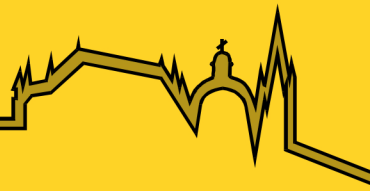


Christoph Turner

**Erweiterung der Anwendungsfelder
des Laserstrahlschweißens im Vakuum
auf Duplex-Stahl und Kupfer**



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

Band 2/2019

Shaker Verlag

**Erweiterung der Anwendungsfelder des
Laserstrahlschweißens im Vakuum auf
Duplex-Stahl und Kupfer**

**Expansion of the Fields of Application of
Laser Beam Welding in Vacuum to
Duplex Stainless Steel and Copper**

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

vorgelegt von

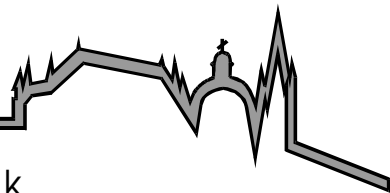
Christoph Turner

Berichter Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisgen
 Univ.-Prof. Dr. phil. nat. habil. Thomas Graf

Tag der mündlichen Prüfung: 18.01.2019

Christoph Turner

**Erweiterung der Anwendungsfelder
des Laserstrahlschweißens im
Vakuum auf Duplex-Stahl und Kupfer**



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

Band 2/2019

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, 2019)

Copyright Shaker Verlag 2019

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6609-8

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 • E-Mail: 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.

Ich danke allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Institutes für die hervorragende und stets kollegiale Zusammenarbeit. Mein besonderer Dank gilt dem Institutsleiter Univ.-Prof. Dr.-Ing Uwe Reisgen für die große Unterstützung bei der Verwirklichung des Promotionsvorhabens. Danken möchte ich auch für das vertrauensvolle Arbeitsverhältnis und die guten Entwicklungsmöglichkeiten in einer überaus spannenden und äußerst lehrreichen Arbeitsumgebung.

Mein besonderer Dank gilt den Kollegen der Abteilung Laserstrahlschweißen, namentlich Dr. Simon Olschok, Dr. Stefan Jakobs, Benjamin Gerhards, Oliver Engels und Niklas Holtum sowie Christoph Geffers von der FEF GmbH. Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei den ehemaligen Mitarbeitern der Abteilung Dr. Stefan Longerich, Dr. Nikolaus Wagner und Dr. Michael Mavany. Sowohl die tägliche Diskussion wissenschaftlicher Fragestellungen als auch die ausgesprochen gute Arbeitsatmosphäre haben wesentlich zur vorliegenden Arbeit beigetragen und auch langjährige Freundschaften begründet.

Ebenso bedanken möchte ich mich bei den nichtwissenschaftlichen Mitarbeitern des Institutes für die stets hochprofessionelle und oftmals unbürokratisch schnelle Mitarbeit und Hilfestellung, welche mir eine große Unterstützung war. Nicht unerwähnt soll auch der unermüdliche Einsatz der zahlreichen studentischen Hilfskräfte der Abteilung Laserstrahlschweißen bleiben.

Meine größte Dankbarkeit gebührt jedoch meiner Familie. Die uneingeschränkte Unterstützung meiner Eltern Helmut und Gaby Turner sowie meines Bruders hat mir wesentlich den langen Ausbildungsweg bis zur Promotion geebnet. Meine Frau Natalie hat mich tagtäglich liebevoll durch alle Höhen und Tiefen der Promotionszeit getragen und mir stets den Rücken freigehalten.

