

Laserstrahl-MSG-Hybridschweißen mit kleinen Streckenenergien für Dünoblechanwendungen

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

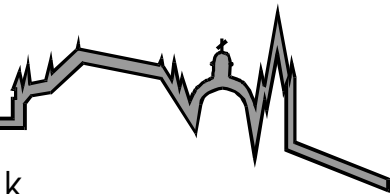
von
Michael Mavany

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisgen
Prof. Dr.-Ing. Peter Plapper

Tag der mündlichen Prüfung: 10. September 2013

Michael Mavany

**Laserstrahl-MSG-Hybridschweißen
mit kleinen Streckenenergien für
Dünoblechanwendungen**



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

Band 3/2013

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, 2013)

Copyright Shaker Verlag 2013

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2272-8

ISSN 0943-9358

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik (ISF) der RWTH Aachen University mit finanzieller Unterstützung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie auf einen Beschluss des Bundestages.

Damit diese Arbeit entstehen konnte, war das Mitwirken mehrerer Personen nötig, bei denen ich mich bedanken möchte.

Zunächst danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisinger für die Möglichkeit zu promovieren. Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Plapper danke ich für die Durchsicht der Arbeit und die Übernahme des Koreferats.

Lars Stein, Gabriele Mavany, Christoph Turner, Matthias Angerhausen sowie Jana und Christian von der Heydt danke ich für die kritische Durchsicht des Manuskriptes und die sich daran anschließenden Diskussionen.

Ebenfalls gebührt mein Dank allen Mitarbeitern am ISF für die Unterstützung, die ich jederzeit von Ihnen bekommen habe. Egal ob es sich um einen fachlichen Rat, um das Verkabeln einer nicht mehr ganz modernen Steuerung mit einem Laser, um den Bau einer „unkonventionellen“ Halterung, um das Beschaffen von Literatur oder das Erzeugen von Schliffen und Härtemessungen handelte, es wurde immer eine Lösung gefunden. Besonders erwähnen möchte ich meine ehemaligen Kollegen aus der Laserabteilung Nikolaus Wagner, Stefan Jakobs, Stefan Longerich, Christoph Turner und Benjamin Gerhards, die mich jederzeit unterstützt haben. Zusätzlich möchte ich mich bei allen Hiwis, besonders bei Kerstin Otto bedanken, die mich während meiner gesamten Zeit am ISF begleitet hat. Auch bei den Studien- und Diplomarbeitern bedanke ich mich, ohne deren Zutun die Arbeit nicht hätte erstellt werden können.

Nicht zuletzt möchte ich meiner Familie danken, auf die ich mich immer verlassen kann und die jederzeit Berater, Ratgeber und Unterstützer ist. Meiner Mutter danke ich besonders für die zahlreichen Korrekturen an sämtlichen Arbeiten seit Beginn meines Studiums.

I Inhaltsverzeichnis

I	Inhaltsverzeichnis.....	I
II	Abbildungsverzeichnis	IV
III	Tabellenverzeichnis	XII
IV	Abkürzungen	XIII
V	Formelzeichen.....	XIV
1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	3
2.1	Laserstrahl-MSG-Hybridschweißen.....	3
2.2	Laserstrahlschweißen.....	6
2.2.1	Laserstrahlquellen	7
2.2.2	Laserstrahlschweißprozesse	10
2.3	MSG-Schweißen.....	14
2.3.1	Verfahrensprinzip.....	14
2.3.2	Lichtbogenarten.....	15
2.3.3	Digital geregelte Lichtbögen	18
2.4	Betrachtung der Energieeinbringung.....	24
2.4.1	Einfluss der Streckenenergie auf die Bauteileigenschaften.....	24
2.4.2	Einfluss der Fügeverfahren auf die Streckenenergie.....	25
2.4.3	Berechnung der Streckenenergie	26
3	Problemstellung und Zielsetzung	32
4	Laser-MSG-Hybridschweißen mit niederenergetischen Lichtbögen.....	34
4.1	Versuchsbedingungen und Materialien.....	34
4.1.1	Laser-Komponenten	34
4.1.2	MSG-Komponenten	35
4.1.3	Hilfseinrichtungen	36
4.1.4	Messeinrichtungen und Hochgeschwindigkeitskamera	38

