

Lichtbogenfügen von Mischverbindungen aus Stahl, Aluminium- und Magnesiumlegierungen

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

vorgelegt von

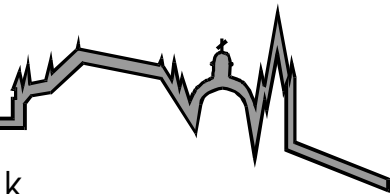
Frank Wilfried Höcker

Berichter: Universitätsprofessor Dr.-Ing. Ulrich Dillthey
 Universitätsprofessor Dr.-Ing. Uwe Reisgen

Tag der mündlichen Prüfung: 26.10.2012

Frank Wilfried Höcker

**Lichtbogenfügen von Misch-
verbindungen aus Stahl, Aluminium-
und Magnesiumlegierungen**



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

Band 2/2013

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, 2012)

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 978-3-8440-2018-2

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

Im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen entstand die vorliegende Dissertation.

Dem einstigen Institutsdirektor, Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulrich Diltthey, gilt mein besonderer Dank für die Überlassung des wissenschaftlichen Freiraumes sowie für seine fachliche und wertvolle Unterstützung bei der Abfassung dieser Arbeit. Insbesondere für seine Geduld möchte ich ihm auf das Herzlichste danken. Des Weiteren gilt mein Dank dem jetzigen Institutsleiter, Herrn Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisgen für die differenzierte Durchsicht der Arbeit und die Übernahme des Berichtes. Den Herren Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hubertus Murrenhoff und Prof. Dr. Lorenz Singheiser danke ich für die Übernahme des Vor- bzw. des Beisitzes der Doktor-Prüfung.

Meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen des gesamten Institutes möchte ich für die tolle Zusammenarbeit, die Unterstützung und vor allem für eine einzigartige Zeit danken. Dies gilt im Besonderen für meine Bürokollegen aus der Libo-Abteilung Herrn Dr.-Ing. Guido Wilms, Dr.-Ing. Dirk Kampffmeyer und Dr.-Ing. Agah Sevim.

Für die sachliche Kritik und fachlichen Anregungen bei der Erstellung dieser Arbeit gilt mein großer Dank Frau Prof. Dr.-Ing. Carolin Radscheit und Herrn Dr.-Ing. Lars Stein. Ferner herzlichen Dank an Frau Gertrud Baumann für die Korrektur der Arbeit und Übersetzung. Meinen studentischen Hilfskräften Herrn Daniel Scharf, Frau Christiane Rowinski, Frau Joanna Kruppa und Herrn Thorsten Kreiner danke ich für die Unterstützung dieser Arbeit während meiner Zeit am Institut. Hilfreich für diese Arbeit waren weiterhin die Beiträge meiner Studien-, Diplom- und Masterarbeiter. Auch ihnen sei gedankt.

Mein größter Dank geht an meine Freundin Sandra Attermeyer, die mir immer Rückhalt gegeben hat und ohne deren Unterstützung und Geduld ich die lange Zeit der Promotion nicht erfolgreich hätte abschließen können

Paderborn, im Juni 2013

Inhaltsverzeichnis*Table of Contents*

1	Einleitung.....	1
2	Problemstellung, Zielsetzung und Lösungsweg.....	4
2.1	Problemstellung.....	4
2.2	Zielsetzung.....	4
2.3	Lösungsweg.....	5
3	Stand der Technik.....	6
3.1	Fügen mit dem Lichtbogen.....	6
3.1.1	MSG-Schweißen/MSG-Löten.....	7
3.1.1.1	Impulslichtbogen.....	8
3.1.1.2	Kurzlichtbogen.....	9
3.1.1.3	Modifizierte Kurzlichtbogenprozesse.....	11
3.1.2	WIG-Schweißen/WIG-Löten.....	13
3.2	Reinigungswirkung des Lichtbogens.....	14
3.3	Tailored Blanks.....	15
3.4	Fügen von Hybridverbindungen.....	17
3.4.1	Mechanisches Fügen.....	18
3.4.1.1	Fügen durch Umformen.....	18
3.4.1.2	Fügen durch Schrauben.....	20
3.4.2	Kleben.....	21
3.4.2.1	Hybridverfahren.....	24
3.4.3	Thermische Verfahren.....	26
3.4.3.1	Laserstrahlschweißen.....	26
3.4.3.2	Elektronenstrahlschweißen.....	28
3.4.3.3	Widerstandsschweißen.....	29
3.4.3.4	Reibschweißen.....	29

