

Christian Brückner

**MIG-Schweißen
von Aluminium-
werkstoffen im
Fahrzeugbau**

**Eine technologische
Untersuchung**

Christian Brückner
MIG-Schweißen von Aluminiumwerkstoffen im Fahrzeugbau
Eine technologische Untersuchung

IGEL Verlag

Christian Brückner
MIG-Schweißen von Aluminiumwerkstoffen im Fahrzeugbau
Eine technologische Untersuchung

1. Auflage 2009 | ISBN: 978-3-86815-396-5

© IGEL Verlag GmbH, 2009. Alle Rechte vorbehalten.

Dieses eBook wurde nach bestem Wissen und mit größtmöglicher Sorgfalt erstellt. Im Hinblick auf das Produkthaftungsgesetz weisen Autoren und Verlag darauf hin, dass inhaltliche Fehler und Änderungen nach Drucklegung dennoch nicht auszuschließen sind. Aus diesem Grund übernehmen Verlag und Autoren keine Haftung und Gewährleistung. Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr.

Inhaltsverzeichnis

Tabellen und Abbildungen	V
Abkürzungsverzeichnis	IX
Formelverzeichnis	XII
1 Einleitung	1
1.1 Firmenportrait	1
1.1.1 Historische Entwicklung	1
1.1.2 Das Unternehmen	1
1.1.3 Marken	1
1.1.4 Innovationen	2
1.2 Standort Dingolfing	2
1.2.1 Allgemein	2
1.2.2 Fertigungsbereiche	3
1.2.3 Abteilung TA-3	4
2 Stand der Technik	6
2.1 Werkstoff - Aluminium	6
2.1.1 Grundlagen	6
2.1.1.1 Allgemein	6
2.1.1.2 Gewinnung	6
2.1.1.3 Eigenschaften	7
2.1.1.4 Oxidschicht	7
2.1.2 Legierungen	8
2.1.2.1 Allgemein	8
2.1.2.2 Nichtaushärtbare Legierungen	9
2.1.2.3 Aushärtbare Legierungen	9
2.1.2.4 Knetlegierungen	9
2.1.2.5 Gusslegierungen	10
2.1.3 Schweißseignung	10
2.1.3.1 Allgemein	10
2.1.3.2 Oberfläche	10
2.1.3.3 Wasserstofflöslichkeit	11
2.1.3.4 Porenbildung	12
2.1.3.5 Kerbempfindlichkeit	12
2.1.3.6 Entfestigung	12
2.1.3.7 Rissneigung	12
2.1.3.8 Korrosion	13
2.2 Grundlagen - Schweißen	13
2.2.1 Allgemein	13
2.2.2 Einteilung	14

2.2.3 Schweißbarkeit	15
2.2.4 Schweißanordnungen	16
2.2.4.1 Schweißpositionen	16
2.2.4.2 Stöße und Nähte	16
2.2.4.3 Brennerstellung	17
2.3 MIG-Schweißprozess	18
2.3.1 Allgemein	18
2.3.2 Schutzgase	20
2.3.3 Vorgänge im Lichtbogen	23
2.3.4 Werkstoffübergang	23
2.3.5 Lichtbogenarten	25
2.3.6 Impulslichtbogen	26
2.3.6.1 Allgemein	27
2.3.6.2 DC-Impulslichtbogen	27
2.3.6.3 DCo-Impulslichtbogen	27
2.3.6.4 AC-Impulslichtbogen	28
2.3.7 Stromquelle	29
2.3.7.1 Allgemein	29
2.3.7.2 Analoge Regelung	30
2.3.7.3 Primärtaktung	30
2.3.7.4 Sekundärtaktung	31
2.3.7.5 Vollständige Digitalisierung	31
3 Praktische Voruntersuchung	33
3.1 Allgemein	33
3.2 Gasoptimierung	33
3.2.1 Erläuterung	33
3.2.2 Schweißnähte	33
3.2.3 Auswertung	37
3.3 Brenneroptimierung	37
3.3.1 Erläuterung	37
3.3.2 Schweißnähte	39
3.3.3 Auswertung	41
4 Praktische Hauptuntersuchung	42
4.1 Problematik	42
4.1.1 Aufgabenstellung	42
4.1.2 Stromversorgungskabel	42
4.1.3 Theoretische Grundlagen	44
4.1.3.1 Strom und Spannung	44
4.1.3.2 Gleich- und Wechselstromnetze	44
4.1.3.3 Reihenschaltung	45

