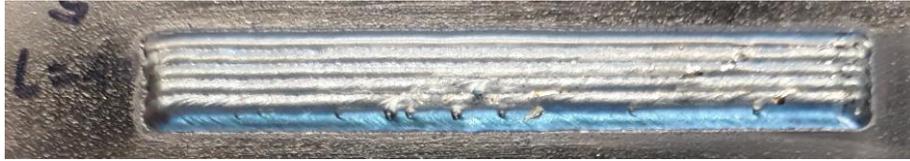


Abbildung 151 Beschichtung mit $l = 10 \text{ mm}$ (Set S4)



Abbildung 152 Beschichtung mit $b = 0,7 \text{ mm}$ (Set S5)

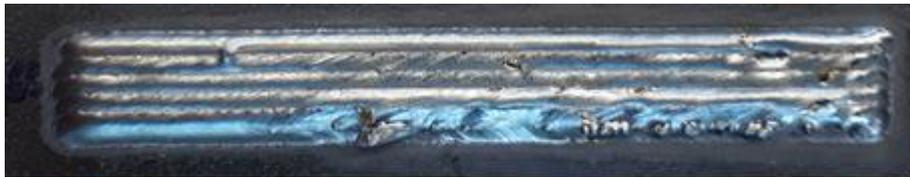


Abbildung 153 Beschichtungen mit $b = 0,66 \text{ mm}$ (Set S6)