3.4.3.5	Lichtbogen.....	31
3.4.4	Metallurgische Betrachtungen zum System Eisen-Aluminium.....	34
3.4.4.1	Binäres Phasendiagramm Fe-Al	36
3.4.4.2	Intermetallische Phasen	38
3.4.4.2.1	Anteil der Legierungselemente im Stahl bzw. Aluminium.....	40
3.4.4.2.2	Zeit-Temperaturverlauf in der Fügezone	40
4	Versuchsaufbau und Werkstoffe.....	44
4.1	Versuchsanlage.....	44
4.1.1	Schweißenergiequellen	44
4.1.1.1	MSG	44
4.1.1.2	WIG	45
4.1.2	Spannvorrichtung, Linearfahrwerk.....	46
4.2	Werkstoffe	47
4.2.1	Grundwerkstoffe	47
4.2.1.1	Stähle	47
4.2.1.2	Aluminiumlegierungen	48
4.2.1.3	Magnesiumlegierungen	50
4.2.2	Zusatzwerkstoffe	51
4.2.2.1	Aluminium-Silizium Basis	52
4.2.2.2	Magnesium- und Zinkbasis	53
4.2.3	Hilfsstoffe.....	57
4.2.3.1	Schutzgase	57
4.2.3.2	Flussmittel	58
4.3	Analyse der Proben	59
4.3.1	Metallographische Auswertung	59
4.3.2	Mechanisch technologische Auswertung.....	59
4.3.2.1	Zugversuche	59

4.3.2.2	Napfzugversuche	60
4.3.3	EDX-Analyse	61
5	Versuchsdurchführung und Auswertung.....	62
5.1	Stahl/Aluminiumlegierungen	62
5.1.1	WIG	62
5.1.1.1	Vorversuche	63
5.1.1.2	Störeinflüsse	71
5.1.1.3	Fügeversuche	74
5.1.1.3.1	Überlappstoß	74
5.1.1.3.2	I-Stoß	83
5.1.1.3.3	I-Naht aus Überlappstoß	84
5.1.1.3.4	Napfzugversuche	89
5.2	Stahl/Magnesiumlegierungen	92
5.2.1	MIG	92
5.2.1.1	Einfluss der Fügeparameter	93
5.2.1.2	Einfluss der Grund- und Zusatzwerkstoffe sowie Hilfsstoffe.....	94
5.2.1.3	Mechanische Prüfung.....	96
5.2.1.4	EDX-Analyse	100
5.2.2	WIG	103
5.2.2.1	Einfluss der Grundwerkstoffe und Hilfsstoffe.....	103
5.2.2.2	Einfluss der Fügeparameter	106
5.2.2.3	Mechanische Prüfung.....	111
5.2.2.4	EDX-Analyse	114
5.3	Aluminium-/Magnesiumlegierungen	116
5.3.1	MSG	116
5.3.1.1	Vorversuche	117
5.3.1.2	Einfluss der Kontaktrohre und des Kontaktrohrabstandes	118

5.3.1.3	Einfluss der Lichtbogenarten.....	118
5.3.1.4	Einfluss der Al-Grundwerkstoffe.....	122
5.3.1.5	Flussmittel.....	123
5.3.1.6	Mechanische Prüfung.....	124
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	127
7	Literatur	131

