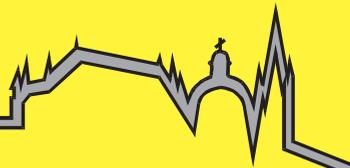


**Oliver Engels**

---

**Laserstrahl-Unterpulver-  
Hybridschweißen**



Aachener Berichte Fügetechnik  
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. U. Reisgen

Band 4/2020

Shaker Verlag

**„Laserstrahl-Unterpulver-Hybridschweißen“**

**„Laser Beam Submerged Arc Hybrid Welding“**

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen  
Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der  
Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Oliver Engels

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisgen  
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Reinhart Poprawe

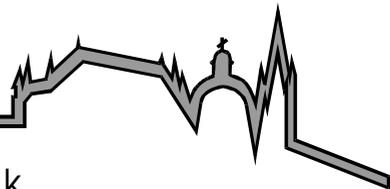
Tag der mündlichen Prüfung: 23.09.2020



**Oliver Engels**

---

**Laserstrahl-Unterpulver-  
Hybridschweißen**



Aachener Berichte Fügetechnik  
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. U. Reisgen

Band 4/2020

Shaker Verlag

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2020)

Copyright Shaker Verlag 2020

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7708-7

ISSN 0943-9358

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

Vorab möchte ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Institutes für die hervorragende und kollegiale Arbeitsatmosphäre bedanken! Mein besonderer Dank gilt dabei dem Institutsleiter Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisgen für die große Unterstützung bei der Verwirklichung meines Promotionsvorhabens. Mir wurde stets der notwendige Freiraum eingeräumt, um mich in einer spannenden und lehrreichen Arbeitsumgebung entwickeln zu können und relevante wissenschaftliche Beiträge leisten zu dürfen.

Herzlich bedanken möchte ich mich bei meinen Arbeitskollegen der Abteilung Strahlschweißen, namentlich Dr.-Ing. Simon Olschok, Fatma Akyel, Niklas Holtum, Michael Clemens, Stefan Gach, Aleksej Senger, Thomas Krichel und Timm Evers sowie meinen ehemaligen Kollegen Dr.-Ing. Stefan Jakobs, Dr.-Ing. Christoph Turner und Dr.-Ing. Benjamin Gerhards. Die täglichen Diskussionen, sowohl fachlicher als auch persönlicher Natur, haben mir den Arbeitsalltag enorm erleichtert und wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Das allgemein freundschaftliche Arbeitsklima lässt sich vermutlich als „einmalig“ beschreiben.

Ein weiterer großer Dank geht an meine nichtwissenschaftlichen Kollegen aus der mechanischen und elektrischen Werkstatt sowie aus der Metallografie und Chemie, für die konstruktiven Diskussionen und die oft unbürokratisch verkürzte Bearbeitungszeit meiner Aufträge.

Meinen größten Dank richte ich jedoch an meine Familie. Ohne die uneingeschränkte finanzielle und fürsorgliche Unterstützung meiner Eltern Horst und Ursula Engels sowie meiner Schwester Christin Engels, wäre mir das Studium bis hin zur Promotion ungleich schwerer gefallen. Ebenso danken möchte ich meiner Freundin Fiona Ihlow, welche mir meinen Alltag, insbesondere in den stressigen Phasen der Anfertigung dieser Dissertation, enorm erleichtert und mir stets liebevoll den Rücken freigehalten hat. Vielen Dank an euch!

Oliver Engels

Aachen, im Oktober 2020



# I Inhaltsverzeichnis

I	Inhaltsverzeichnis.....	I
II	Abbildungsverzeichnis .....	IV
III	Tabellenverzeichnis .....	IX
IV	Abkürzungen und Formelzeichen.....	X
V	Vorveröffentlichungen .....	XIII
VI	Zusammenfassung.....	XIV
VII	Abstract.....	XV
1	Einleitung .....	1
2	Stand der Technik .....	3
2.1	Laserschweißverfahren .....	3
2.1.1	Laserschweißverfahren .....	3
2.1.2	Bauweisen.....	4
2.1.3	Wärmeleitungsschweißen und Tiefschweißen .....	5
2.1.4	Typische Schweißnahtfehler .....	7
2.1.5	Anwendungsgebiet.....	7
2.2	Lichtbogenschweißen.....	8
2.2.1	Metallschutzgasschweißen .....	9
2.2.2	Unterpulverschweißen .....	11
2.3	Laserschweiß-Lichtbogen-Hybridverfahren .....	12
2.3.1	Verfahrensprinzip .....	14
2.3.2	Entwicklungsgeschichte .....	15
2.3.3	Schweißnahtgeometrie .....	17
2.3.4	Prozessabstand .....	18
2.3.5	Typische Schweißnahtfehler .....	19
2.3.6	Fügespalte .....	23