4.1.5	Versuchswerkstoffe und Hilfsstoffe.....	38
4.2	Grundlagenuntersuchungen zur Ermittlung der Streckenenergieen beim Einsatz der verschiedenen Lichtbögen beim Verschweißen von 2mm dicken Blechen....	40
4.2.1	Untersuchungen bei verschiedenen Geschwindigkeiten	40
4.3	Vergleich der Temperaturentwicklung an der Schmelzlinie.....	58
4.4	Untersuchung zur Spaltüberbrückbarkeit.....	61
4.5	Schweißen von hochlegierten Stählen.....	65
4.5.1	Ferritischer, korrosionsbeständiger Stahl	65
4.5.2	Austenitischer, korrosionsbeständiger Stahl.....	68
4.6	Untersuchungen des Einflusses der Wärmeeinbringung auf den Verzug	72
4.6.1	Versuchsvorbereitung und -aufbau.....	72
4.6.2	Ergebnisse.....	73
4.7	Schweißen von verzinkten Blechen.....	75
4.8	Schweißungen an Aluminium.....	77
4.9	Schweißen dünnster Bleche < 1 mm.....	81
5	Laser-MSG-Hybridschweißen mit dünnsten Drahtelektroden	87
5.1	Anlagenaufbau und Versuchsmaterialien.....	87
5.1.1	Laserkomponenten.....	87
5.1.2	MSG-Komponenten	90
5.2	Untersuchungen an 0,5 mm dicken Blechen.....	92
5.2.1	Festlegen erster Prozessparameter	92
5.2.2	Vergleichsschweißungen.....	95
5.2.3	Untersuchungen zum Schweißen mit vorlaufendem Laserstrahl	97
5.2.4	Adaption der Ergebnisse auf den I-Stoß.....	99
5.2.5	Schweißergebnisse an Kehlnähten	107
5.3	Anwendung des Verfahrens an dünnsten Blechen und Folien.....	108
5.3.1	Schweißergebnisse an 0,25 mm dicken Blechen	108
5.3.2	Schweißergebnisse an 0,1 mm dicken Folien	110
5.4	Erweiterung des Verfahrens auf Schweißungen an Aluminium.....	111

6	Beispielhafte Anwendung.....	115
7	Zusammenfassung und Ausblick	119
8	Literaturverzeichnis	123
9	Anhang	133

II Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Prinzip des Laser-MSG-Hybridschweißens	3
Figure 2.1:	Principe of Laser-GMA-hybrid welding	3
Abbildung 2.2:	Längsgeströmter CO ₂ -Laser [28]	7
Figure 2.2:	longitudinal flow CO ₂ -Laser	7
Abbildung 2.3:	Aufbau des Faserlasers	10
Figure 2.3:	Design of a fibre laser	10
Abbildung 2.4:	Prinzipien des Laserstrahlschweißens [36]	12
Figure 2.4:	Principe of laser beam welding	12
Abbildung 2.5:	Wirkungsgrade verschiedener Laserstrahlquellen [43]	13
Figure 2.5:	electro-optical efficiency of Laser beam sources	13
Abbildung 2.6:	Schematische Darstellung des Metall-Schutzgasschweißens	14
Figure 2.6:	schematic drawing of gas metal arc welding	14
Abbildung 2.7:	Werkstoffübergang im Kurzlichtbogen [28]	16
Figure 2.7:	Material deposition during short arc welding	16
Abbildung 2.8:	Einfluss der Drosselwirkung beim Kurzlichtbogen [28]	19
Figure 2.8:	Influence of the inductor effect on a short arc	19
Abbildung 2.9:	Übersicht der geregelten Lichtbogenprozesse	20
Figure 2.9:	Block diagram of controlled arc processes	20
Abbildung 2.10:	Strom- Spannungs- und Drahtvorschubverlauf beim Fronius CMT21	
Figure 2.10:	Current, Voltage and wire speed at Fronius CMT	21
Abbildung 2.11:	Strom- Spannungsverlauf beim EWM-ColdArc [52]	22
Figure 2.11:	Voltage and current during EWM-coldArc	22
Abbildung 2.12:	Strom- Spannungsverlauf beim Cloos Cold Process	23
Figure 2.12:	Voltage and current during Cloos Cold Process	23
Abbildung 2.13:	Auswirkung der Streckenenergie auf die Schweißverbindung [67]	24
Figure 2.13:	Influence of the energy input on the weld	24