Bilderverzeichnis

List of Figures

Bild 1: Entwicklungstendenzen im modernen Automobilbau	
<i>Figure 1: Trends in modern automotive industrie</i>	2
Bild 2: Prinzipieller Aufbau MSG-Anlage	
<i>Figure 2: Principle structure of GMA power source</i>	7
Bild 3: Strom- und Spannungsverlauf Impulslichtbogen	
<i>Figure 3: Current and voltage curve of pulse arc</i>	8
Bild 4: Zeitabhängiger Strom- und Spannungsverlauf	
<i>Figure 4: Time dependent current and voltage curve</i>	9
Bild 5: Leistungsbereiche verschiedener Lichtbogenarten	
<i>Figure 5: Working range of various arcs</i>	10
Bild 6: Werkstoffübergang beim Kurzlichtbogen	
<i>Figure 6: Metal transfer of short arc</i>	11
Bild 7: Strom-/Spannungsverlauf beim Drahtpuls	
<i>Figure 7: Current and voltage curve of wire pulsing</i>	12
Bild 8: Prinzipieller Aufbau WIG-Anlage	
<i>Figure 8: Principle structure of TIG power source</i>	14
Bild 9: Prinzipien der Reinigungswirkung	
<i>Figure 9: Principles of the cleaning effect</i>	15
Bild 10: Tailored Blanks	
<i>Figure 10: Tailored Blanks</i>	16
Bild 11: Allgemeine Anforderungen an Fügeverfahren	
<i>Figure 11: General requirements for joining processes</i>	17
Bild 12: Ablauf Halbhohlstanznieten	
<i>Figure 12: Procedure of self piercing riveting (semi-tubular)</i>	19
Bild 13: Ablauf Clinchprozess	
<i>Figure 13: Procedure of clinching process</i>	19
Bild 14: Ablauf FDS-Schrauben	
<i>Figure 14: Procedure of flow drill screwing</i>	21

Bild 15: Aufbau einer Klebung	
<i>Figure 15: Structure of adhesive bonding</i>	23
Bild 16: Prinzip Schweißnieten	
<i>Figure 16: Principle of weld riveting</i>	26
Bild 17: Prinzip des Laserstrahlfügens mit überlagerter Formänderung	
<i>Figure 17: Principle of laserbeam joining with overlaying displacement</i>	27
Bild 18: Verfahrensprinzip Rührreischweißen	
<i>Figure 18: Principle of procedure of friction stir welding</i>	30
Bild 19: Löslichkeitsdiagramm für Aluminium nach Darken und Gurry	
<i>Figure 19: Solubility diagram for aluminium by Darken and Gurry</i>	35
Bild 20: Eisen-Aluminium-Phasendiagramm	
<i>Figure 20: Iron-Aluminium phase diagram</i>	37
Bild 21: Bezeichnungen für die Positionierung des Brenners	
<i>Figure 21: Designations for the positioning of the torch</i>	44
Bild 22: Versuchstand WIG	
<i>Figure 22: TIG test rig</i>	46
Bild 23: Zugversuchsprobe aus AZ31 von Hydro mit Einschluss in der Bruchfläche	
<i>Figure 23: Tensile test specimen of AZ31 (Hydro) with inclusion in the fracture surface</i> ...	50
Bild 24: Phasendiagramm Mg-Al	
<i>Figure 24: Phase diagram Mg-Al</i>	53
Bild 25: Mg-Zn Phasendiagramm	
<i>Figure 25: Phase diagram Mg-Zn</i>	54
Bild 26: Al-Zn Phasendiagramm	
<i>Figure 26: Phase diagram Al-Zn</i>	55
Bild 27: Mg-Al-Zn-System, isothermer Schnitt bei 300°C	
<i>Figure 27: Mg-Al-Zn-system, isothermal section (300°C)</i>	56
Bild 28: Zugprobengeometrie nach DIN EN 10002-1	
<i>Figure 28: Tensile test geometrie according to DIN EN 10002-1</i>	60
Bild 29: Napfzugversuch	
<i>Figure 29: Cupping test</i>	60

Bild 30: WIG-Handschweißung

Figure 30: Manuel TIG trials63

Bild 31: Nahtanfang auf kalten und vorgeheizten Blechen (Oberseite/Wurzel)