9.3 Wände

9.3.1 Wand 1



Abbildung 154 Wand 1 nach dem Schweißen von Lage 3



Abbildung 155 Wand 1 nach dem Schweißen von Lage 4

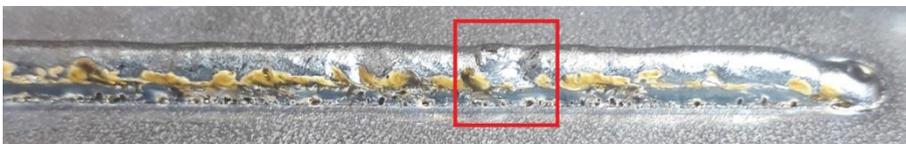


Abbildung 156 Detailaufnahme von Wand 1 nach dem Schweißen von Lage 5



Abbildung 157 Wand 1 nach dem Schweißen von Lage 6



Abbildung 158 Wand 1 nach dem Schweißen von Lage 7

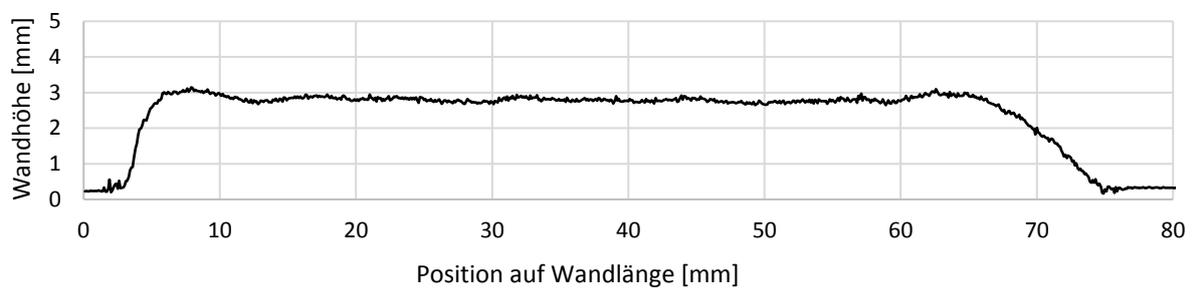


Abbildung 159 Höhenprofil von Wand 1 bei 4 Lagen

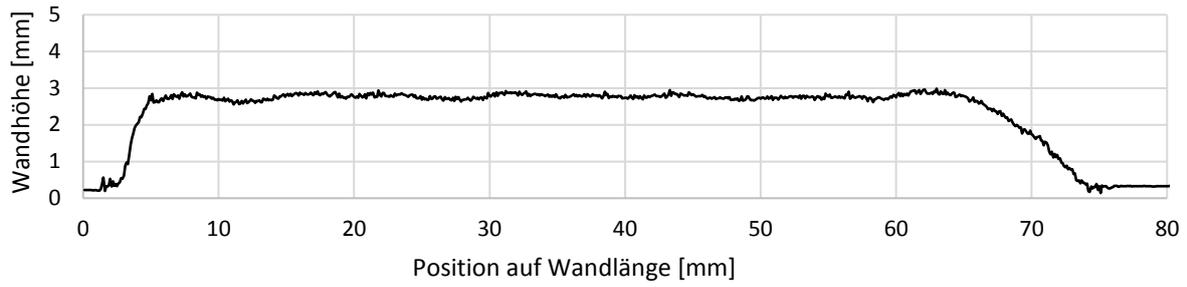


Abbildung 160 Höhenprofil von Wand 1 bei 4 Lagen nach dem Ebnen

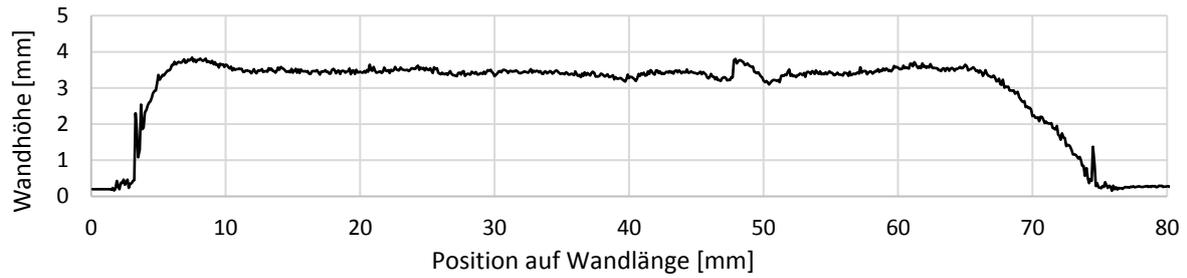