4.1.4 Theoretische Berechnung	45
4.1.4.1 Ohmscher Widerstand	45
4.1.4.2 Induktiver Widerstand	46
4.1.4.3 Auswertung	47
4.2 Versuchsanlage	47
4.2.1 Schweißbrenner	47
4.2.2 Stromquelle	48
4.2.3 Steuereinheit	49
4.2.4 Gasanschluss	50
4.2.5 Drahtabwicklung	50
4.2.6 Messwerterfassung	51
4.2.7 Messung und Messbereich	52
4.2.8 Messwertcharakter	53
4.2.8.1 Allgemein	53
4.2.8.2 Spitzenwert	54
4.2.8.3 Effektivwert	54
4.2.9 Weitere Untersuchungen	54
4.3 Versuchswerkstoffe	55
4.3.1 AlSi5 - Zusatzwerkstoff	55
4.3.2 AlMg3 - Grundwerkstoff	56
4.3.3 Reinigungsprozess	56
4.4 Schweißkonfigurationen	57
4.4.1 Erläuterung	57
4.4.2 Übersicht	58
4.5 Schweißparameter	58
4.5.1 Erläuterung	58
4.5.2 Drahtvorschub	62
4.5.3 Gasvorströmzeit	62
4.5.4 Leistungs- und Impulsparameter	63
4.5.4.1 Brennvorschub [v_B]	63
4.5.4.2 Drahtvorschub [v_D]	63
4.5.4.3 Impulsfrequenz [f_P]	64
4.5.4.4 Grundstromphase [I_G & U_G]	64
4.5.4.5 Impulsstromphase [I_P & U_P]	64
4.5.4.6 Impulszeit [t_P]	64
4.5.5 Stromfläche und Lichtbogenlänge	65
4.6 Impulsform	65
4.6.1 Erläuterung	65
4.6.2 Einstellungen	67
4.6.3 Analoge und Digitale Signale	71

4.7 Lichtbogenlängenregelung	72
4.7.1 Erläuterung	72
4.7.2 Regelung	72
4.7.3 U/I-Regelung	73
4.7.4 I/I-Regelung	74
4.8 Prozessregler	74
4.8.1 RPA-Datei	74
4.8.2 Kurzschlussbehandlung	75
4.8.2.1 Erläuterung	75
4.8.2.2 Wirkungsprinzip	76
4.8.2.3 Deaktivierung	77
4.8.3 L-Kennlinienregler	77
4.8.3.1 Erläuterung	77
4.8.3.2 Wirkungsprinzip	78
4.8.3.3 Deaktivierung	78
5 Versuchsauswertung	80
5.1 U/I-Regelung - Übersicht1:	80
5.1.1 Erläuterung	80
5.1.2 Grundkonfigurationen: [U/I]	80
5.1.3 Feste Prozessparameter - 15m gewickelt	85
5.1.4 Kompensierte Prozessparameter - 15m gewickelt	90
5.2 U/I-Regelung - Übersicht2	95
5.2.1 Feste Prozessparameter - Massekabeländerung	95
5.2.2 Massekabeländerung - Analog KSB	99
5.2.3 Massekabeländerung - Analog NoKSB	108
5.3 I/I-Regelung - Übersicht	111
5.3.1 Grundkonfigurationen: [I/I]	111
5.3.2 Massekabeländerung - Digital NoKSB	112
5.3.3 Massekabeländerung - Digital KSB	117
6 Zusammenfassung	121
7 Fazit	125
Anlagen	126
Literaturverzeichnis	130