Figure 31: Seam start on cold and preheated sheets (top/root)64

Bild 32: Aluminiumstück zum Schutz der Feuerverzinkung

Figure 32: Piece of aluminium for coating protection65

Bild 33: Schmelzbadausbildung im Schweißprozeß

Figure 33: Forming of weldpool during joining process66

Bild 34: Phasenanteile beim SquareWave Lichtbogen

Figure 34: Phase fractions in squarewave arc67

Bild 35: Naht und IMP bei Verwendung des Zusatzwerkstoffes AlSi23

Figure 35: Seam and intermetallic phase by use of AlSi23 as filler metal68

Bild 36: Flussmittelauftrag Stirnkante Stahlblech

Figure 36: Flux application on front edge69

Bild 37: Nahtausbildung ohne Zusatzwerkstoff

Figure 37: Seam formation without filler metal70

Bild 38: Störungen in der Anbindung des Schmelzbades an das Stahlblech

Figure 38: Imperfect connection between weld pool and steel sheet72

Bild 39: Nahtversatz zum Lichtbogen

Figure 39: Seam offset to the arc75

Bild 40: Überlappstoß unter Zugbelastung

Figure 40: Overlapped joint with tensile load77

Bild 41: Deformation des Überlappstoßes im Zugversuch

Figure 41: Deformation of overlapped joint with tensile load77

Bild 42: Gerissene Zugprobe am Überlappstoß

Figure 42: Cracked overlapped joint78

Bild 43: Ansicht des Nahtgrundes einer getrennten Verbindung (B2a)

Figure 43: Seam apperance of a cracked joint (B2a)78

Bild 44: Zugproben A1 (AW-6016; 1,15 mm)

Figure 44: Tension test coupon A1 (AW-6016; 1,15 mm)80

Bild 45: Nahtansicht A1a bei hohen Geschwindigkeiten	
<i>Figure 45: Seam appearance A1a at high joining speed</i>	81
Bild 46: Zugproben B1 (AW-6016 1,5 mm)	
<i>Figure 46: Tension test coupon B1 (AW-6016 1,5 mm)</i>	81
Bild 47: Zugproben B2 (AW-5182, 1,5 mm)	
<i>Figure 47: Tension test coupon B2 (AW-5182, 1,5 mm)</i>	82
Bild 48: Prinzipskizze der Überlappungen (mit und ohne Abkantung)	
<i>Figure 48: Principle of overlapped joint (with and without bending)</i>	84
Bild 49: I-Naht aus überlappender Abkantung	
<i>Figure 49: Square butt joint made from overlapped bending</i>	86
Bild 50: I-Naht aus flächiger Überlappung	
<i>Figure 50: Square butt joint made from planar overlapping</i>	88
Bild 51: Napfzugversuche Materialkombination A1b	
<i>Figure 51: Cupping tests materialcombination A1b</i>	90
Bild 52: Napfzugversuche Materialkombination B1b und B2b	
<i>Figure 52: Cupping tests materialcombination B1b and B2b</i>	91
Bild 53: Einfluss des Brennersversatzes beim Impulslichtbogenprozess	
<i>Figure 53: Influence of torch offset (pulse arc)</i>	93
Bild 54: Einfluss der Beschichtung (oben unbeschichtet, unten feuerverzinkt)	
<i>Figure 54: Influence of coating (above uncoated, below hot-dipped)</i>	95
Bild 55: Festigkeitswerte der Impulslichtbogennähte	
<i>Figure 55: Tensile strength of coupons made with pulse arc</i>	96
Bild 56: Makroschliff und Bruchstelle der Probe I60	
<i>Figure 56: Makrosection and crack of coupon I60</i>	98
Bild 57: Festigkeitswerte ausgewählter Kurzlichtbogennähte	
<i>Figure 57: Tensile strength of coupons made with short arc</i>	98
Bild 58: Makroschliff und Bruchstelle der Probe K22	
<i>Figure 58: Makrosection and crack of coupon K22</i>	100
Bild 59: REM-Aufnahme einer Puls- (I61) und einer Kurzlichtbogenschweißung (K12)	
<i>Figure 59: SEM shot of coupons made by pulse arc (I61) and short arc (K12)</i>	100