Abbildung 161 Höhenprofil von Wand 1 bei 5 Lagen

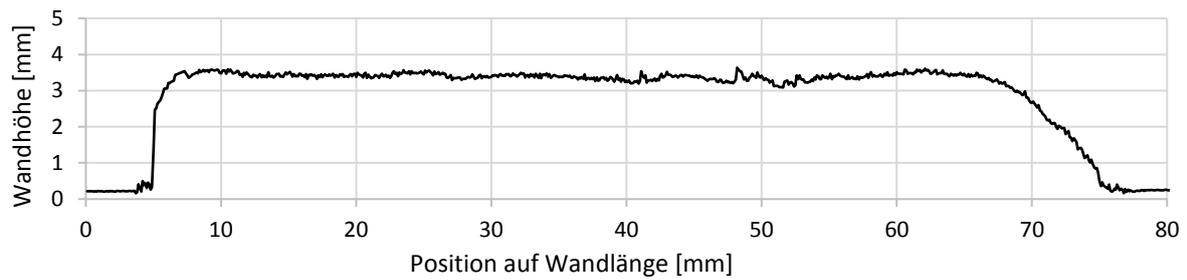


Abbildung 162 Höhenprofil von Wand 1 bei 5 Lagen nach dem Ebnen

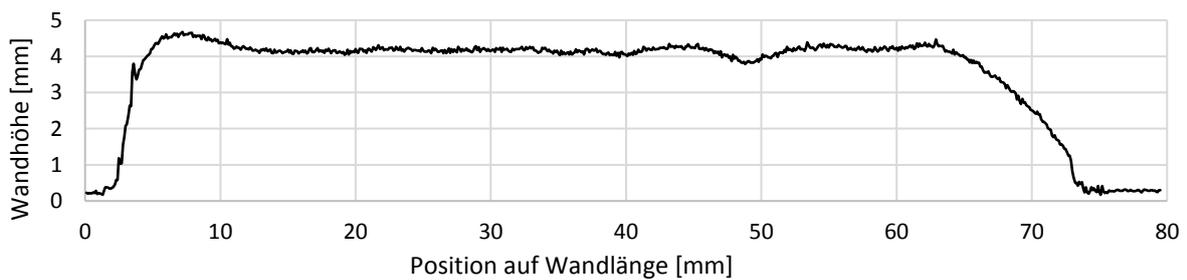


Abbildung 163 Höhenprofil von Wand 1 bei 6 Lagen

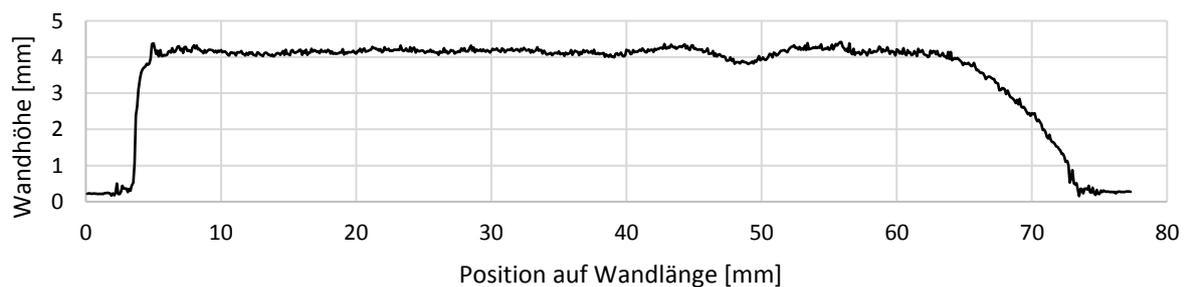


Abbildung 164 Höhenprofil von Wand 1 bei 6 Lagen nach dem Ebnen

9.3.2 Wand 2



Abbildung 165 Wand 2 nach dem Schweißen von Lage 2



Abbildung 166 Wand 2 nach dem Schweißen von Lage 3



Abbildung 167 Wand 2 nach dem Schweißen von Lage 5



Abbildung 168 Wand 2 nach dem Schweißen von Lage 7 von der Seite und von oben