gez. Christoph Turner

I Inhaltsverzeichnis

I	Inhaltsverzeichnis	I
II	Abbildungsverzeichnis.....	IV
III	Tabellenverzeichnis.....	XII
IV	Abkürzungen und Formelzeichen	XIII
V	Zusammenfassung	I
VI	Abstract.....	II
1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	3
2.1	Physikalische Grundlagen und der erste Laser	3
2.2	Laserstrahlerzeuger.....	5
2.3	Charakterisierung der Laserstrahlung.....	8
2.4	Strahlführung und Strahlformung.....	9
2.5	Verfahrensprinzip Laserstrahlschweißen	11
2.5.1	Absorption von Laserstrahlung durch Metalle.....	11
2.5.2	Wärmeleitungsschweißen und Tiefschweißen	12
2.5.3	Dampfkapillare – Temperatur und Kräftegleichgewicht	14
2.5.4	Schmelzbaddynamik	16
2.5.5	Energetische Bilanzierung.....	17
2.6	Laserstrahlschweißen in der praktischen Anwendung.....	19
2.6.1	Thermische Effekte.....	19
2.6.2	Poren, Schweißgutauswürfe, Schweißspritzer und Humping	20
2.6.3	Interaktion mit Metaldampf und umgebender Atmosphäre	22
2.7	Laserstrahlschweißen im Vakuum.....	25
2.7.1	Grundlagen.....	25
2.7.2	Dampfkapillare, Schmelzbadströmungen und Metaldampf.....	28
2.7.3	Aktuelle Entwicklungen, Anwendungen und Anlagentechnik	31

3	Werkstoffgrundlagen und Schweißseignung.....	35
3.1	Cr-Ni-Stahl.....	35
3.2	Duplex-Stahl.....	35
3.3	Kupfer.....	37
4	Problemstellung, Zielsetzung und Lösungsansatz.....	44
4.1	Problemstellung.....	44
4.2	Zielsetzung.....	45
4.3	Lösungsansatz.....	46
5	Eingesetzte Werkstoffe.....	47
5.1	Cr-Ni-Stahl 1.4571.....	47
5.2	Duplex-Stahl.....	47
5.3	Kupfer.....	48
6	Anlagenaufbau.....	50
6.1	Fokus LaVa 95.....	50
6.2	Eigenentwicklung zum Dickblechschweißen.....	51
7	Erweiterung des Prozessverständnisses.....	54
7.1	Variable Schweißgeschwindigkeit.....	55
7.1.1	Streckenenergie (konstante Intensität).....	55
7.1.2	Strahlintensität (konstante Streckenenergie).....	69
7.2	Konstante Schweißgeschwindigkeit.....	70
7.2.1	Streckenenergie (konstante Intensität).....	70
7.2.2	Strahlintensität (konstante Streckenenergie).....	72
8	Erweiterung der Anwendungsfelder.....	75
8.1	Duplex-Stahl.....	75
8.1.1	Vergleich zu unlegiertem Stahl.....	76
8.1.2	Blindschweißungen.....	78
8.1.3	Verbindungsschweißungen.....	85
8.1.4	Toleranzuntersuchungen.....	92

8.1.5	Übertrag auf weitere Duplex-Werkstoffe.....	94
8.1.6	Optimierung des Gefügeaufbaus.....	97
8.1.7	Vergleich zum Elektronenstrahlschweißen.....	100
8.2	Kupfer.....	102
8.2.1	Prozessentwicklung.....	103
8.2.2	Schweißnahtqualität und Einschweißtiefe	110
8.2.3	Optimierung Start-und Stoppbereich	113
8.2.4	Werkstoffvergleich	114
8.2.5	Einfluss des Arbeitsdrucks	116
8.2.6	Verbindungsschweißungen	117
8.2.7	Funktionsmuster.....	119
8.2.8	Vergleich zum Elektronenstrahlschweißen.....	122
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	126
9.1	Erweiterung des Prozessverständnisses	126
9.2	Erweiterung der Anwendungsfelder.....	128
9.3	Ausblick	130
10	Anhang.....	133
10.1	Analyse Duplexwerkstoffe	133
10.2	Strahlvermessung.....	134
10.3	Prüfverfahren.....	134
10.3.1	Sichtprüfung und Durchstrahlungsprüfung	134
10.3.2	Metallographische Analysen.....	135
10.3.3	Härtemessung, Zugversuch und Kerbschlagbiegeversuch.....	135
10.3.4	Korrosionsuntersuchung.....	136
10.4	Parameter.....	136
11	Literaturverzeichnis	140

II Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Grundprinzip der stimulierten Emission und des Laserresonators	4
Figure 2.1: Schematic sketch of the stimulated emission and the optical resonator	4
Abbildung 2.2: Aufbau eines Scheibenlasers nach [12]	7
Figure 2.2: Schematic set-up of a disk laser acc. [12].....	7
Abbildung 2.3: Scheibenlaser Trumpf TruDisk 16002 mit 4 Scheiben nach [13].....	8
Figure 2.3: Disc Laser Trumpf TruDisk 16002 with 4 discs acc. [13]	8
Abbildung 2.4: Charakteristische Parameter der Fokussierung	10
Figure 2.4: Characteristic parameters of focusing.....	10
Abbildung 2.5: Wellenlängenabhängiger Absorptionsgrad nach [22]	12
Figure 2.5: Wavelength dependent absorptivity acc. [22]	12
Abbildung 2.6: Prinzipskizze des Wärmeleitungs- und Tiefschweißens	13
Figure 2.6: Schematic sketch of the heat conduction and deep penetration welding.....	13
Abbildung 2.7: Druckgleichgewicht in der Dampfkapillare.....	14
Figure 2.7: Pressure balance in the vapor capillary	14
Abbildung 2.8: Schmelzbadströmungen um die Dampfkapillare.....	17
Figure 2.8: Weld metal flow around the vapor capillary	17
Abbildung 2.9: Porenbildung und Bildung von Schweißgutauswürfen nach [32].....	20
Figure 2.9: Creation of pores and of weld metal ejections acc. [32].....	20
Abbildung 2.10: Charakterisierung der Metaldampffackel nach [46].....	24
Figure 2.10: Characterization of the metal vapor plume acc. [46]	24
Abbildung 2.11: Ausströmrichtung des Metaldampfes nach [42]	25
Figure 2.11: Direction of flow of the metal vapor acc. [42]	25
Abbildung 2.12: Einschweißtiefensteigerung durch Druckreduktion nach [55].....	26
Figure 2.12: Increase of penetration depth due to pressure reduction acc. [55]	26
Abbildung 2.13: Vergleich der Nahtgeometrie LBW, LaVa und EBW nach [63].....	27
Figure 2.13: Comparison of the weld seam geometry LBW, LaVa and EBW acc. [63].....	27

Abbildung 2.14: Oberflächentemperatur der Dampfkapillare im Vakuum [].....	29
Figure 2.14: Keyhole surface temperature at a working pressure in vacuum [75].....	29
Abbildung 2.15: Schmelzbadströmungen im Vakuum nach [59].....	30
Figure 2.15: Weld metal flow in vacuum condition acc. [59]	30
Abbildung 2.16: Potentiale für das Laserstrahlschweißen im Vakuum nach [76].....	31
Figure 2.16: Potential for the Laser Beam Welding in Vacuum acc. [76]	31
Abbildung 2.17: Max. Blechdicke einlagig und Lage-Gegenlage nach [84].....	32
Figure 2.17: Max. plate thickness in one pass and in 2 passes acc. [84].....	32
Abbildung 2.18: Vorteile LaVa gegenüber LBW und EBW.....	34
Figure 2.18: Advantages of LaVa vs. LBW and EBW	34
Abbildung 3.1: Gefüge Duplexstahl.....	35
Figure 3.1: Microstructure duplex stainless steel	35
Abbildung 3.2: Wärme- und Temperaturleitfähigkeit im Vergleich zu Baustahl.....	38
Figure 3.2: Thermal and temperature conductivity compared to construction steel	38
Abbildung 3.3: Einkoppelgrad – Grundwerkstoff und Aspektverhältnis	40
Figure 3.3: Coupling factor – base material and aspect ratio.....	40
Abbildung 3.4: Typische Nahtdefekte beim Laserstrahlschweißen von Kupfer.....	41
Figure 3.4: Typical welding defects for the laser beam welding of copper	41
Abbildung 3.5: LBW von Kupfer – Einfluss der Schweißgeschwindigkeit.....	42
Figure 3.5: LBW of copper – Influence of the welding speed.....	42
Abbildung 6.1: Anlagenaufbau Universalanlage	51
Figure 6.1: Machine set-up multifunction system	51
Abbildung 6.2: Anlagenaufbau Dickblechschweißen.....	52
Figure 6.2: Machine set-up heavy plate workpieces	52
Abbildung 7.1: CrNi – Einschweißtiefe über Druck.....	56
Figure 7.1: CrNi – Penetration depth plotted against pressure	56