---

2.3.7	Schutzgase .....	24
2.3.8	Maximale Blechdicken .....	24
2.3.9	Verfahrensvarianten.....	25
2.3.10	Industrielle Anwendung.....	26
2.4	Laserstrahl-Unterpulver-Hybridschweißen .....	27
3	Problemstellung, Forschungsziel und Lösungsansatz .....	32
3.1	Problemstellung.....	32
3.2	Forschungsziel .....	33
3.3	Lösungsweg .....	34
4	Eingesetzte Grundwerkstoffe und Schweißnahtvorbereitung.....	36
5	Anlagenaufbau .....	38
5.1	Bisheriger Hybridschweißkopf.....	38
5.2	Weiterentwicklung Hybridschweißkopf.....	39
5.3	Weitere Systemkomponenten .....	41
5.4	Prozesszone .....	42
6	Validierung von Einflussgrößen auf die Prozessstabilität.....	45
6.1	Prozessgaszuführung.....	46
6.2	Trennblech .....	48
6.3	Geometrisches Setup.....	52
6.3.1	Anstellwinkel Drahtelektrode 20° und Laserstrahl 0°.....	53
6.3.2	Anstellwinkel Drahtelektrode 5° und Laserstrahl 0° .....	57
6.3.3	Anstellwinkel Drahtelektrode 5° und Laserstrahl 15°.....	59
6.4	Zwischenfazit .....	67
7	Erweiterung des Prozessverständnisses .....	69
7.1	Erstellen der Versuchsmatrix .....	69
7.2	Versuchsergebnisse.....	71
7.3	Grafische Aufbereitung der Versuchsergebnisse .....	80

7.4	Zwischenfazit .....	83
8	Ermittlung der Schmelzbadgeometrie .....	85
8.1	Versuchsaufbau .....	86
8.2	Versuchsdurchführung und Diskussion .....	87
8.3	Zwischenfazit .....	91
9	Vergleich der Einzel-Prozesse und des Hybridschweißprozesses .....	95
9.1	Versuchsdurchführung .....	95
9.2	Zwischenfazit .....	97
10	Ermittlung des Prozessverhaltens bei Fügespalten .....	99
10.1	Fügespaltweite 1 mm .....	99
10.2	Fügespaltweite 2 mm .....	102
10.3	Fügespaltweite 3 mm .....	103
10.4	Zwischenfazit .....	104
11	Untersuchung mechanisch-technologischer Eigenschaften .....	105
11.1	Versuchsdurchführung .....	105
11.2	Zwischenfazit .....	111
12	Übertragung auf den Werkstoff 1.4301 .....	113
12.1	Versuchsdurchführung .....	113
12.2	Zwischenfazit .....	117
13	Wirtschaftlicher Vergleich .....	119
14	Zusammenfassung und Ausblick .....	127
15	Anhang .....	133
16	Literaturverzeichnis .....	134