Bild 60: Einfluss der beiden AZ31-Bleche (links Fridmann, rechts Hydro)	
<i>Figure 60: Influence of both AZ31-sheets (left Fridmann, rightHydro)</i>	104
Bild 61: Eigenhergestelltes Flussmittel	
<i>Figure 61: Self mixed flux</i>	105
Bild 62: Einfluss der Lichtbogenlänge	
<i>Figure 62: Influence of arc length</i>	106
Bild 63: Einfluss des Brennersversatzes mit oben liegendem Magnesiumblech	
<i>Figure 63: Influence of torch offset with Mg-sheet on top</i>	107
Bild 64: Einfluss des Brennersversatzes mit unten liegendem Magnesiumblech	
<i>Figure 64: Influence of torch offset with Mg-sheet on the underside</i>	108
Bild 65: Anbindungsfehler beim Fügen ohne Zusatzwerkstoff	
<i>Figure 65: Imperfect connection by joining witout filler metal</i>	109
Bild 66: Einfluss des Drahtzuführwinkels beim Überlappstoß mit oben liegendem Magnesiumblech	
<i>Figure 66: Influence of wire supply angle by overlapped joint with Mg-sheet on top</i>	110
Bild 67: Einfluss des Drahtzuführwinkels beim Überlappstoß mit unten liegendem Magnesiumblech	
<i>Figure 67: Influence of wire supply angle by overlapped joint with Mg-sheet on the underside</i>	111
Bild 68: Makroschliffe und Bruchstellen der Proben W10, W45 und W175	
<i>Figure 68: Makrosection and crack of coupon W10, W45 and W175</i>	112
Bild 69: Festigkeitswerte der Überlappstöße mit Magnesiumblech unten	
<i>Figure 69: Tensile strength of overlapped joints with Mg-sheets on the underside</i>	113
Bild 70: Makoschliffe Proben W90-W92	
<i>Figure 70: Makrosection of coupons W90-W92</i>	114
Bild 71: Makro-, Mikroschliff und REM-Aufnahme der Proben W145 und W160	
<i>Figure 71: Makro-, mikrosection and SEM shot of coupon W145 and W160</i>	114
Bild 72: Stumpfstoß AZ-31/EN AW-6016 per Impulslichtbogen (Mg01)	
<i>Figure 72: Butt joint AZ-31/EN AW-6016 by pulse arc (Mg01)</i>	117
Bild 73: Stumpfstoß AZ-31/EN AW-5182 per Kurzlichtbogen (Mg65)	
<i>Figure 73: Butt joint AZ-31/EN AW-5182 by short arc (Mg65)</i>	117

Bild 74: Verschweißung des ZnAl4-Drahts bei unterschiedlichen Kontaktrohren	
<i>Figure 74: Sticking of ZnAl4-filler metal with various contact tips</i>	118
Bild 75: Impulslichtbogen mit ZnAl4 (Mg33)	
<i>Figure 75: Pulse arc with ZnAl4 (Mg33)</i>	119
Bild 76: Kurzlichtbogen (Mg66)	
<i>Figure 76: Short arc (Mg66)</i>	120
Bild 77: AZ-31 - EN AW-5182 per Impulslichtbogen	
<i>Figure 77: AZ-31 - EN AW-5182 by pulse arc</i>	121
Bild 78: AZ-31 - EN AW-5182 per Kurzlichtbogen	
<i>Figure 78: AZ-31 - EN AW-5182 by short arc</i>	122
Bild 79: Makroschliff AZ31 - EN AW-6016 (Mg30)	
<i>Figure 79: Makrosection AZ31 - EN AW-6016 (Mg30)</i>	123
Bild 80: Zugfestigkeiten AZ31 – Aluminiumlegierungen	
<i>Figure 80: Tensile strength of joints between AZ31 – aluminium alloys</i>	124
Bild 81: Makroschliff Bruchursache	
<i>Figure 81: Makrosection showing reason for cracking</i>	124
Bild 82: AZ31 - EN AW-6016 mit geringer Aufschmelztemperatur des Mg-Grundwerkstoffs	
<i>Figure 82: AZ31 - EN AW-6016 with low melting of Mg-base metal</i>	125

Tabellenverzeichnis*List of Tables*

Tabelle 1: Eigenschaften der Elemente

Table 1: Properties of the elements36

Tabelle 2: Eigenschaften der stabilen intermetallischen Phasen und Überstrukturen im Eisen-Aluminium-System

Table 2: Properties of the stable intermetallic phases and superstructures in the iron-aluminum system38