Abbildung 7.2: CrNi – Einschweißstiefenänderung über Schweißgeschwindigkeit.....	57
Figure 7.2: CrNi – Change of penetration depth plotted against welding speed	57
Abbildung 7.3: CrNi – Idealer Arbeitsdruck über Schweißgeschwindigkeit	57
Figure 7.3: CrNi – Ideal working pressure plotted against welding speed.....	57
Abbildung 7.4: Cu – Einschweißtiefe über Druck	58
Figure 7.4: Cu – Penetration depth plotted against the pressure	58
Abbildung 7.5: Cu – Einschweißtiefe über Schweißgeschwindigkeit	59
Figure 7.5: Cu – Penetration depth plotted against welding speed	59
Abbildung 7.6: CrNi – Nahtbreite an der Blechoberseite über Druck.....	60
Figure 7.6: CrNi – Weld seam width at the top surface plotted against pressure.....	60
Abbildung 7.7: CrNi – Druckeinfluss auf die Metaldampffackel.....	61
Figure 7.7: CrNi – Influence of the pressure on the metal vapor plume	61
Abbildung 7.8: Cu – Nahtbreite an der Blechoberseite über Druck	62
Figure 7.8: Cu – Weld seam width at the top surface plotted against pressure	62
Abbildung 7.9: CrNi – Querschliffe $v_{\max}$ (oben), v_{mittel} (mittig) und v_{niedrig} (unten).....	63
Figure 7.9: CrNi – cross sections $v_{\max}$ (top), v_{medium} (center) und v_{low} (bottom)	63
Abbildung 7.10: CrNi – Querschnittsfläche über Druck (l) und Streckenenergie (r) ..	64
Figure 7.10: CrNi – Cross-sectional area pl. ag. pressure (l) and energy per length (r).....	64
Abbildung 7.11: Cu – Querschnittsfläche über Druck (l) und Streckenenergie (r).....	65
Figure 7.11: Cu – Cross-sectional area pl. ag. pressure (l) and energy per length (r)	65
Abbildung 7.12: CrNi – Tropfenbildung durch Humping über Druck.....	66
Figure 7.12: CrNi – Droplet formation due to humping plotted against pressure.....	66
Abbildung 7.13: CrNi – Aspektverhältnis (l) und Grenzaspektverhältnis (r).....	67
Figure 7.13: CrNi – Aspect ratio (l) and limit aspect ratio (r)	67
Abbildung 7.14: Cu – Schweißgutauswürfe 1000 hPa vs. 1 hPa.....	68
Figure 7.14: Cu – Weld metal ejections 1000 hPa vs. 1 hPa	68
Abbildung 7.15: CrNi – Einschweißtiefe über Intensität – absolut (l) und relativ (r) ..	69
Figure 7.15: CrNi – Penetration depth pl. ag. intensity – absolute (l) and relative (r).....	69

Abbildung 7.16: CrNi – Einschweißtiefe (oben links), Nahtbreite (oben rechts) und Querschnittsfläche (unten) über Streckenenergie.....	71
Figure 7.16: CrNi – Penetration depth (top left), seam width (top right) and cross sectional area (bottom) plotted against energy per length	71
Abbildung 7.17: CrNi – Einschweißtiefe über Intensität	72
Figure 7.17: CrNi – Penetration depth plotted against intensity	72
Abbildung 7.18: CrNi – Nahtbreite über Intensität	73
Figure 7.18: CrNi – Weld seam width plotted against intensity	73
Abbildung 7.19: CrNi – Querschnittsfläche über Intensität.....	74
Figure 7.19: CrNi – Cross-sectional area plotted against intensity.....	74
Abbildung 8.1: Anwendungsgebiete und Verarbeitung Duplexstahl	75
Figure 8.1: Application of duplex stainless steel	75
Abbildung 8.2: Vergleich der Nahtgeometrie bei LaVa (Druck 0,1 hPa).....	76
Figure 8.2: Comparison of the weld seam geometry for LaVa (pressure 0,1 hPa).....	76
Abbildung 8.3: Wärme- und Temperaturleitfähigkeit nach [127]	77
Figure 8.3: Thermal conductivity and thermal diffusivity acc. [127]	77
Abbildung 8.4: 1.4462(10 mm) – Vergleich Vakuumdruck und Atmosphärendruck ..	79
Figure 8.4: 1.4462 (10 mm) – Comparison vacuum pressure and atmospheric pressure..	79
Abbildung 8.5: 1.4462 (10 mm) – Defokussieren	80
Figure 8.5: 1.4462 (10 mm) – Defocusing.....	80
Abbildung 8.6: Strahloszillation – Geometrie und Begriffe	81
Figure 8.6: Beam oscillation – geometry and terms.....	81
Abbildung 8.7: 1.4462 (10 mm) – Referenzparameter	82
Figure 8.7: 1.4462 (10 mm) – Reference parameter set	82
Abbildung 8.8: 1.4362 (31 mm) – Nahtdefekte	82
Figure 8.8: 1.4362 (31 mm) – Welding defects	82
Abbildung 8.9: 1.4362 (31 mm) – Reduktion und Vermeidung von Nahtdefekten	83
Figure 8.9: 1.4362 (31 mm) – Reduction and Avoidance of welding defects	83