## II Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Wärmeleitungs- und Tiefschweißen nach (19).....	6
Abbildung 2.2:	Metallschutzgasschweißverfahren nach (19).....	9
Abbildung 2.3:	Brennerstellung MSG-Schweißen nach (19).....	10
Abbildung 2.4:	Unterpulver Schweißverfahren nach (19).....	11
Abbildung 2.5:	Definition seriell und hybrid nach (45).....	13
Abbildung 2.6:	Laserstrahl-Lichtbogen-Hybridschweißprozess nach (19) .....	14
Abbildung 2.7:	Schweißnahtgeometrie LB-MSG-Hybridschweißen nach (60).....	15
Abbildung 2.8:	Schweißnahtgeometrien für verschiedene Schweißprozesse nach (61) .....	15
Abbildung 2.9:	Schweißnahtgeometrie verschiedener Energieverhältnisse nach (60) .....	17
Abbildung 2.10:	Einfluss des Prozessabstandes nach (49).....	19
Abbildung 2.11:	Niedrig schmelzende Phasen während der Erstarrung nach (81).... .....	20
Abbildung 2.12:	Axiale- und äquiaxiale-Erstarrung nach (81).....	21
Abbildung 2.13:	Entstehung von Poren nach (83) (92).....	23
Abbildung 2.14:	HyDRA-Schweißen nach (101).....	25
Abbildung 2.15:	LB-UP-Hybridschweißprozess nach (117).....	28
Abbildung 2.16:	Verschiedene Drahtelektroden Durchmesser nach (61) (120).....	29
Abbildung 2.17:	LB-UP-Hybrid Schweißnaht; Blechdicke 35mm (61).....	30
Abbildung 2.18:	LB-UP-Hybrid mit Festkörperlaser nach (123) und (124).....	31
Abbildung 4.1:	Schweißnahtvorbereitung .....	37
Abbildung 5.1:	Hybridschweißkopf im Jahre 2014 (124).....	38

Abbildung 5.2:	CAD-Model Hybridschweißkopf (links); Detail: Justageeinheit Laserstrahloptik (rechts).....	40
Abbildung 5.3:	Weiterentwickelter Hybridschweißkopf .....	41
Abbildung 5.4:	LB-UP-Hybridschweißprozess; Prozesszone.....	42
Abbildung 5.5:	Definition geometrischer Prozessparameter .....	43
Abbildung 5.6:	Definition von Schweißnahtgeometrieparametern .....	44
Abbildung 6.1:	Auswirkung verschiedener Gasdurchflussmengen .....	47
Abbildung 6.2:	Einfluss der Trennblechposition .....	49
Abbildung 6.3:	Einfluss der Trennblechposition, Längsschliffe .....	50
Abbildung 6.4:	Modifiziertes Trennblech .....	51
Abbildung 6.5:	Geometrische Anstell-Varianten .....	53
Abbildung 6.6:	Verschiedene Prozessabstände; $\alpha_1 = 20^\circ$ ; $\alpha_2 = 0^\circ$ .....	54
Abbildung 6.7:	Vorlaufendes Schmelzbad bei verschiedenen Prozessabständen... .....	56
Abbildung 6.8:	Verschiedene Prozessabstände; $\alpha_1 = 5^\circ$ ; $\alpha_2 = 0^\circ$ .....	57
Abbildung 6.9:	Lineare Defekte in der Mittelrippe .....	58
Abbildung 6.10:	Wachstumsrichtung der Dendriten.....	59
Abbildung 6.11:	Optische Unterscheidung hybride / nicht hybride Schweißnaht ...	60
Abbildung 6.12:	Schweißnahtoberraupe; Einlaufbereich .....	61
Abbildung 6.13:	Einlaufbereich; Längsschliff .....	62
Abbildung 6.14:	Verschiedene Prozessabstände; $\alpha_1 = 5^\circ$ ; $\alpha_2 = 15^\circ$ .....	63
Abbildung 6.15:	Durchmischung der Schweißnaht .....	64
Abbildung 6.16:	Lokal gesteigerte Einschweißtiefe.....	66
Abbildung 6.17:	Optische Vergrößerung des linearen Defektes .....	66