Abbildung 2.14: Vergleich der Streckenenergie bei unterschiedlichen Fügeverfahren	25
Figure 2.14: Comparison of heat input using different joining methods	25
Abbildung 2.15: Thermische Vorgänge beim Schweißen [72].....	27
Figure 2.15: Thermic operations during welding	27
Abbildung 2.16: Absorption an Stahl in Abhängigkeit von Temp. und Wellenlänge	29
Figure 2.16: Absorption in steel as a function of temperature and wave length	29
Abbildung 2.17: Einkoppelgrad in Abhängigkeit von Tiefe / Fokussdurchmesser	30
Figure 2.17: coupling factor as a function of depth / focal diameter	30
Abbildung 2.18: Leistung und Wirkungsgrad in Abh. der Prozessgeschwindigkeit	31
Figure 2.18: Power and efficiency as a function of welding speed	31
Abbildung 4.1: Ergebnisse der Strahlvermessung TruFlow 6000	35
Figure 4.1: Result of the beam measurement TruFlow 6000	35
Abbildung 4.2: Laser-MSG-Hybridkopf	37
Figure 4.2: Laser-GMA-Hybrid head	37
Abbildung 4.3: Hybridschweißnaht mit einem Standard-Kurzlichtbogen $v_s = 1,1$ m/min	41
Figure 4.3: Hybrid weld seam with standard short arc $v_s = 1,1$ m/min	41
Abbildung 4.4: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen eines Standard-Kurzlichtbogens, Schweißgeschwindigkeit $1,1$ m/min	42
Figure 4.4: High speed film of a short arc welding speed $1,1$ m/min	42
Abbildung 4.5: Hybridschweißnaht mit einem coldArc-Prozess $v_s = 1,1$ m/min.....	42
Figure 4.5: Hybrid weld seam with coldArc-Process $v_s = 1,1$ m/min	42
Abbildung 4.6: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen eines coldArc-Prozesses, Schweißgeschwindigkeit $1,1$ m/min	43
Figure 4.6: High speed film of a coldArc-Process, welding speed $1,1$ m/min	43
Abbildung 4.7: Hybridschweißnaht mit einem CMT-Prozesses $v_s = 1,1$ m/min	44
Figure 4.7: Hybrid weld seam with CMT-Process $v_s = 1,1$ m/min	44

Abbildung 4.8: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen eines CMT-Prozesses, Schweißgeschwindigkeit 1,1 m/min	44
Figure 4.8: High speed film of a CMT-Process, welding speed 1,1 m/min	44
Abbildung 4.9: Hybridschweißnaht mit einem CP-Prozess $v_s = 1,1$ m/min	45
Figure 4.9: Hybrid weld seam with CP-Process $v_s = 1,1$ m/min	45
Abbildung 4.10: Strom- und Spannungsmessung bei 1,1 m/min	46
Figure 4.10: voltage and current at $v_s = 1,1$ m/min	46
Abbildung 4.11: Vergleich der Streckenenergie des Hybridprozesses bei 1,1 m/min	48
Figure 4.11: Comparison of heat input per length at 1,1 m/min	48
Abbildung 4.12: Hybridschweißnaht mit einem Standard-Kurzlichtbogen $v_s = 2,0$ m/min	49
Figure 4.12: Hybrid weld seam with short arc $v_s = 2,0$ m/min	49
Abbildung 4.13: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen eines Standard-Kurzlichtbogens, Schweißgeschwindigkeit 2,0 m/min	49
Figure 4.13: High speed film of a short arc, welding speed 2,0 m/min	49
Abbildung 4.14: Hybridschweißnaht mit einem coldArc-Prozess $v_s = 2,0$ m/min	50
Figure 4.14: Hybrid weld seam with coldArc-Process $v_s = 2,0$ m/min	50
Abbildung 4.15: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen eines coldArc-Prozesses, Schweißgeschwindigkeit 2,0 m/min	51
Figure 4.15: High speed film of coldArc-Process, welding speed 2,0 m/min	51
Abbildung 4.16: Hybridschweißnaht mit einem CMT-Prozess $v_s = 2,0$ m/min	52
Figure 4.16: Hybrid weld seam with CMT-Process $v_s = 2,0$ m/min	52
Abbildung 4.17: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen eines CMT-Prozesses Schweißgeschwindigkeit 2,0 m/min	52
Figure 4.17: High speed film of a CMT-Process, welding speed 2,0 m/min	52
Abbildung 4.18: Hybridschweißnaht mit einem CP $v_s = 2,0$ m/min	53
Figure 4.18: Hybrid weld seam with CP $v_s = 2,0$ m/min	53