Abbildung 169 Wand 2 nach dem Schweißen von Lage 9



Abbildung 170 Wand 2 nach dem Schweißen von Lage 10

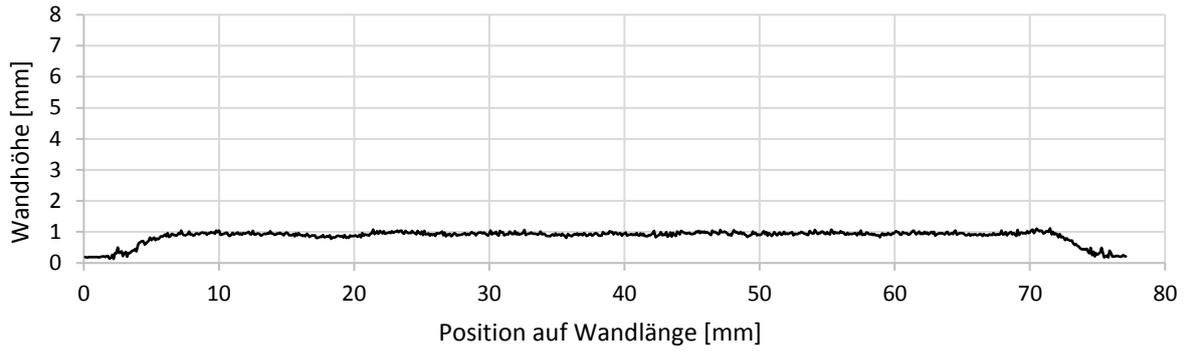


Abbildung 171 Höhenprofil von Wand 2 nach dem Schweißen von Lage 1

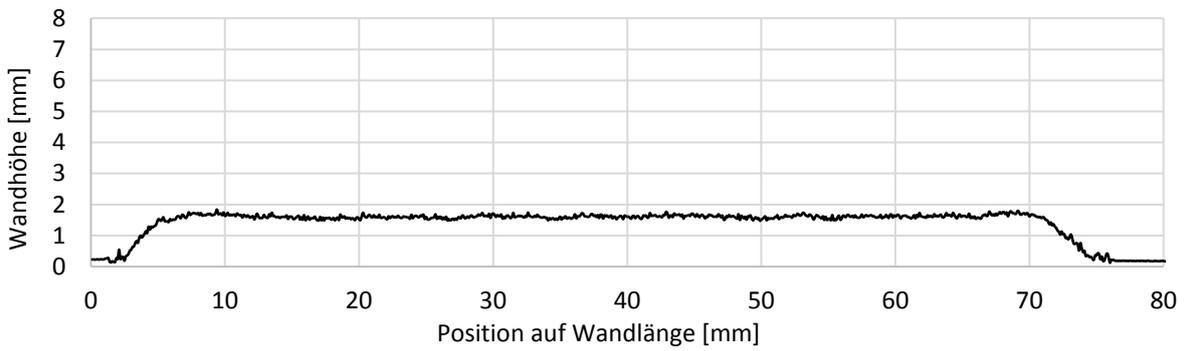


Abbildung 172 Höhenprofil von Wand 2 nach dem Schweißen von Lage 2

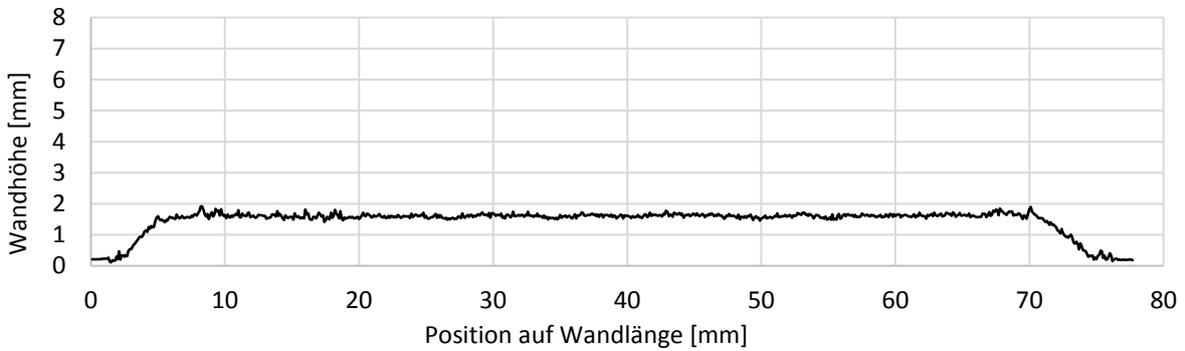


Abbildung 173 Höhenprofil von Wand 2 mit zwei Lagen nach dem Ebnen

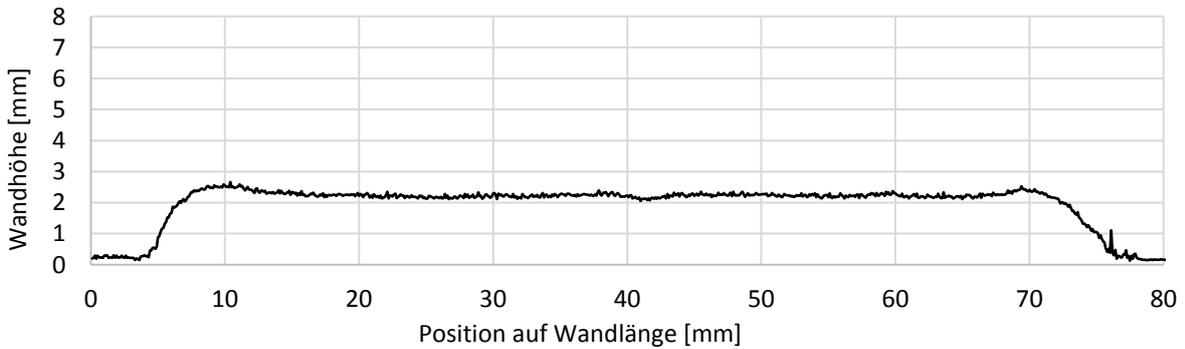


Abbildung 174 Höhenprofil von Wand 2 nach dem Schweißen von Lage 3