Abbildung 7.1:	Einschweißtiefe; $\alpha_2= 10^\circ$ ; $\alpha_2= 20^\circ$ .....	72
Abbildung 7.2:	Makroschliff; $\alpha_2= 10^\circ$ (links); $\alpha_2= 20^\circ$ (rechts) .....	73
Abbildung 7.3:	Makroschliff; $\alpha_2= 20^\circ$ ; $A_1= 0\text{mm}$ (links); $A_1= 1,5\text{mm}$ (rechts).....	74
Abbildung 7.4:	Verschiedene Prozessabstände; $\alpha_2= 15^\circ$ ; $A_1= 0\text{mm}$ ; $A_1= 1,5\text{mm}$ .... .....	75
Abbildung 7.5:	Verschiedene Prozessabstände; $\alpha_2= 15^\circ$ ; $A_1= 0\text{mm}$ .....	76
Abbildung 7.6:	Schweißnahtgeometrie-Parameter; $\alpha_2= 15^\circ$ ; $A_1= 0\text{mm}$ .....	77
Abbildung 7.7:	Verschiedene Prozessabstände; $\alpha_2= 15^\circ$ ; $A_1= 1,5\text{mm}$ .....	78
Abbildung 7.8:	Schweißnahtgeometrie-Parameter; $\alpha_2= 15^\circ$ ; $A_1= 1,5\text{mm}$ .....	79
Abbildung 7.9:	Diagramm Einschweißtiefe; $A_1= 0\text{mm}$ .....	80
Abbildung 7.10:	Diagramm UP-bedingte Eindringtiefe; $A_1= 0\text{mm}$ .....	81
Abbildung 7.11:	Diagramm Einschweißtiefe; $A_1= 1,5\text{mm}$ .....	82
Abbildung 7.12:	Diagramm UP-bedingte Eindringtiefe; $A_1= 1,5\text{mm}$ .....	83
Abbildung 8.1:	Versuchsaufbau zum Austreiben der Schmelze; Ansicht quer zur Schweißrichtung (links); Ansicht längs zur Schweißrichtung (rechts).....	86
Abbildung 8.2:	Ausgetriebenes Schmelzbad; Längsschliffe.....	88
Abbildung 8.3:	Schnittmodell entlang der Längsachse des flüssigen Schmelzbades .....	90
Abbildung 8.4:	Verschiedene Durchmischungszustände .....	92
Abbildung 9.1:	Laserstrahlschweißnähte .....	95
Abbildung 9.2:	UP-Schweißnähte .....	96
Abbildung 9.3:	Vergleich der Einzel-Prozesse mit Hybridschweißprozess; $A_1=$ $0\text{mm}$ .....	96
Abbildung 9.4:	Vergleich der Einzel-Prozesse mit Hybridschweißprozess; $A_1=$ $1,5\text{mm}$ .....	97

Abbildung 9.5: Vergleich der Einzel-Prozesse mit dem Hybridschweißprozess (121).....	98
Abbildung 10.1: Fügespaltweite 1mm; offen (links); verschlossen (rechts).....	100
Abbildung 10.2: Fügespaltweite 1mm; $v_s= 0,6$ m/min (links); $v_s= 0,4$ m/min (rechts). .....	101
Abbildung 10.3: Fügespaltweite 2mm.....	102
Abbildung 10.4: Fügespaltweite 3mm.....	103
Abbildung 11.1: Pulverschüttung (links); erstarrte Schlacke (rechts).....	105
Abbildung 11.2: Schweißnahtoberraupe.....	106
Abbildung 11.3: Schweißstrom und Schweißspannung.....	106
Abbildung 11.4: Erste Lage (links); Gegenlage (rechts).....	107
Abbildung 11.5: Lage-Gegenlage Schweißnaht; $A_1= 1,5$ mm.....	108
Abbildung 11.6: Längsschliff über 300mm.....	108
Abbildung 11.7: Verschiedene Härtereihen nach (129).....	109
Abbildung 11.8: Härteverlauf über die Tiefe der Schweißnaht nach (129).....	110
Abbildung 11.9: Entnahmepositionen der Prüfkörper für den Kerbschlagbiegetest ... .....	110
Abbildung 11.10: Resultate des Kerbschlagbiegetests nach (128).....	111
Abbildung 12.1: 1.4301; $v_s= 0,6$ m/min (oben); $v_s= 1$ m/min (unten).....	114
Abbildung 12.2: 1.4301; $A_1= 1,5$ mm (oben); $A_1= 0$ mm (unten).....	115
Abbildung 12.3: 1.4301; Mikroschliffe.....	116
Abbildung 12.4: Resultate des Kerbschlagbiegetests nach (128).....	117
Abbildung 13.1: Schweißnahtvorbereitung Unterpulverschweißen (Tandem); Behälter- oder Windturmbau.....	119

---

Abbildung 13.2: Schweißnahtvorbereitung Unterpulver Engspaltschweißen (4-Draht); Rohrwerk, Pipelinefertigung .....	120
Abbildung 13.3: Schweißnahtvorbereitung LB-UP-Hybridschweißen .....	121
Abbildung 13.4: Betriebsnebenkosten für ein Produktionsjahr.....	124
Abbildung 13.5: Kumulierte Gesamtkosten.....	125