Abbildung 4.19: Strom- und Spannungsmessung bei 2,0 m/min	54
Figure 4.19: voltage and current at $v_s = 2,0$ m/min	54
Abbildung 4.20: Vergleich der Streckenenergie des Hybridprozesses bei 2,0 m/min	56
Figure 4.20: Comparison of heat input per length at 2,0 m/min	56
Abbildung 4.21: Probenvorbereitung zum Temperaturmessen	59
Figure 4.21: sample preparation for temperature measurement	59
Abbildung 4.22: Vergleich der $t_{8/5}$ Zeiten zwischen einem CMT- und Standard- Kurzlichtbogen	60
Figure 4.22: comparison of $t_{8/5}$ time between a CMT and a conventional short arc	60
Abbildung 4.23: Geometrie und Anordnung zweier Probenstücke für den Versuch zu Spaltüberbrückbarkeit	61
Figure 4.23: Geometry and adjustment of two plates for gap bridging ability tests	61
Abbildung 4.24: Spaltüberbrückbarkeit 0,4 mm Standard-Kurzlichtbogen	62
Figure 4.24: Gap bridging ability 0,4 mm standard short arc	62
Abbildung 4.25: Spaltüberbrückbarkeit 0,4 mm coldArc-Prozess	63
Figure 4.25: Gap bridging ability 0,4 mm coldArc-Process	63
Abbildung 4.26: Spaltüberbrückbarkeit 0,4 mm CMT-Prozess.....	63
Figure 4.26: Gap bridging ability 0,4 mm CMT-Process	63
Abbildung 4.27: Spaltüberbrückbarkeit 0,4 mm CP-Prozess	64
Figure 4.27: Gap bridging ability 0,4 mm CP-Process	64
Abbildung 4.28: 1.4003 Standard-Kurzlichtbogen.....	66
Figure 4.28: 1.4003 standard short Arc	66
Abbildung 4.29: 1.4003 coldArc-Prozess	66
Figure 4.29: 1.4003 coldArc-Process	66
Abbildung 4.30: 1.4003 CMT-Prozess	67
Figure 4.30: 1.4003 CMT-Process	67

Abbildung 4.31: Vergleich der Streckenenergie des Hybridprozesses bei ferritischen, korrosionsbeständigen Werkstoffen.....	68
Figure 4.31: Comparison of heat input per length at ferritic, stainless steels	68
Abbildung 4.32: 1.4301 Standard-Kurzlichtbogen.....	69
Figure 4.32: 1.4301 standard short arc	69
Abbildung 4.33: 1.4301 coldArc-Prozess	70
Figure 4.33: 1.4301 coldArc-Process	70
Abbildung 4.34: 1.4301 CMT-Prozess	70
Figure 4.34: 1.4301 CMT-Process	70
Abbildung 4.36: Um ca. 11° geneigte Einspannvorrichtung	73
Figure 4.36: By 11° tilted clamping device	73
Abbildung 4.37: Schweißen von verzinkten Blechen mit dem Standard- Kurzlichtbogen	76
Figure 4.37: welding of zinc coated metal sheets with a standard short arc	76
Abbildung 4.38: Schweißen von verzinkten Blechen mit dem coldArc-Prozess.....	77
Figure 4.38: of zinc coated metal sheets with coldArc-Process	77
Abbildung 4.39: Schweißung Aluminium coldArc-Prozess.....	78
Figure 4.39: Weld seam Aluminium coldArc-Process	78
Abbildung 4.40: Schweißung Aluminium Standard-Kurzlichtbogen	79
Figure 4.40: weld seam Aluminium standard-short arc	79
Abbildung 4.41: Härtemessung Aluminium Standard (links) coldArc (rechts)	79
Figure 4.41: hardening measurement Aluminum Standard (left) coldArc (right)	79
Abbildung 4.42: Spannungs-Dehnungsdiagramm Aluminium	80
Figure 4.42: Stress-Strain Diagram aluminium	80
Abbildung 4.43: DP1000 0,8 mm Dicke; $P_L = 1,32$ kW; $v_D = 4,0$ m/min; coldArc- Prozess	81
Figure 4.43: DP1000 0,8 mm thickness; $P_L = 1,32$ kW; $v_D = 4,0$ m/min coldArc-Process	81