Abbildungsverzeichnis

Abbildung-001: Werk 2.1, Dingolfing	3
Abbildung-002: Presswerk	4
Abbildung-003: Rohbau	4
Abbildung-004: Lackiererei	4
Abbildung-005: Montage [1]	4
Abbildung-006: Fahrwerks- und Antriebskomponenten	5
Abbildung-007: Bayer-Prozess	7
Abbildung-008: Schmelzflusselektrolyse	7
Abbildung-009: Wasserstofflöslichkeit	11
Abbildung-010: Fertigungsverfahren nach DIN 8580	14
Abbildung-011: Fügeverfahren nach DIN 8593	14
Abbildung-012: Schweißverfahren nach DIN 1910	15
Abbildung-013: Schweißbarkeit	16
Abbildung-014: Brennerstellung - Längs zur Naht	18
Abbildung-015: MSG-Schweißprozess	19
Abbildung-016: Einbrand - Argon	22
Abbildung-017: Einbrand - Helium	22
Abbildung-018: Kräfte im Lichtbogen	24
Abbildung-019: Lichtbogenvorgänge	25
Abbildung-020: Leistungsbereich	26
Abbildung-021: DC-Lichtbogen - [IG +]	28
Abbildung-022: DCo-Lichtbogen - [IG +/o]	28
Abbildung-023: AC-Lichtbogen - [IG +/o/-]	29
Abbildung-024: Einteilung Transistorstromquellen	30
Abbildung-025: Schweißnahtpositionen	33
Abbildung-026: Optimierungsversuche	33
Abbildung-027: Schliffbilder ₁ - [Nahtquerschnittsfläche]	34
Abbildung-028: Schliffbilder ₂ - [Nahtquerschnittsfläche]	35
Abbildung-029: Schliffbilder ₃ - [Nahtquerschnittsfläche]	36
Abbildung-030: Schliffbilder - [a-Maß]	36
Abbildung-031: Visueller Eindruck	37
Abbildung-032: Brenner & Schweißnahtposition	38
Abbildung-033: Visueller Eindruck	39
Abbildung-034: Visueller Eindruck und Schliffbilder	40
Abbildung-035: Schliffbilder - [a-Maß]	41
Abbildung-036: Stromversorgungskabel	43
Abbildung-037: Massekabelkonfiguration	44
Abbildung-038: Ohmsche & Induktive Widerstände	45

Abbildung-039: Brenner - CLOOS	48
Abbildung-040: Stromquelle	49
Abbildung-041: Hauptplatine [K2/K3]	49
Abbildung-042: Brenner [Pull]	50
Abbildung-043: Probeblech	50
Abbildung-045: Steuereinheit	51
Abbildung-044: Drahtwicklung[Push]	50
Abbildung-046: Gasanschluss	51
Abbildung-047: Analysator-Hannover	52
Abbildung-048: Hall-Sensor	52
Abbildung-049: Messbereich der Versuchsreihen	53
Abbildung-050: LEICA-Mikroskop	54
Abbildung-051: KODAK-Kamera	54
Abbildung-052: Schliffbild	55
Abbildung-053: Tropfenablösung	55
Abbildung-054: Schweißkonfigurationen U/I	58
Abbildung-055: Schweißkonfigurationen I/I	58
Abbildung-056: Sehr schlechte Schweißnaht	60
Abbildung-057: Sehr gute Schweißnaht	60
Abbildung-058: Reinigungszone	60
Abbildung-059: Struktur-Blechoberfläche	60
Abbildung-060: Struktur-Reinigungszone	60
Abbildung-061: Schweißparameter	61
Abbildung-062: Blechabmessungen	62
Abbildung-063: $vD_1 = 4,0\text{m}/\text{min}$	62
Abbildung-064: $vD_2 = 3,0\text{m}/\text{min}$	62
Abbildung-065: Gasvorströmzeit	63
Abbildung-066: Impulsformerzeugung - U/I-Regelung	66
Abbildung-067: Impulsformerzeugung - I/I-Regelung	67
Abbildung-068: Erläuterung der Diagramme	69
Abbildung-069: Impulsformen - U/I Analog KSB	70
Abbildung-070: Impulsformen - U/I Digital KSB	70
Abbildung-071: Impulsformen - I/I Digital KSB	71
Abbildung-072: ΔI -Regelung	73
Abbildung-073: ΔU -Regelung	74
Abbildung-074: CompactFlash auf der Hauptplatine der Schweißstromquelle	75
Abbildung-075: K2 mit festen PP 5m normal - Schweißnähte	82
Abbildung-076: K2 mit festen PP 5m normal - Strom & Spannung	82
Abbildung-077: K3 mit festen PP 5m normal - Schweißnähte	83
Abbildung-078: K3 mit festen PP 5m normal - Strom & Spannung	83