### III Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1:	Chemische Analyse Grundwerkstoff - S355M/ML .....	36
Tabelle 4.2:	Chemische Analyse Grundwerkstoff - nichtrostender Stahl 1.4301..... .....	36
Tabelle 5.1:	Bezeichnung geometrischer Prozessparameter .....	43
Tabelle 6.1:	Ausgangs-Schweißparameter .....	45
Tabelle 7.1:	Versuchsplan.....	70
Tabelle 13.1:	Schweißzeit pro Meter fertiggestellter Schweißnaht.....	122
Tabelle 13.2:	Abschätzung von Investitions- und Betriebsnebenkosten .....	123

## IV Abkürzungen und Formelzeichen

CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid <i>Carbon dioxide</i>	
DIN	Deutsches Institut für Normung <i>German Institute for Standardisation</i>	
D <sub>LA</sub>	Prozessabstand <i>Process distance</i>	[mm]
DV	Doppel-V Schweißnahtvorbereitung <i>Double-V weld seam preparation</i>	
EBW	Elektronenstrahlschweißen <i>Electron beam welding</i>	
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie <i>Energy dispersive X-ray spectroscopy</i>	
LB	Laserstrahl <i>Laser beam</i>	
LB-MSG-Hybrid	Laserstrahl-Metallschutzgas-Hybrid <i>Laser beam gas metal arc hybrid</i>	
LB-UP-Hybrid	Laserstrahl-Unterpulver-Hybrid <i>Laser beam submergerd arc hybrid</i>	
LBW	Laserstrahlschweißen <i>Laser beam welding</i>	
MAG	Metall-Aktivgas <i>Metal active gas</i>	
MSG	Metallschutzgas <i>Gas metal arc</i>	
Nd:YAG	Neodym:Ytterbium-Aluminium-Granat <i>Neodymium: Ytterbium aluminium garnet</i>	
PA	Schweißposition Wannenlage <i>Welding position flat position 1G</i>	
PB	Schweißposition Horizontal-Vertikal <i>Welding position horizontal-vertical 2F</i>	

P <sub>L</sub>	Laserstrahlleistung <i>Laser power</i>	[kW]
RWTH	Rheinisch-Westfälisch Technische Hochschule <i>RWTH Aachen University</i>	
UP	Unterpulver <i>Submerged</i>	
v <sub>D</sub>	Drahtvorschubgeschwindigkeit <i>Wire feed speed</i>	[m/min]
v <sub>s</sub>	Vorschubgeschwindigkeit <i>Welding speed</i>	[m/min]
WIG	Wolfram-Inertgas <i>Tungsten inert gas</i>	
X <sub>1</sub>	Abstand Trennblech-Laserstrahl <i>Distance separating plate to laser beam</i>	[mm]
X <sub>2</sub>	Abstand Absaugung <i>Distance of the fume extraction nozzle</i>	[mm]
X <sub>3</sub>	Abstand Prozessgasdüse <i>Distance of the process gas nozzle</i>	[mm]
Y <sub>1</sub>	Stickout <i>Stickout</i>	[mm]
Y <sub>2</sub>	Höhe des Pulverschüttrohrs <i>Height of the powder spill tube</i>	[mm]
Y <sub>3</sub>	Höhe des Trennblechs <i>Height of the separating plate</i>	[mm]
Y <sub>4</sub>	Höhe Prozessgasdüse <i>Height of the process gas nozzle</i>	[mm]
Y <sub>5</sub>	Höhe Absaugung <i>Height of the fume extraction nozzle</i>	[mm]
Y <sub>F</sub>	Fokuslage <i>Focal position</i>	[mm]
α <sub>1</sub>	Anstellwinkel UP-Brenner <i>Inclination angle submerged arc torch</i>	[°]

$\alpha_2$	Anstellwinkel des Trennblechs <i>Inclination angle separating plate</i>	[°]
$\alpha_3$	Anstellwinkel des Laserstrahls <i>Inclination angle laser beam</i>	[°]

## **V Vorveröffentlichungen**

*Die Ausführungen sind zum Teil bereits in eigenen folgenden Veröffentlichungen publiziert worden:*

(1); (2); (3); (4); (5); (6); (7); (8); (9)

## VI Zusammenfassung

Das schweißtechnische Fügen großer Blechdicken bestimmt in verschiedenen Industriezweigen den Fertigungsalltag. So ist das Schweißen von Linearnähten mit einer Länge von bis zum Teil 30 m eine häufig anzutreffende Fügeaufgabe im Bereich der Rohr- oder Pipelinefertigung oder auch im Schiff- und Brückenbau. Derzeit werden zur Bewältigung dieser Fügeaufgabe vorrangig konventionelle Lichtbogenschweißtechniken, wie zum Beispiel das Unterpulverschweißen, eingesetzt. So werden Fügepartner mit großen Blechdicken mittels Mehrlagentechnik mit konstant hohem Gütegrad gefügt.