Abbildung 4.44: DP1000 0,8 mm Dicke; $P_L = 1,07$ kW; $v_D = 3,7$ m/min; coldArc-Prozess	82
Figure 4.44: DP1000 0,8 mm thickness; $P_L = 1,07$ kW; $v_D = 3,7$ m/min coldArc-Process	82
Abbildung 4.45: DP1000 0,8 mm Dicke; $v_s = 1,1$ m/min CMT-Prozess	83
Figure 4.45: DP1000 0,8 mm Dicke; $v_s = 1,1$ m/min CMT-Process	83
Abbildung 4.46: DP1000 0,8 mm Dicke; $v_s = 2,0$ m/min CMT-Prozess	84
Figure 4.46: DP1000 0,8 mm Dicke; $v_s = 2,0$ m/min CMT-Process	84
Abbildung 4.47: DP1000 0,8 mm Dicke; $v_s = 3,0$ m/min CMT-Prozess	85
Figure 4.47: DP1000 0,8 mm Dicke; $v_s = 3,0$ m/min CMT-Process	85
Abbildung 4.48: DP-K 30/50 0,5 mm Dicke; $v_s = 3,0$ m/min CMT-Prozess	86
Figure 4.48: DP-K 30/50 0,5 mm sheet thickness; $v_s = 3,0$ m/min CMT-Process	86
Abbildung 5.1: Ergebnis der Laservermessung IPG YLR 250 SM	89
Figure 5.1: Result of the beam measurement IPG YLR 250 SM	89
Abbildung 5.2: Ergebnis der Laservermessung SPI SP-200C-002B	90
Figure 5.2: Result of the beam measurement SPI SP-200C-002B	90
Abbildung 5.3: Strom- /Spannungsverlauf Laser-MSG-Hybridschweißen mit dünnsten Drahtelektroden	94
Figure 5.3: Voltage and current laser-gma-hybrid welding with thinnest filler wire	94
Abbildung 5.4: Laserstrahlschweißnaht mit Hybridparametern	95
Figure 5.4: Laser weld seam with hybrid parameters	95
Abbildung 5.5: Schliffe der Laserstrahlschweißnaht mit Hybridparameter	96
Figure 5.5: cross section of laser weld seams with hybrid parameters	96
Abbildung 5.6: MSG-Schweißnaht mit Hybridparameter	96
Figure 5.6: GMA-Weld seam with Hybridparameter	96
Abbildung 5.7: Brennen des Lichtbogens beim Laser-MSG-Hybridschweißen	97
Figure 5.7: Burning of the arc during Laser-GMA-Hybrid welding	97

Abbildung 5.8: Schweißversuche stechende Drahtzufuhr mit unterschiedlichen Prozessabständen	98
Figure 5.8: welding trials with stitching filler wire and different process distances	98
Abbildung 5.9: I-Stoß 0,5 mm Blechdicke; 700 mm/min Vorschub	100
Figure 5.9: Butt joint 0,5 mm plate thickness; 700 mm/min welding speed	100
Abbildung 5.10: I-Stoß 0,5 mm Blechdicke; 900 mm/min Vorschub	101
Figure 5.10: Butt joint 0,5 mm plate thickness; 900 mm/min welding speed	101
Abbildung 5.11: Laserstrahlschweißnaht unter Argon (links), und Argon-Helium-Gemisch (rechts).....	102
Figure 5.11: laser beam weld under Argon (left), and Argon-Helium-mixture (right)	102
Abbildung 5.12: I-Stoß 0,5 mm Blechdicke; $v_w = 1,25$ m/min Ar-He Schutzgas....	102
Figure 5.12: Butt joint 0,5 mm plate thickness; $v_w = 1,25$ m/min welding speed Ar-He	102
Abbildung 5.13: Spaltüberbrückbarkeit 0,2 mm $v_D = 5,3$ m/min; $P_L = 250$ W	103
Figure 5.13: Gap bridging ability 0,2 mm $v_D = 5,3$ m/min; $P_L = 250$ W	103
Abbildung 5.14: Spaltüberbrückbarkeit 0,3 mm $v_D = 5,9$ m/min; $P_L = 150$ W	104
Figure 5.14: Gap bridging ability 0,3 mm $v_D = 5,9$ m/min; $P_L = 150$ W	104
Abbildung 5.15: Zugprobe vor dem Zugversuch	105
Figure 5.15: Sample before tensile test	105
Abbildung 5.16: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben $v_w = 1,25$ m/min ..	105
Figure 5.16: Stress-Strain-Diagram of the sample $v_w = 1,25$ m/min	105
Abbildung 5.17: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Proben Spaltweite 0,3 mm	106
Figure 5.17: Stress-Strain-Diagram of the sample gap width 0,3 mm	106
Abbildung 5.18: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der laserstrahlgeschweißten Proben	106
Figure 5.18: Stress-Strain-Diagram of the laser beam welded samples	106
Abbildung 5.19: Kehlnaht am Überlappstoß 0,5 mm Blechdicke	107
Figure 5.19: Fillet weld in a lap join plate thickness 0,5 mm	107