Abbildung 8.10: 1.4362 (31 mm) – Referenzparameter	84
Figure 8.10: 1.4362 (31 mm) – Reference parameter set	84
Abbildung 8.11: 1.4462 (links) und 1.4362 (rechts) – Schweißposition PA	85
Figure 8.11: 1.4462 (left) und 1.4362 (right) – Welding position PA.....	85
Abbildung 8.12: 1.4462 (10 mm) – Verbindungsnaht	86
Figure 8.12: 1.4462 (10 mm) – Connection weld	86
Abbildung 8.13: 1.4462 (10 mm) – Thermischer Verzug	87
Figure 8.13: 1.4462 (10 mm) – Thermal distortion	87
Abbildung 8.14: 1.4462 (10 mm) – Gefügezusammensetzung	87
Figure 8.14: 1.4462 (10 mm) – Microstructure	87
Abbildung 8.15: 1.4462 (10 mm) – Querkzugversuch nach [131]	88
Figure 8.15: 1.4462 (10 mm) – Transverse tensile acc. [131]	88
Abbildung 8.16: 1.4462 (10 mm) – Kerbschlagbiegetest [131]	89
Figure 8.16: 1.4462 (10 mm) – Charpy impact test acc. [131]	89
Abbildung 8.17: 1.4362 (31 mm) – Verbindungsnaht	90
Figure 8.17: 1.4362 (31 mm) – Connection weld	90
Abbildung 8.18: 1.4362 (31 mm) – Thermischer Verzug	91
Figure 8.18: 1.4362 (31 mm) – Thermal distortion	91
Abbildung 8.19: 1.4362 (31 mm) – Gefügezusammensetzung	91
Figure 8.19: 1.4362 (31 mm) – Microstructure	91
Abbildung 8.20: 1.4462 (10 mm) und 1.4362 (31 mm) – Fügespalt 0,3 mm	93
Figure 8.20: 1.4462 (10 mm) and 1.4362 (31 mm) – Joining gap 0,3 mm	93
Abbildung 8.21: 1.4362 (31 mm) – Versatz 2 mm	94
Figure 8.21: 1.4362 (31 mm) – Misalignment 2 mm.....	94
Abbildung 8.22: 1.4162 (30 mm) – Parameterübertragung	95
Figure 8.22: 1.4162 (30 mm) - Parameter transfer.....	95
Abbildung 8.23: 1.4162 (30 mm) – Referenzparameter	96
Figure 8.23: 1.4162 (30 mm) - Reference parameter plate thickness	96