Tabelle 3: Physikalische Eigenschaften von Aluminium, Eisen und Magnesium

Table 3: Physical properties of aluminium, iron and magnesium47

Tabelle 4: Physikalische und chemische Eigenschaften der Versuchsstähle

Table 4: Physical and chemical properties of tested steels.....48

Tabelle 5: Physikalische Eigenschaften und chemische Zusammensetzung der Al-Legierungen

Table 5: Physical properties and chemical composition of the aluminium-alloys49

Tabelle 6: Physikalische Eigenschaften und chemische Zusammensetzung der Mg-Legierungen

Table 6: Physical properties and chemical composition of the magnesium-alloys.....51

Tabelle 7: Physikalische Eigenschaften und chemische Zusammensetzung der Al-Basis Zusatzwerkstoffe

Table 7: Physical properties and chemical composition of filler metals based on aluminium52

Tabelle 8: Physikalische Eigenschaften und chemische Zusammensetzung der Mg-Basis und Zn-Basis Zusatzwerkstoffe

Table 8: Physical properties and chemical composition of filler metals based on magnesium and zinc57

Tabelle 9: Flussmittel BrazeTec 30/70 und 32/80

Table 9: Flux BrazeTec 30/70 and 32/8058

Tabelle 10: Chemische Zusammensetzung für Magnesiumflussmittel

Table 10: Chemical composition of flux for magnesium.....58

Tabelle 11: Deklaration der Proben

Table 11: Declaration of the samples.....74

Tabelle 12: Intermetallische Phasen am Überlappstoß A1b	
<i>Table 12: Intermetallic phases on the overlapped joint A1b</i>	76
Tabelle 13: Parameter der Zugversuchsproben zu Bild 55	
<i>Table 13: Parameters of the tensile test specimens to figure 55</i>	97
Tabelle 14: Schweißparameter der Zugversuchsproben zu Bild 57	
<i>Table 14: Parameters of the tensile test specimens to figure 57</i>	99
Tabelle 15: Messwerte in Masseprozent [m%] der Impulslichtbogennaht I61	
<i>Table 15: Values in mass percent [m%] of joint I61</i>	101
Tabelle 16: Messwerte in Massenprozent [m%] der Kurzlichtbogennaht K12	
<i>Table 16: Values in mass percent [m%] of joint K12</i>	102
Tabelle 17: EDX-Messwerte in Massenprozent [m%] der Probe W145	
<i>Table 17: EDX-values in mass percent [m%] of joint W145</i>	115
Tabelle 18: EDX-Messwerte in Massenprozent [m%] der Probe W160	
<i>Table 18: EDX-values in mass percent [m%] of joint W160</i>	115

Formel-, Symbol- und Abkürzungsverzeichnis*List of Symbols and Abbreviations*

A	Ampere	<i>ampere</i>
AC	Wechselstrom ()	<i>alternate current</i>
AG	Aktiengesellschaft	<i>corporation</i>
Al	Aluminium	<i>aluminium</i>
Ar	Argon	<i>argon</i>
at. %	Atom-Prozent	<i>atom percentage</i>
B	Breite	<i>width</i>
Be	Beryllium	<i>beryllium</i>
bzw.	beziehungsweise	<i>respectively</i>
°C	Grad Celsius	<i>degree centigrade</i>
C	Kohlenstoff	<i>carbon</i>
c	spezifische Wärmekapazität	<i>specific heat capacity</i>
CaCl ₂	Calciumchlorid	<i>calcium chloride</i>
Cd	Cadmium	<i>cadmium</i>
cm	Zentimeter	<i>centimetre</i>
cm ³	Kubikzentimeter	<i>cubic centimetre</i>
CMT	Cold Metal Transfer	<i>Cold Metal Transfer</i>
CO ₂	Kohlendioxid	<i>carbon dioxide</i>
CP	Cold Process	<i>Cold Process</i>
Cr	Chrom	<i>chrome</i>
CSC	Control Short Curcuit	<i>Control Short Curcuit</i>
Cu	Kupfer	<i>copper</i>
d.h.	das heißt	<i>meaning</i>
DIN	Deutsche Industrienorm	<i>German industrial standard</i>