Abbildung-079: K2/K3 mit festen PP - Schliffbilder der Grundkonfigurationen	84
Abbildung-080: K2/K3 mit festen PP - Stromflächen der Grundkonfigurationen	85
Abbildung-081: K2 mit festen PP 15m gewickelt - Schweißnähte	86
Abbildung-082: K2 mit festen PP 15m gewickelt - Strom & Spannung	87
Abbildung-083: K3 mit festen PP 15m gewickelt - Schweißnähte	88
Abbildung-084: K3 mit festen PP 15m gewickelt - Strom & Spannung	89
Abbildung-085: K2 mit festen PP 15m gewickelt - Stromflächen	89
Abbildung-086: K3 mit festen PP 15m gewickelt - Stromflächen	90
Abbildung-087: K2 mit kompensierten PP 15m gewickelt - Schweißnähte	91
Abbildung-088: K2 mit kompensierten PP 15m gewickelt - Strom & Spannung	92
Abbildung-089: K3 mit kompensierten PP 15m gewickelt - Schweißnähte	92
Abbildung-090: K3 mit kompensierten PP 15m gewickelt - Strom & Spannung	93
Abbildung-091: K2 mit kompensierten PP 15m gewickelt - Stromflächen	94
Abbildung-092: K3 mit kompensierten PP 15m gewickelt - Stromflächen	95
Abbildung-093: K2 mit festen PP Analog NoKSB - Strom & Spannung	96
Abbildung-094: K2 mit festen PP Analog KSB - Strom & Spannung	96
Abbildung-095: K2 mit festen PP Digital NoKSB - Strom & Spannung	97
Abbildung-096: K2 mit festen PP Digital KSB - Strom & Spannung	97
Abbildung-097: K3 mit festen PP Analog NoKSB - Strom & Spannung	98
Abbildung-098: K3 mit festen PP Analog KSB - Strom & Spannung	98
Abbildung-099: K3 mit festen PP Digital NoKSB - Strom & Spannung	99
Abbildung-100: K3 mit festen PP Digital KSB - Strom & Spannung	99
Abbildung-101: K2 mit festen PP - Schweißnähte	100
Abbildung-102: K3 mit festen PP - Schweißnähte	101
Abbildung-103: K2 mit festen PP - Strom & Spannung	101
Abbildung-104: K3 mit festen PP - Strom & Spannung	102
Abbildung-105: K2/K3 mit festen PP - Stromflächen	103
Abbildung-106: K2/K3 mit festen PP – Schliffbilder	103
Abbildung-107: K2/K3 mit festen PP - Häufigkeitsverteilung IS & US	104
Abbildung-108: K2 mit kompensierten PP – Schweißnähte	104
Abbildung-109: K3 mit kompensierten PP – Schweißnähte	105
Abbildung-110: K2 mit kompensierten PP - Strom & Spannung	105
Abbildung-111: K3 mit kompensierten PP - Strom & Spannung	106
Abbildung-112: K2/K3 mit kompensierten PP - Stromflächen	107
Abbildung-113: K2/K3 mit kompensierten PP – Schliffbilder	107
Abbildung-114: K2/K3 mit kompensierten PP - Häufigkeitsverteilung IS & US	108
Abbildung-115: K3 mit festen PP Analog NoKSB – Schliffbilder	109
Abbildung-116: K3 mit festen PP Analog NoKSB - Schweißnähte	109
Abbildung-117: K3 mit festen PP Analog NoKSB - Strom & Spannung	110
Abbildung-118: K3 mit festen PP Analog NoKSB - Häufigkeitsverteilung IS & US	110