Abbildung 5.20: Verbindungsnaht 0,25 mm Blechdicke	108
Figure 5.20: Butt joint 0,25 mm plate thickness	108
Abbildung 5.21: Verbindungsnaht 0,25 mm Blechdicke, 0,1 mm Spalt und 0,25 mm Kantenversatz mit gepulstem Laser geschweißt, $v_s = 1,1$ m/min	109
Figure 5.21: Butt-Joint 0,25 mm plate thickness, 0,1 mm gap and 0,25 mm displacement with pulsed laser welded $v_s = 1,1$ m/min	109
Abbildung 5.22: Blindnaht 0,1 mm Blechdicke	110
Figure 5.22: Bead on plate weld 0,1 mm plate thickness	110
Abbildung 5.23: Schliff sowie Ober- und Unterraupen einer Aluminiumschweißung	112
Figure 5.23: Cross section, top bead and root bead of Aluminum weld seam	112
Abbildung 5.24: Härtemessung Aluminium 0,5 mm Blechdicke	113
Figure 5.24: hardening measurement Aluminum 0,5 mm plate thickness	113
Abbildung 5.25: Spannungs-Dehnungsdiagramm Aluminium 0,5 mm Blechdicke	113
Figure 5.25: Stress-Strain Diagram aluminum 0,5 mm plate thickness	113
Abbildung 6.1: Zeichnung einer Rohrstruktur für eine ultrakalte Neutronenquelle	115
Figure 6.1: Sketch of a tube for an extra cold neutron source	115
Abbildung 6.2: Fertigungsreihenfolge Neutronenquelle	116
Figure 6.2: Manufacturing Procedure Neutron Source	116
Abbildung 6.3: „Demonstrator“ Laser-MSG-Hybridschweißen mit dünnsten Drahtelektroden.....	117
Figure 6.3: „Demonstrator“ Laser-GMA-Hybrid welding with thinnest filler wire	117

III Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1:	Übersicht über die verwendeten Materialien und Zusatzwerkstoffe ..	39
Table 4.1:	Overview of used base material and filler wire	39
Tabelle 4.2:	Ergebnisse der Verzugsversuche	74
Table 4.2:	results of the distortion tests	74
Tabelle 5.1:	vorläufige Schweißparameter Laser-MSG-Hybridschweißen mit dünnsten Drahtelektroden	93
Table 5.1:	preliminary micro-laser-gma-hybrid parameters	93
Tabelle 9.1:	Parameter DC01 Schweißgeschwindigkeit 1,1 m/min	133
Table 9.1:	Parameter DC01 welding speed 1,1 m/min	133
Tabelle 9.2:	Parameter DC01 Schweißgeschwindigkeit 2,0 m/min	133
Table 9.2:	Parameter DC01 welding speed 2,0 m/min	133
Tabelle 9.3:	Parameter 1.4003 Schweißgeschwindigkeit 2,0 m/min.....	133
Table 9.3:	Parameter 1.4003 welding speed 2,0 m/min	133
Tabelle 9.4:	Parameter 1.4301 Schweißgeschwindigkeit 2,0 m/min.....	134
Table 9.4:	Parameter 1.4301 welding speed 2,0 m/min	134
Tabelle 9.5:	Parameter verzinkte Bleche	134
Table 9.5:	Parameter zinc coated plates	134
Tabelle 9.6:	Parameter Aluminium	134
Table 9.6:	Parameter Aluminium	134
Tabelle 9.7:	Parameter DP1000 0,8 mm Dicke	134
Table 9.7:	Parameter DP1000 0,8 mm Dicke	134
Tabelle 9.8:	Parameter DP-K 30/50.....	135
Table 9.8:	Parameter DP-K 30/50	135