Das im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Laserstrahl-Unterpulver-Hybridschweißverfahren stellt eine Substitutionsmöglichkeit für konventionell eingesetzte Schweißverfahren zur Produktivitätssteigerung im Bereich großer Blechdicken dar. Übergeordnet wird im Rahmen dieser Arbeit die Ausformung des Schmelzbades untersucht. Es werden Wirkzusammenhänge aufgedeckt und Schweißparameter identifiziert, welche zur Ausformung eines hybriden Schweißprozesses führen.

Zu Beginn der Arbeit wird der Einfluss verschiedener geometrischer Schweißparameter auf das Schweißergebnis untersucht. So wird gezeigt, dass ein Anstellwinkel der Laserstrahloptik von  $15^\circ$  sowie des UP-Brenners von  $5^\circ$  bei gleichzeitig geringen Prozessabständen zur Ausformung eines gemeinsamen Schmelzbades führt. Synergieeffekte wie die signifikante Steigerung der Einschweißtiefe, das Fernbleiben von Schweißnahtfehlern trotz der großen Einschweißtiefe sowie eine Schweißnaht mit homogener chemischer Zusammensetzung sind als Folge dokumentierbar. Weiterführend werden grafische Modelle, basierend auf eigens durchgeführten empirischen Studien, präsentiert, welche das nutzbare Parameterfenster zur Erzielung möglichst großer Einschweißtiefen bei einem gleichzeitig hohen Gütegrad beschreiben. Darüber hinaus wird die Ausdehnung des Schmelzbades quer und längs zur Schweißrichtung während des Schweißprozesses sichtbar gemacht. Dazu wird das schmelzflüssige Material mittels Gasdruckstoß aus der Fügezone herausgetrieben, sodass ein Negativ-Abbild der Schweißnaht erstellt wird. Mit dieser Methodik wird grundlegendes Prozessverständnis geschaffen. Abschließend wird demonstriert, dass sich die bis hierhin erzielten Schweißergebnisse ebenfalls auf fügespaltbehaftete Fügepartner sowie auf die Werkstoffgüte 1.4301 übertragen lassen.

## VII Abstract

Welding of large plate thicknesses determines the daily production routine in various branches of industry. Welding of linear seams with a length of up to 30 m is a common joining task in the field of tube or pipeline production or also in ship and bridge building. At present, conventional arc welding techniques, such as submerged arc welding, are primarily used to manage this joining task. Thus, joining partners with large sheet thicknesses are welded with a constantly high quality level by means of multilayer technology.

The Laser Beam Submerged Arc Hybrid Welding Process investigated in this work represents a possible substitution for conventionally used welding processes to increase productivity in the area of large sheet thicknesses. In the context of this work, the formation of the molten pool is investigated in a superordinate manner. Effects are revealed and welding parameters are identified, which lead to the formation of a hybrid welding process.

At the beginning of the work the influence of different geometric welding parameters on the welding result is examined. Thus, it is shown that an angle of incidence of the laser beam optics of  $15^\circ$  and of the submerged arc torch of  $5^\circ$  with simultaneously small process distances leads to the formation of a common weld pool. Synergy effects such as the significant increase in welding depth, the absence of weld seam defects despite the large welding depth and a weld seam with homogeneous chemical composition can be documented as a result. In addition, graphic models based on empirical studies are presented, which describe the parameter window that can be used to achieve the highest possible welding depths while maintaining a high degree of quality. In addition, the expansion of the weld pool transversely and longitudinally to the welding direction during the welding process is made visible. For this purpose, the molten material is driven out of the joining zone by means of a gas pressure shock so that a negative image of it is created. In this way, a basic understanding of the process is created. Finally, it is demonstrated that the welding results achieved up to this point can be transferred to joining partners with joining gaps and to the material quality 1.4301.