d_{St}	Stempeldurchmesser	<i>punch diameter</i>
EDX	energiedispersive Röntgenspektroskopie	<i>energy-dispersive X-ray microanalysis</i>
EN	europäische Norm	<i>European standard</i>
f	Frequenz	<i>frequency</i>
F	Kraft	<i>force</i>
FDS	Fließformschraube	<i>Flow-Drill-Screw</i>
Fe	Eisen	<i>iron</i>
g	Gramm	<i>gram</i>
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung	<i>Limited Liability Companies Act</i>
H	Höhe	<i>height</i>
He	Helium	<i>helium</i>
HV	Härte Vickers	<i>Vickers hardness</i>
hz	Hertz	<i>hertz</i>
I_{eff}	Effektivstrom	<i>effective current</i>
I_G	Grundstrom	<i>base current</i>
I_{krit}	kritischer Strom	<i>critical current</i>
IMP	intermetallische Phase	<i>intermetallic phase</i>
I_P	Impulsstrom	<i>impulse current</i>
ISF	Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik	<i>Welding and Joining Institute, RWTH Aachen University</i>
I_T	Triggerstrom	<i>trigger current</i>
K	Kelvin	<i>Kelvin</i>
Kap.	Kapitel	<i>chapter</i>
kfz	kubisch-flächenzentriert	<i>face-centered cubic</i>
kg	Kilogramm	<i>kilogram</i>

kg/dm ³	Kilogramm pro Kubikdezimeter	<i>kilogram per cubic decimetre</i>
kg/m ³	Kilogramm pro Kubikmeter	<i>kilogram per cubic metre</i>
kN	Kilonewton	<i>kilo Newton</i>
krz	kubisch-raumzentriert	<i>body-centered cubic</i>
L	Länge	<i>length</i>
l	Liter	<i>litre</i>
li.	links	<i>left</i>
LiCl	Lithiumchlorid	<i>lithium chloride</i>
LM	Leichtmetall	<i>light metal</i>
m	Meter	<i>metre</i>
M	Masse	<i>mass</i>
MAG	Metall-Aktivgas	<i>metal active gas</i>
Masse-%	Masse-Prozent	<i>mass percentage</i>
max.	maximal	<i>maximum</i>
Mg	Magnesium	<i>magnesium</i>
MIG	Metall-Inertgas	<i>metal inert gas</i>
min	Minute	<i>minute</i>
mm	Millimeter	<i>millimetre</i>
mm ²	Quadratmillimeter	<i>square millimetre</i>
Mn	Mangan	<i>manganese</i>
Mo	Molybdän	<i>molybdenum</i>
Mol-%	Mol-Prozent	<i>mol percentage</i>
MPa	Megapascal	<i>megapascal</i>
Mrd.	Milliarde	<i>billion</i>
ms	Millisekunde	<i>millisecond</i>
MSG	Metall-Schutzgas	<i>metal shielding gas</i>

N	Newton	<i>newton</i>
NaCl	Natriumchlorid	<i>sodium chloride</i>
Ni	Nickel	<i>nickel</i>
O ₂	Sauerstoff	<i>oxygen</i>
P	Leistung	<i>power</i>
Pb	Blei	<i>lead</i>
PKW	Personenkraftwagen	<i>car</i>
re.	rechts	<i>right</i>
REM	Raster-Elektronenmikroskop	<i>scanning electron microscope</i>
R _m	Zugfestigkeit	<i>tensile strength</i>
RP _{0,2}	Spannungs-Dehngrenze 0,2%	<i>tensile yield stress</i>
S	Schwefel	<i>sulphur</i>
SEW	Stahl-Eisen-Werkstoffblatt	<i>steel-iron-data sheet</i>
Si	Silizium	<i>silicon</i>
Sn	Zinn	<i>tin</i>
St	Stahl	<i>steel</i>
STT	Surface Tension Transfer	<i>Surface Tension Transfer</i>
T	Temperatur	<i>temperature</i>
t _G	Grundzeit	<i>base time</i>
Ti	Titan	<i>titanium</i>
TM	Transition Materials	<i>Transition Materials</i>
t _p	Pulszeit	<i>pulse time</i>
TP	Teilprojekt	<i>sub-project</i>
TWI	The Welding Institut	<i>The Welding Institut</i>
u.a.	unter anderem	<i>among other things</i>
ULSAB	Forschungsprojekt	<i>research project</i>