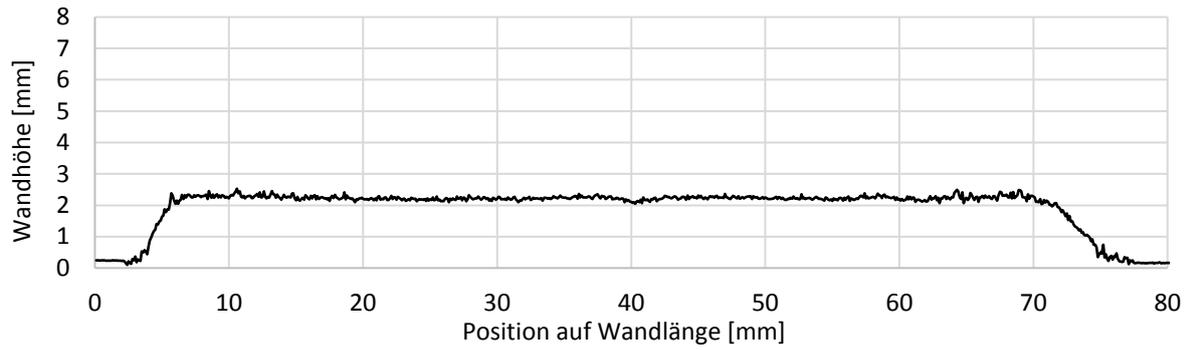


Abbildung 175 Höhenprofil von Wand 2 mit drei Lagen nach dem Ebenen

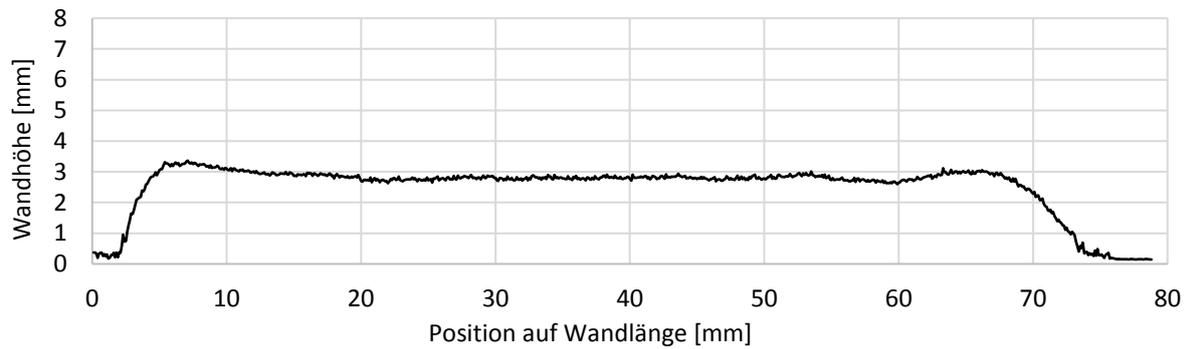


Abbildung 176 Höhenprofil von Wand 2 nach dem Schweißen von Lage 4

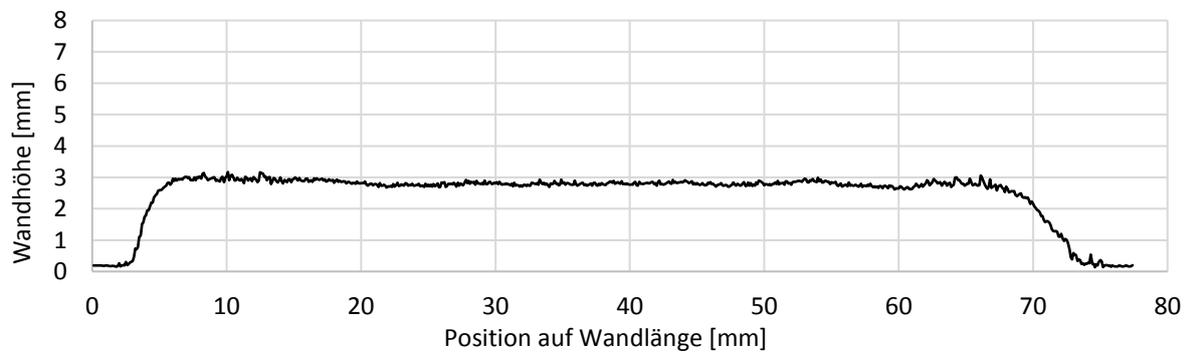


Abbildung 177 Höhenprofil von Wand 2 mit vier Lagen nach dem Ebenen

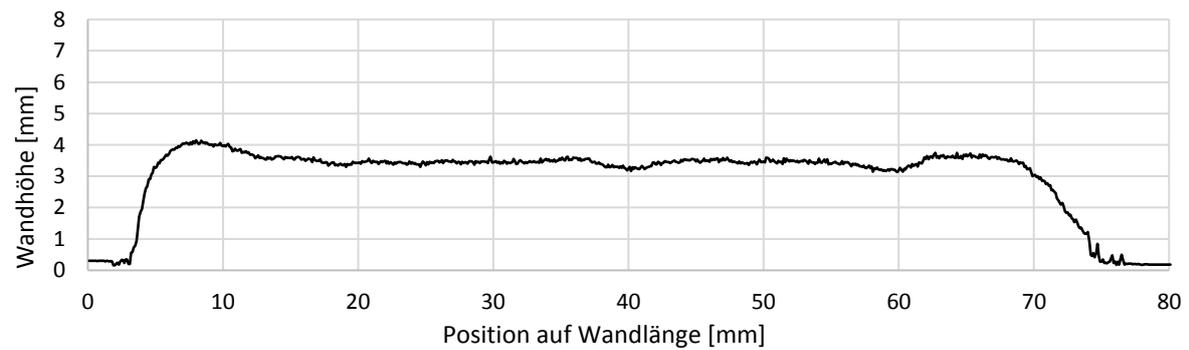


Abbildung 178 Höhenprofil von Wand 2 nach dem Schweißen von Lage 5

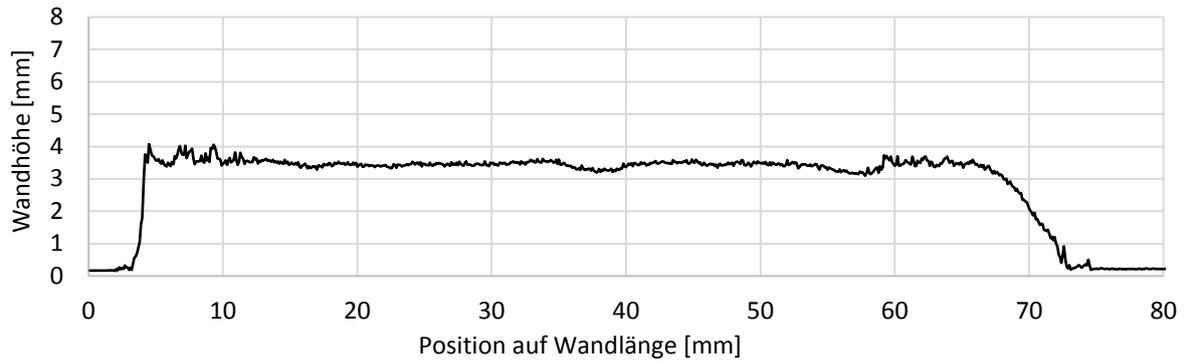


Abbildung 179 Höhenprofil von Wand 2 mit fünf Lagen nach dem Ebnen

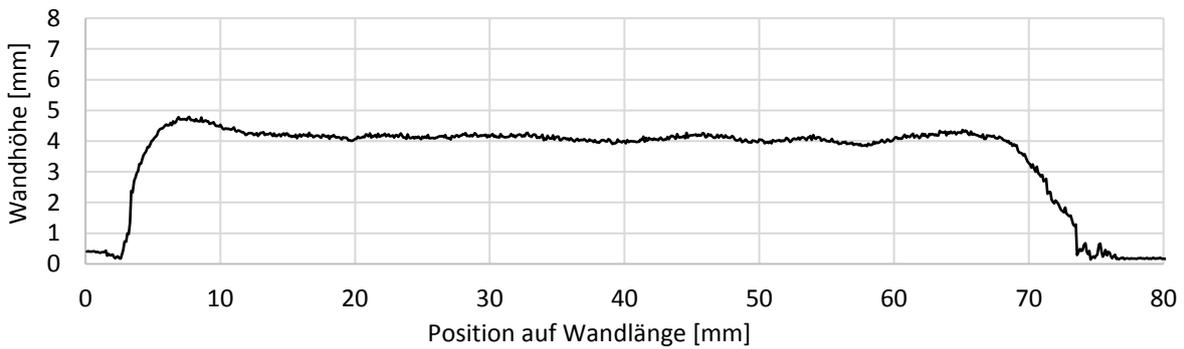