Abbildung 8.24: 1.4662 und 1.4410 – Übertragung (I) und Referenzparameter (r)...	97
Figure 8.24: 1.4662 and 1.4410 – Transfer (I) and reference parameter set 1 (r).....	97
Abbildung 8.25: 1.4162 (30 mm) – Gefügebeeinfl. durch Druck und Stickstoff.....	98
Figure 8.25: 1.4162 (30 mm) – Influence on the microstr. via pressure and nitrogen	98
Abbildung 8.26: 1.4362 (31 mm) – Gefügebeeinflussung durch Vorwärmen	99
Figure 8.26: 1.4362 (31 mm) – Influence on the microstructure via Preheating.....	99
Abbildung 8.27: 1.4362, 1.4162 und 1.4410 – Verfahrensvergleich: ZfP	100
Figure 8.27: 1.4362, 1.4162 and 1.4410 – Comparison: NDT.....	100
Abbildung 8.28: 1.4162 (30 mm) – Verfahrensvergleich: Querschliff.....	101
Figure 8.28: 1.4162 (30 mm) – Comparison: cross section	101
Abbildung 8.29: Anwendungsbeispiele für Kupfer	102
Figure 8.29: Typical applications for copper	102
Abbildung 8.30: Cu-DHP – Schweißgutauswürfe: Einfluss der Fokusslage.....	104
Figure 8.30: Cu-DHP – Weld Metal Ejection: Influence of the focal position.....	104
Abbildung 8.31: Cu-DHP – Querschliffe: Einfluss der Fokusslage	105
Figure 8.31: Cu-DHP – Cross Sections: Influence of the focal position	105
Abbildung 8.32: Oszillation – Nomenklatur und Geometrie des Strahls	106
Figure 8.32: Oscillation – Nomenclature and Geometry of the beam.....	106
Abbildung 8.33: Cu-DHP – Nahtbreite und Einschweißtiefe bei Strahloszillation....	107
Figure 8.33: Cu-DHP – Weld seam width and penetration depth for beam oscillation....	107
Abbildung 8.34: Cu-DHP – Schweißgutauswürfe: Einfluss der Oszillation.....	108
Figure 8.34: Cu-DHP – Weld Metal Ejections: Influence of the oscillation	108
Abbildung 8.35: Cu-DHP – Querschliffe: Einfluss der Oszillation	109
Figure 8.35: Cu-DHP – Cross Sections: Influence of the oscillation	109
Abbildung 8.36: Cu-DHP – Oszillation: Geschwindigkeit der Dampfkapillare	109
Figure 8.36: Cu-DHP – Oscillation: speed of the vapor capillary	109

Abbildung 8.37: Cu-DHP – Schweißgutauswürfe über Schweißparameter	110
Figure 8.37: Cu-DHP – Weld metal ejections plotted against the welding parameters	110
Abbildung 8.38: Cu-DHP – Porenbildung.....	111
Figure 8.38: Cu-DHP – Porosity.....	111
Abbildung 8.39: Cu-DHP – Einschweißtiefe über Schweißparameter	112
Figure 8.39: Cu-DHP – Penetration depth plotted against the welding parameters	112
Abbildung 8.40: Cu-DHP – Erzielbares Schweißergebnis.....	113
Figure 8.40: Cu-DHP – Attainable welding result.....	113
Abbildung 8.41: Cu-DHP – Optimierung des Endkraters	114
Figure 8.41: Cu-DHP – Optimization of the weld end stop.....	114
Abbildung 8.42: Cu-DHP, Cu-PHC und Cu-OF – Einschw.tiefe und Querschnittsfl. 115	
Figure 8.42: Cu-DHP, Cu-PHC and Cu-OF – pen. depth and cross-sectional area.....	115
Abbildung 8.43: Cu-DHP, Cu-PHC und Cu-OF – Querschliffe.....	115
Figure 8.43: Cu-DHP, Cu-PHC and Cu-OF – Cross sections	115
Abbildung 8.44: Cu-PHC – Einfluss des Arbeitsdrucks	116
Figure 8.44: Cu-PHC – Influence of the working pressure.....	116
Abbildung 8.45: Cu-DHP – Verbindungsschweißungen: Stumpfstoß	118
Figure 8.45: Cu-DHP – Connection welds: butt weld	118
Abbildung 8.46: Cu-PHC – Verbindungsschweißungen: Überlappstoß.....	119
Figure 8.46: Cu-PHC – Connection welds: overlap joint.....	119
Abbildung 8.47: Funktionsmuster: Kupfer-Ronde	120
Figure 8.47: Functional model: copper disc	120
Abbildung 8.48: Funktionsmuster: Kupferband.....	121
Figure 8.48: Functional model: copper band.....	121
Abbildung 8.49: Cu-DHP – EBW vs. LaVa: Einschweißtiefe.....	122
Figure 8.49: Cu-DHP – EBW vs. LaVa: Penetration depth	122
Abbildung 8.50: Cu-DHP – EBW vs. LaVa: Nahtquerschnittsfläche	123
Figure 8.50: Cu-DHP – EBW vs. LaVa: Cross-sectional area of the weld	123

Abbildung 8.51: Cu-DHP –EBW vs. LaVa: Schweißgutauswürfe	124
Figure 8.51: Cu-DHP –EBW vs. LaVa: Weld metal ejections.....	124
Abbildung 8.52: Cu-DHP – EBW vs. LaVa: Querschliffe	125
Figure 8.52: Cu-DHP – EBW vs. LaVa: Cross sections	125
Abbildung 10.1: Strahlvermessung Kugler Optik	134
Figure 10.1: Beam Measurement Kugler Optics	134