UP	Pulsspannung	<i>pulse voltage</i>
UV	ultraviolett	<i>ultraviolet</i>
V	Volt	<i>volt</i>
v. Chr.	vor Christus	<i>before Christ</i>
v_D	Drahtvorschubgeschwindigkeit	<i>wire feeding speed</i>
vgl.	vergleiche	<i>compare</i>
V_s	Schweißgeschwindigkeit	<i>welding speed</i>
vs.	versus	<i>versus</i>
WEZ	Wärmeeinflusszone	<i>heat effected zone</i>
WGS	Wolfram-Schutzgas	<i>tungsten shielding gas</i>
WIG	Wolfram-Inertgas	<i>tungsten inert gas</i>
z.B.	zum Beispiel	<i>exempli gratia</i>
Zn	Zink	<i>zinc</i>
+Z	Symbol für Feuerverzinkung	<i>hot-dip galvanized</i>
+ZF	Symbol für galvanische Verzinkung	<i>electro galvanized</i>
λ	Wärmekapazität	<i>heat capacity</i>
μm	Mikrometer	<i>micrometre</i>
φ	Dichte	<i>density</i>
β	Ziehverhältnis	<i>drawing ratio</i>
σ	elektrische Leitfähigkeit	<i>electrical conductivity</i>
λ	spezifische Wärmeleitfähigkeit	<i>specific thermal conductivity.</i>
Ω	elektrischer Widerstand	<i>electrical resistance</i>
~	ungefähr	<i>roughly</i>
$\varnothing$	Durchmesser	<i>diameter</i>

Abstract

In the present dissertation "Arc welding of dissimilar material joints made of steel, aluminium and magnesium alloys", the fundamental research in the field of thermal and firmly-bonded joining of hybrid joints is considered. The used energy source is the arc (GMA and TIG).

The problems in the thermal and firmly bonded joining of these metals lie in the low or not existing reciprocal solid solubility of the metals, in the formation of brittle intermetallic phases and in the different mechanical and technological properties of the joining partners.

For this purpose, the melting of at least one joining partner shall be reduced to a minimum. Further, the development of the undesired intermetallic phases shall be reduced insofar as it is possible to produce braze welds between steel and aluminium alloys. This is to be guaranteed via a defined process and temperature control.

The two arc processes "metal inert gas" (MIG) and "tungsten inert gas" (TIG) are considered. The advantage of the TIG method compared with the MIG method is the separation of the energy input and the filler material. In this dissertation, individual factors are, firstly, specifically considered and their influence on the joining properties is defined and analysed. The influential factors which are thoroughly analysed are, among others, the base materials, the filler materials, the auxiliary materials, but also the heat control and the weld shape.

Based on those findings, the joints between steel and aluminium alloys will be optimised with regard to their requirement profile. One of the demands made to the joint is the high mechanical strength of the weld. Another demand is the weld shape which should be optimal for forming. These requirements are, partially, contradictory. Re-forming involves a flat seam, high mechanical strength involves higher weld reinforcement. The properties of the joints will be determined by extensive testing (tensile and cupping tests).

For the joints between steel and magnesium alloys, also the individual factors and their influence are, firstly, considered. Joints are produced using the MIG method and also the TIG method. Both methods allow the achievement of similar mechanical and technological properties. To this end, the respective tests have been carried out and subsequently analysed (tensile tests, EDX analyses).

Due to the melting points of aluminium and magnesium alloys which lie in a similar range, both of these materials are locally molten during joining. As a possible solution of this

problem, a filler metal on a zinc-basis is applied. Zinc possesses sufficient solubility, as far as aluminium and also magnesium are concerned. The melting point of zinc alloys is, moreover, clearly lower than in aluminium and magnesium alloys. Thus, the base materials are molten only to a minor degree. Using the MIG method, 50% of the strength of the base materials are achieved.

The investigations show the application potential of the arc for hybrid joints. This applies in particular to joints of steel/aluminium alloys. This material pair possesses a high application potential for the industry. However, the respective boundary conditions must be taken into consideration, even more than this has to be done in the case of similar joints. It has been possible to work out first solution approaches in the joining of magnesium alloys. Further basic research is, however, required.