Abbildung 180 Höhenprofil von Wand 2 nach dem Schweißen von Lage 6

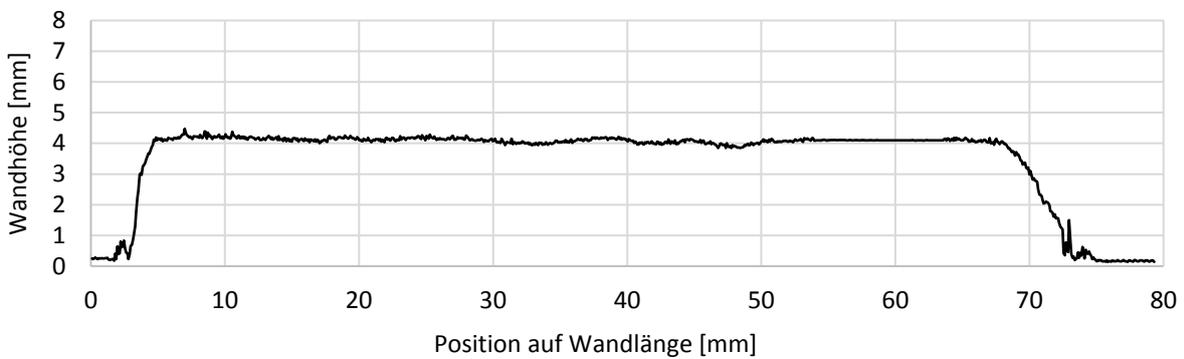


Abbildung 181 Höhenprofil von Wand 2 mit sechs Lagen nach dem Ebnen

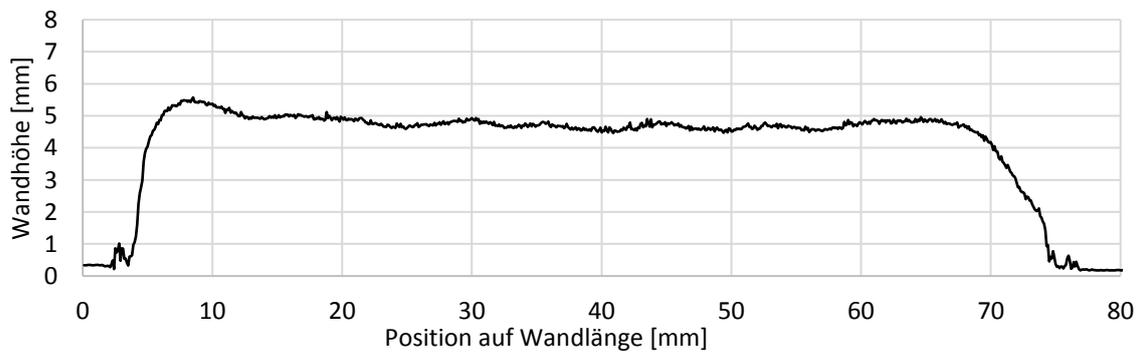


Abbildung 182 Höhenprofil von Wand 2 nach dem Schweißen von Lage 7

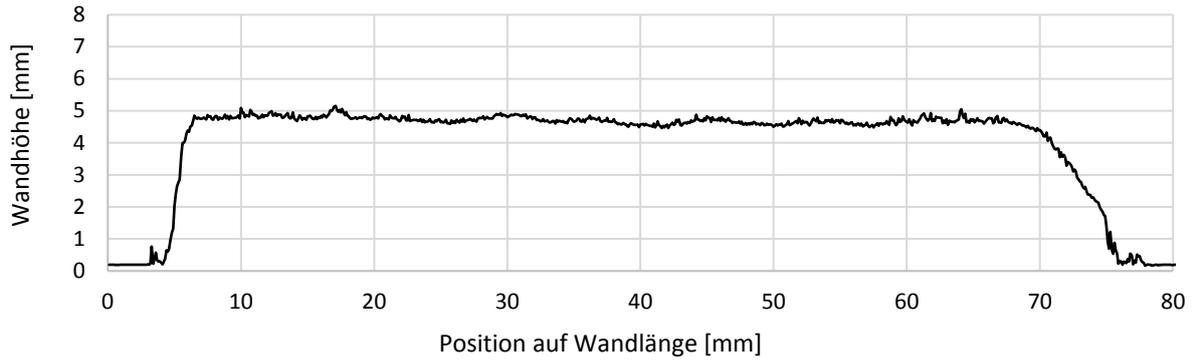


Abbildung 183 Höhenprofil von Wand 2 mit sieben Lagen nach dem Ebenen

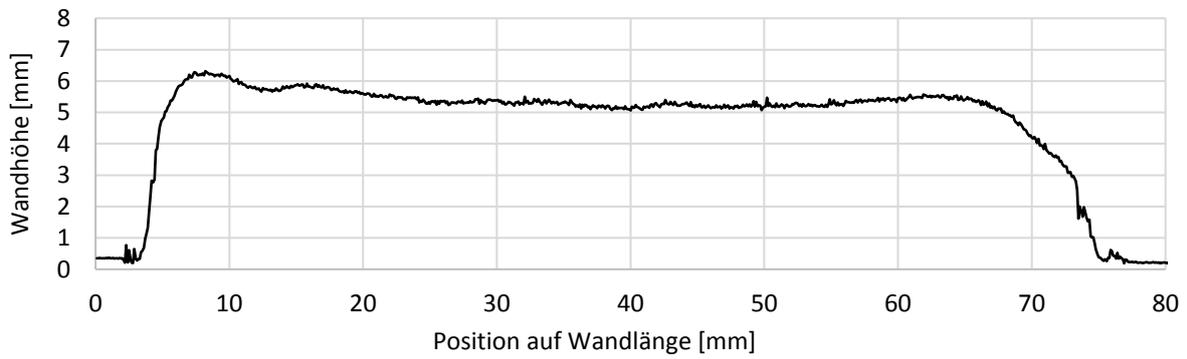


Abbildung 184 Höhenprofil von Wand 2 nach dem Schweißen von Lage 8

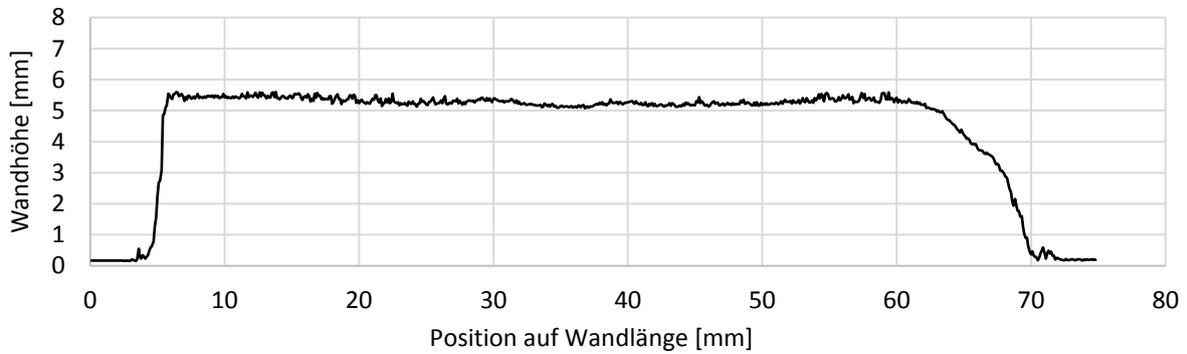