III Tabellenverzeichnis

Tabelle 5.1: Chemische Analyse Grundwerkstoff - nichtrostender Stahl 1.4571.....	47
Table 5.1: Chemical analysis base material - stainless steel 1.4571	47
Tabelle 5.2: Duplexwerkstoffe und chem. Zusammensetzung in Massenprozent	48
Table 5.2: Duplex Stainless Steels and chem. composition (mass. fraction)	48
Tabelle 5.3: Übersicht chemische Analyse Grundwerkstoffe – Kupfer	49
Table 5.3: Overview chemical analysis base materials – copper	49
Tabelle 10.1: Übersicht Chemische Analyse Grundwerkstoffe – Duplexstahl	133
Table 10.1: Overview chemical analysis base materials – duplex stainless steel	133
Tabelle 10.2: Schweißparameter Kapitel 7.1.2	136
Table 10.2: Welding parameters chapter 7.1.2	136
Tabelle 10.3: Schweißparameter Kapitel 7.2.1	137
Table 10.3: Welding parameters chapter 7.2.1	137
Tabelle 10.4: Schweißparameter Kapitel 7.2.2	138
Table 10.4: Welding parameters chapter 7.2.2	138
Tabelle 10.5: Schweißparametersätze 1-30 Kapitel 8.2.4	139
Table 10.5: Welding Parametersets 1-30 chapter 8.2.4	139

IV Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

Ar	Argon <i>Argon</i>
ASTM	American Society for Testing and Materials <i>American Society for Testing and Materials</i>
C	Kohlenstoff <i>Carbon</i>
CO ₂	Kohlenstoffdioxid <i>Carbon dioxide</i>
Cr	Chrom <i>Chrome</i>
Cu-DHP	Desoxidiertes Kupfer mit hohem Restphosphorgehalt <i>Deoxidized copper with high content of residual phosphor</i>
Cu-PHC	Desoxidiertes Kupfer mit niedrigem Resphosphoranteil <i>Deoxidised copper with low content of residual phosphor</i>
Cu-OF	Sauerstofffreies Kupfer <i>Oxygenfree copper</i>
DIN	Deutsches Institut für Normung <i>German Institute for Standardisation</i>
EBW	Elektronenstrahlschweißen <i>Electron Beam Welding</i>
EN	Europäische Norm <i>European standard</i>
HV	Härteprüfung nach Vickers <i>Hardness test according Vickers</i>
ISF	Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik <i>Welding and Joining Institute</i>
ISO	Internationale Organisation für Normung <i>International organisation for standardization</i>
kfz	Kubisch-flächenzentriert <i>Face centered cubic</i>
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen <i>Small and medium-sized enterprises (SME)</i>
LASER	Verstärkung von Licht durch stimulierte Emission von Strahlung <i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>

LaVa	Laserstrahlschweißen im Vakuum <i>Laser Beam Welding in Vacuum</i>
LBW	Laserstrahlschweißen <i>Laser Beam Welding</i>
MASER	Verstärkung von Mikrowellenstrahlung durch stimulierte Emission von Strahlung <i>Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
Mo	Molybdän <i>Molybdenum</i>
MSG	Metall-Schutzgas Schweißverfahren <i>Gas metal arc welding (GMAW)</i>
N	Stickstoff <i>Nitrogen</i>
Ni	Nickel <i>Nickel</i>
OES	Optische Emissionsspektrometrie <i>Optical emission spectroscopy</i>
PA	Schweißposition Wannenlage nach DIN EN ISO 6947 <i>Welding position flat position 1G</i>
PB	Schweißposition Horizontal-Vertikal nach DIN EN ISO 6947 <i>Welding position horizontal-vertical 2F</i>
PC	Schweißposition Querposition nach DIN EN ISO 6947 <i>Welding position horizontal position 2G</i>
PF	Schweißposition steigend nach DIN EN ISO 6947 <i>Welding position up 3G</i>
PG	Schweißposition fallend nach DIN EN ISO 6947 <i>Welding position down 3G</i>
PKW	Personenkraftwagen <i>car</i>
RWTH	Rheinisch-Westfälisch Technische Hochschule <i>Rheinisch-Westfälisch Technical University</i>
SPP	Strahlparameterproduct <i>Beam parameter product (BPP)</i>
UV	Ultraviolett <i>Ultra violet</i>
Yb:YAG	Mit Ytterbium dotierter Yttrium-Aluminium-Granat <i>With Yttrium doted Yttrium aluminum garnet</i>