IV Abkürzungen

CMT	Cold Metal Transfer <i>cold metal transfer</i>
CP	Cold Process <i>cold process</i>
CO ₂	Kohlendioxid <i>carbon dioxide</i>
Cr	Chrom <i>chrome</i>
DIN	Deutsches Institut für Normung <i>German Institut for Standardization</i>
EN	Europäische Norm <i>European Standard</i>
He	Helium <i>helium</i>
ISF	Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik <i>welding and joining Institute</i>
ISO	Internationale Organisation für Normung <i>International Standards Organisation</i>
MAG	Metall Aktivgas <i>metal activ gas</i>
MIG	Metall Inertgas <i>metal inert gas</i>
MSG	Metall Schutzgas <i>metal active gas</i>
N ₂	Stickstoff <i>nitrogen</i>
Nd	Neodym <i>neodym</i>
Ni	Nickel <i>nickel</i>
SIGMA	alte Bezeichnung des Metall Inertgas Schweißens <i>shielded inert gas metal arc</i>
WIG	Wolfram Inertgas <i>tungsten inert gas</i>
YAG	Yttrium-Aluminium-Granat <i>Yttrium aluminium garnet</i>

V Formelzeichen

d_f	[mm]	Fokusedurchmesser <i>focal diameter</i>
E_{CMT}	[J/mm]	Streckenenergie CMT <i>energy-per-unit-length CMT</i>
$E_{coldArc}$	[J/mm]	Streckenenergie coldArc <i>energy-per-unit-length coldArc</i>
E_{CP}	[J/mm]	Streckenenergie CP <i>energy-per-unit-length CP</i>
E_L	[J/mm]	Streckenenergie Laser <i>energy-per-unit-length laser</i>
E_{ges}	[J/mm]	Streckenenergie Gesamt <i>energy-per-unit-length complete</i>
E_{MSG}	[J/mm]	Streckenenergie Lichtbogen <i>energy-per-unit-length arc</i>
$E_{Standard}$	[J/mm]	Streckenenergie Standard-Kurzlichtbogen <i>energy-per-unit-length standard short arc</i>
I	[A]	Stromstärke <i>current</i>
K	[-]	Strahlpropagationsfaktor <i>beam propagation factor</i>
P_L	[W]	Laserstrahlleistung <i>Power Laser</i>
P_{MSG}	[W]	Lichtbogenleistung <i>Power GMA</i>
Q_L	[W]	absorbierte Laserstrahlleistung <i>absorbed laser power</i>
Q_{MSG}	[W]	absorbierte MSG Leistung <i>absorbed GMA Power</i>
U	[V]	Spannung <i>voltage</i>
v_D	[m/min]	Drahtvorschubgeschwindigkeit <i>wire speed</i>
v_s	[m/min]	Schweißgeschwindigkeit <i>welding speed</i>
T	[°C]	Temperatur <i>temperature</i>

λ	[μm]	Wellenlänge <i>wave length</i>
η_{CA}	[-]	Wirkungsgrad coldArc <i>efficiency coldArc</i>
η_{CMT}	[-]	Wirkungsgrad CMT <i>efficiency CMT</i>
η_{cp}	[-]	Wirkungsgrad CP <i>efficiency CP</i>
η_{IL}	[-]	Wirkungsgrad Impulsbogen <i>efficiency pulsed arc</i>
η_{KL}	[-]	Wirkungsgrad Kurzlichtbogen <i>efficiency short arc</i>
η_{L}	[-]	Wirkungsgrad Laser <i>efficiency laser</i>
η_{SL}	[-]	Wirkungsgrad Sprühlichtbogen <i>efficiency spray arc</i>