Abbildung 185 Höhenprofil von Wand 2 mit acht Lagen nach dem Ebenen

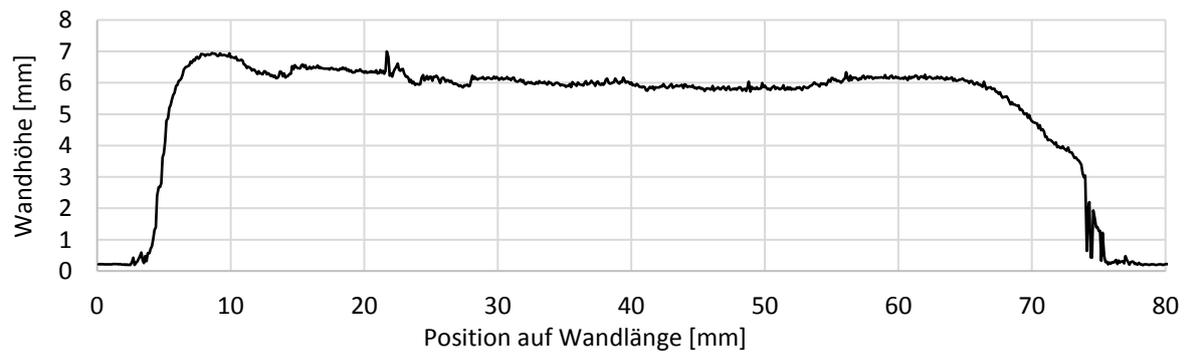


Abbildung 186 Höhenprofil von Wand 2 nach dem Schweißen von Lage 9

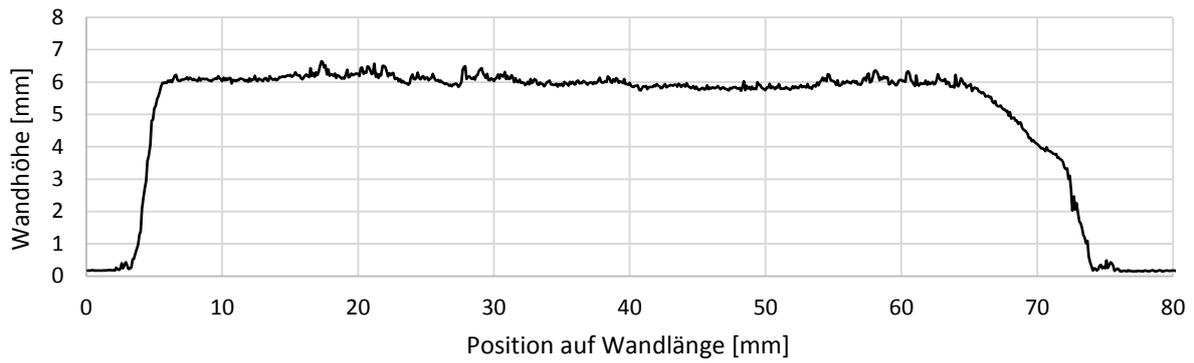


Abbildung 187 Höhenprofil von Wand 2 mit neun Lagen nach dem Ebnen

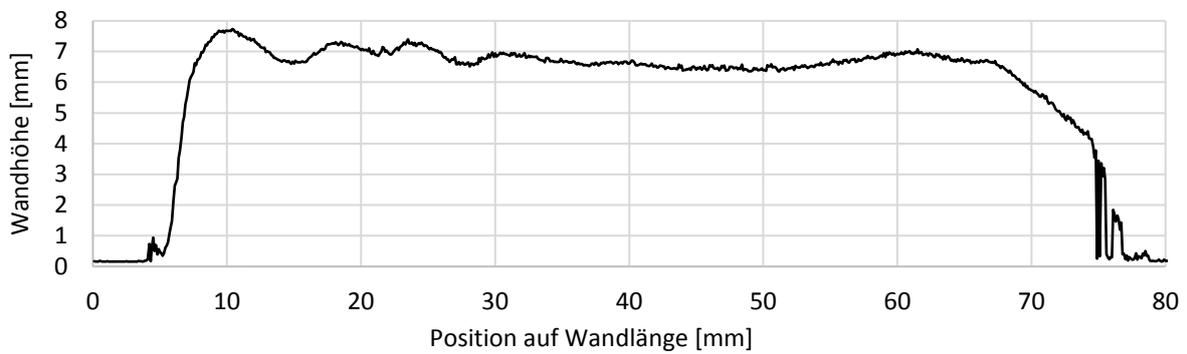


Abbildung 188 Höhenprofil von Wand 2 nach dem Schweißen von Lage 10

9.3.3 Prozesssicherheit der lagenspezifischen Leistung

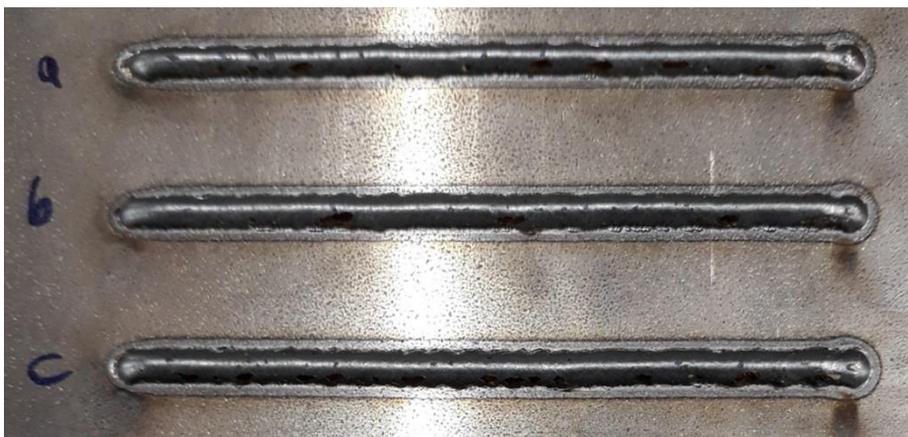


Abbildung 189 In Serie geschweißte Wände nach Lage 3, Draufsicht



Abbildung 190 In Serie geschweißte Wände nach Lage 3, Seitenansicht