Abbildung-119: K ₃ mit festen PP Analog NoKSB - Stromflächen	111
Abbildung-120: I/I Grundkonfigurationen - Strom & Spannung	112
Abbildung-122: I/I mit festen PP Digital NoKSB - Strom & Spannung	113
Abbildung-123: I/I mit kompensierten PP Digital NoKSB - Strom & Spannung	114
Abbildung-124: I/I Digital NoKSB - Schweißnähte	115
Abbildung-125: I/I Digital NoKSB – Schliffbilder	116
Abbildung-126: I/I Digital NoKSB - Häufigkeitsverteilung IS & US	116
Abbildung-127: I/I Digital NoKSB - Stromflächen	116
Abbildung-128: I/I mit festen PP Digital KSB - Strom & Spannung	118
Abbildung-129: I/I mit kompensierten PP Digital KSB - Strom & Spannung	118
Abbildung-130: I/I Digital KSB - Schweißnähte	119
Abbildung-131: I/I Digital KSB - Schliffbilder	119
Abbildung-132: I/I Digital KSB - Häufigkeitsverteilung IS & US	120
Abbildung-133: I/I Digital KSB - Stromflächen	120
Abbildung-134: KSB mit festen PP 15m gewickelt – Schweißnähte	124
Abbildung-135: I/I - Neuer Stand	124
Abbildung-136: U/I - Alter Stand	124
Abbildung-137: Alle Optimierungen [Alter und Neuer Stand]	125

Tabellenverzeichnis

Tabelle-01: Eigenschaften - Aluminium und Eisen	8
Tabelle-02: Schweißpositionen und Nähte [ISO 6947]	17
Tabelle-03: Beispiele für Nähte und Stöße	18
Tabelle-04: Aktivgaszumischungen	20
Tabelle-05: Eigenschaften - Argon	21
Tabelle-06: Eigenschaften - Helium	22
Tabelle-07: Lichtbogenarten	26
Tabelle-08: Stromquelle - Datenblatt	49
Tabelle-09: Mechanische Eigenschaften [AlSi5]	55
Tabelle-10: Chemische Zusammensetzung in % [AlSi5]	56
Tabelle-11: Mechanische Eigenschaften [AlMg3]	56
Tabelle-12: Chemische Zusammensetzung in % [AlMg3]	56
Tabelle-13: Basisparameter	61
Tabelle-14: Impulsformen - U/I-Regelung	68
Tabelle-15: Impulsformen - I/I-Regelung	68
Tabelle-16: Prozessregler - Kurzschlussbehandlung	77
Tabelle-17: Prozessregler - L-Kennlinienregler	78
Tabelle-18: Diagramme - Übersicht ₁ [U/I-Regelung]	80
Tabelle-19: K ₂ mit festen PP 5m normal - Messwerte	81
Tabelle-20: K ₃ mit festen PP 5m normal - Messwerte	82
Tabelle-21: K ₂ mit festen PP 15m gewickelt - Messwerte	86
Tabelle-22: K ₃ mit festen PP 15m gewickelt - Messwerte	88
Tabelle-23: K ₂ mit kompensierten PP 15m gewickelt - Messwerte	91
Tabelle-24: K ₃ mit kompensierten PP 15m gewickelt - Messwerte	92
Tabelle-25: Diagramme - Übersicht ₂ [U/I-Regelung]	95
Tabelle-26: K ₂ mit festen PP - Messwerte	100
Tabelle-27: K ₃ mit festen PP - Messwerte	100
Tabelle-28: K ₂ mit kompensierten PP - Messwerte	104
Tabelle-29: K ₃ mit kompensierten PP - Messwerte	105
Tabelle-30: K ₃ mit festen PP Analog NoKSB - Messwerte	109
Tabelle-31: Diagramme - Übersicht [I/I-Regelung]	111
Tabelle-32: I/I Digital NoKSB - Messwerte	114
Tabelle-33: I/I Digital KSB - Prozessparameter	119
Tabelle-34: U/I-Regelung - Zusammenfassung	123
Tabelle-35: I/I-Regelung - Zusammenfassung	123
Tabelle-36: U/I-Regelung - Alle gefahrenen Versuche	126
Tabelle-37: I/I-Regelung - Alle gefahrenen Versuche	127
Tabelle-38: RPA-Regler - Teil ₁	127

Tabelle-39: RPA-Regler - Teil2	128
Tabelle-40: U/I-Regelung - Impulsformen	129
Tabelle-41: I/I-Regelung - Impulsformen	129