Formelzeichen

α	[]	Absorptionsgrad durch inverse Bremsstrahlung <i>Absorption coefficient by inverse bremsstrahlung</i>
β_R	[]	Rekondensationsfaktor <i>Recondensation factor</i>
Θ_0	[rad]	Halber Öffnungswinkel der Strahlkaustik im Fernfeld <i>Half-angle of aperture in the far field</i>
Θ_f	[rad]	Öffnungswinkel der Strahlkaustik im Fernfeld <i>Angle of aperture in the far field</i>
λ	[nm]	Wellenlänge <i>Wave length</i>
ρ	[kg/m ³]	Dichte <i>Density</i>
γ_o	[N/m]	Oberflächenspannung <i>Surface tension</i>
η_A	[]	Einkoppelgrad <i>Coupling efficiency</i>
η_{th}	[]	Thermische Wirkungsgrad <i>Thermal efficiency</i>
A	[]	Absorptionsgrad <i>Absorption rate</i>
b	[mm]	Gesamtbreite aus Oszillationsweite und Strahldurchmesser <i>Total width of oscillation width and spot diameter</i>
c_p	[kJ/(kg*K)]	Spezifische Wärmekapazität <i>Specific heat capacity</i>
D	[mm]	Durchmesser des kollimierten Strahls <i>Diameter of the collimated beam</i>
E	[kJ/m]	Streckenenergie <i>Energy per length unit</i>
d_f	[mm]	Fokusbereich <i>Focal diameter</i>
d_k	[μ m]	Faserdurchmesser <i>Fibre diameter</i>
E_i	[J]	Ionisierungsenergie <i>Ionisation energy</i>
f	[mm]	Fokuslage <i>Focal position</i>

f_f	[mm]	Fokussierlänge <i>Focal length</i>
f_k	[mm]	Kollimierlänge <i>Collimation length</i>
f_P	[Hz]	Oszillationsfrequenz <i>Frequency of oscillation</i>
H_M	[J]	Schmelzenthalpie <i>Enthalpy of melting</i>
h_M	[J/kg]	Spezifische Schmelzenthalpie <i>Specific enthalpy of melting</i>
I	[kW/mm ²]	Intensität <i>Intensity</i>
M^2	[]	Beugungsmaßzahl <i>Diffraction factor</i>
m	[kg]	Masse <i>Mass</i>
P	[kW]	Laserleistung <i>Laser power</i>
p	[hPa]	Druck <i>Pressure</i>
Δp	[hPa]	Druckdifferenz im Inneren der Dampfkapillare <i>Pressure difference inside the vapor capillary</i>
p_A	[hPa]	Atmosphärendruck <i>Atmospheric pressure</i>
p_{dyn}	[hPa]	Dynamischer Druck <i>Dynamic pressure</i>
p_G	[hPa]	Partialdruck <i>Partial pressure</i>
p_H	[hPa]	Hydrostatischer Druck <i>Hydrostatic pressure</i>
p_R	[hPa]	Rückstoßdruck <i>Recoil pressure</i>
p_{SAT}	[hPa]	Sättigungsdampfdruck <i>Saturation vapor pressure</i>
S	[m ²]	Nahtquerschnitt <i>Cross-sectional area of the weld</i>
SPP	[mm*mrad]	Strahlparameterprodukt <i>Beam parameter product (BPP)</i>

T	[K]	Temperatur <i>Temperature</i>
T ₀	[K]	Ausgangstemperatur <i>Basic temperature</i>
T _O	[K]	Oberflächentemperatur <i>Surface temperature</i>
t	[mm]	Einschweißtiefe <i>Penetration depth</i>
t _t	[s]	Zeiteinheit <i>Time unit</i>
v	[m/min]	Schweißgeschwindigkeit <i>Welding speed</i>
W _M	[J]	Energie zum Erwärmen von Zimmer- auf Schmelztemperatur <i>Energy for heating from room to melting temperature</i>
w	[mm]	Oszillationsweite <i>Width of oscillation</i>
w ₀	[mm]	Radius der Strahltaillie <i>Radius of beam waist</i>
Z _R	[mm]	Rayleighlänge <i>Rayleigh length</i>