Abbildung 191 In Serie geschweißte Wände nach Lage 4, Draufsicht



Abbildung 192 In Serie geschweißte Wände nach Lage 4, Seitenansicht

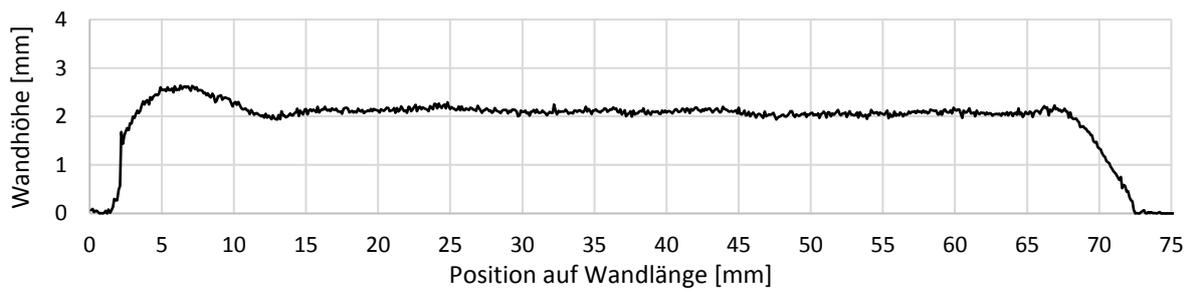


Abbildung 193 Höhenprofil von Wand a nach Lage 3

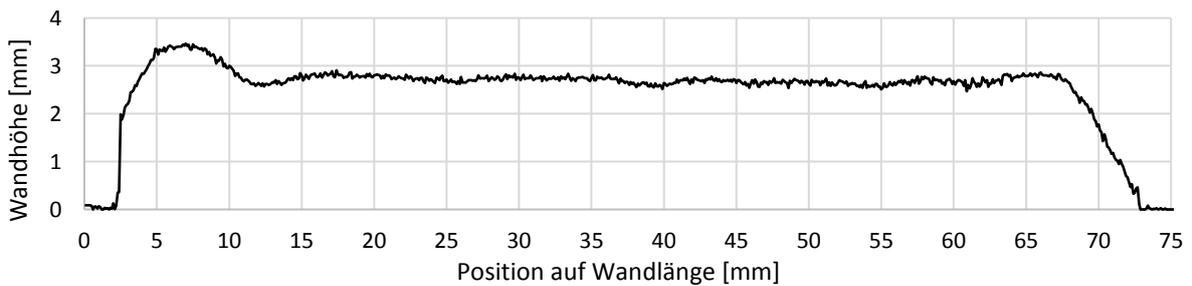


Abbildung 194 Höhenprofil von Wand a nach Lage 4



Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: _____

Vorname: _____

dass ich die vorliegende -bitte auswählen- bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

_____ Ort

_____ Datum

_____ Unterschrift im Original