

Killing

# **Handbuch der Schweißverfahren**

## **Teil I: Lichtbogenschweißverfahren**

3., überarbeitete und erweiterte Auflage

<b>Einführung in die Schweißtechnik</b> .....	1
Geschichte der Schweißtechnik .....	1
Einordnung des Schweißens in die Fertigungsverfahren .....	3
Einteilung der Schweißverfahren .....	4
Abgrenzen des Schweißens gegenüber dem Löten .....	6
Schrifttum .....	6
<b>Grundlagen des Lichtbogenschweißens</b> .....	7
Der elektrische Lichtbogen .....	7
Erzeugung von Ladungsträgern .....	7
Stoßionisation .....	7
Feldemission .....	8
Thermoemission .....	9
Zünden des Lichtbogens .....	9
Berührungszündung .....	9
Berührungsloses Zünden .....	10
Teile des Lichtbogens .....	10
Katodenfall und Anodenfall .....	10
Lichtbogenplasma .....	11
Eigenschaften des Lichtbogens .....	11
Lichtbogenkennlinie .....	11
Temperaturen im Lichtbogen .....	12
Strahlung des Lichtbogens .....	13
Magnetische Kräfte am Lichtbogen .....	13
Stromart und Polung .....	13
Schweißen mit Gleichstrom .....	13
Schweißen mit Wechselstrom .....	15
Der Werkstoffübergang beim Schweißen .....	16
Kräfte beim Werkstoffübergang .....	16
Viskosität und Oberflächenspannung .....	16
Erdbeschleunigung .....	17
Sogkräfte der Plasmaströmung .....	17
Pinch-Effekt .....	17
Tropfenablösung durch expandierende Gase .....	18
Kräfte, die der Tropfenablösung entgegenwirken .....	19
Einstellen und Regeln von Schweißprozessen .....	19
Möglichkeiten der Einstellung .....	19
Einstellen von Stromstärke und Lichtbogenspannung bei waagerechten Kennlinien .....	20
Einstellen von Stromstärke und Lichtbogenspannung bei fallenden Kennlinien ..	21
Vergleich der Unterschiede bei der Einstellung .....	21
Möglichkeiten der Regelung .....	22
$\Delta u$ -Regelung .....	23
$\Delta i$ -Regelung .....	24
Vergleich der Regelungen .....	25
Schrifttum .....	25
<b>Schweißstromquellen</b> .....	27
Der Schweißtransformator .....	27

3.1.1	Transformatorprinzip .....	27
3.1.2	Einstellen des Schweißtransformators .....	28
3.1.2.1	Verstellen durch Streukern .....	29
3.1.2.2	Verstellen durch Windungsanzapfung .....	29
3.1.2.3	Verstellen durch Transduktoren .....	29
3.1.2.4	Weitere Möglichkeiten der Verstellung .....	29
3.1.3	Netzanschluß des Schweißtransformators .....	30
3.1.4	Leistungsfaktor – $\cos \varphi$ .....	30
3.2	Der Schweißgleichrichter .....	32
3.2.1	Bauarten von Schweißgleichrichtern .....	32
3.2.1.1	Einphasengleichrichtung .....	32
3.2.1.2	Drehstromgleichrichtung .....	34
3.2.2	Einstellen des Schweißgleichrichters .....	34
3.3	Elektronische Stromquellen .....	35
3.3.1	Analogstromquellen .....	35
3.3.2	Getaktete Stromquellen .....	36
3.3.2.1	Primärgetaktete Stromquellen .....	37
3.3.2.2	Sekundärgetaktete Stromquellen .....	38
3.3.2.3	Hybrid-Stromquellen .....	38
3.4	Mehrstellen-Schweißanlagen .....	38
3.4.1	Mehrfachanlagen .....	38
3.4.2	Mehrstellenanlagen .....	38
3.4.2.1	Schweißplatzversorgung .....	39
3.5	Der Schweißumformer .....	40
3.5.1	Aufbau des Schweißumformers .....	40
3.5.2	Bauarten konventioneller Generatoren .....	40
3.5.2.1	Arten der Erregung .....	40
3.5.2.2	Aufbau des Magnetfeldes .....	41
3.5.3	Neuere Bauarten .....	43
3.5.4	Zusatzeinrichtungen .....	43
3.6	Impulsstromquellen .....	43
3.6.1	Konventionelle Impulsstromquellen .....	43
3.6.2	Elektronische Impulsstromquellen .....	44
3.6.2.1	Thyristorisierte Impulsstromquellen .....	44
3.6.2.2	Transistorisierte Impulsstromquellen .....	44
3.7	Eigenschaften von Stromquellen .....	45
3.7.1	Statische Kennlinie .....	45
3.7.2	Arbeitspunkt und Einstellbereich .....	46
3.7.3	Einschaltdauer .....	48
3.7.4	Leerlaufspannung .....	48
3.7.5	Leistungsschild .....	49
3.7.6	Vergleich von Schweißstromquellen .....	49
	Schrifttum .....	50
<b>4</b>	<b>Metall-Lichtbogenschweißen .....</b>	<b>51</b>
4.1	Einteilung des Metall-Lichtbogenschweißens .....	51
4.2	Entwicklung des Verfahrens .....	52
4.3	Elektroden .....	53
4.3.1	Stabelektroden .....	53
4.3.1.1	Herstellung von Stabelektroden .....	53
4.3.1.2	Einteilung .....	55
4.3.1.3	Abmessungen von Stabelektroden .....	56

Selbstschützende Fülldrahtelektroden .....	56
Herstellung von Fülldrahtelektroden .....	57
Abmessungen von Fülldrahtelektroden .....	57
Netzmanteldrahtelektroden .....	57
Herstellung von Netzmanteldrahtelektroden .....	57
Abmessung von Netzmanteldrahtelektroden .....	58
Lichtbogenhandschweißen (Prozeßnummer 111) .....	58
Prinzip des Verfahrens .....	58
Stromquellen zum Lichtbogenhandschweißen .....	58
Elektrodenhalter und Schweißleitungen .....	59
Wirkung und Zweck der Umhüllung .....	60
Wichtigste Umhüllungsbestandteile .....	61
Verschiedene Umhüllungstypen .....	62
Hochleistungselektroden .....	66
Lagerung von Stabelektroden .....	66
Rücktrocknen von Elektroden .....	68
Fugenformen und Fugenvorbereitung .....	68
Elektrodenkennwerte .....	68
Umhüllungsverhältnis .....	69
Ausbringen .....	69
Abschmelzleistung .....	69
Die Technik des Schweißens .....	69
Zünden des Lichtbogens .....	69
Heften .....	70
Elektrodenführung in den verschiedenen Positionen .....	70
Einfluß der Schweißbedingungen .....	72
Stromart und Polung .....	72
Stromstärke, Lichtbogenspannung und Schweißgeschwindigkeit .....	72
Einstellwerte .....	73
Besonderheiten beim Lichtbogenhandschweißen .....	74
Wiederzünden über dem Hüllkrater .....	74
Schweißen mit basischen Elektroden .....	75
Schweißen mit Hochleistungselektroden .....	76
Fallahtschweißen mit Stabelektroden .....	77
Elektroden mit Tiefenbrandeffekt .....	78
Magnetische Blaswirkung .....	78
Andere Verfahren des Metall-Lichtbogenschweißens .....	79
Unterschieneschweißen (Prozeßnummer 118) .....	79
Prinzip des Verfahrens .....	79
Schwerkraft- und Federkraftlichtbogenschweißen (Prozeßnummer 112) .....	80
Prinzip des Verfahrens .....	80
Zusatzwerkstoffe und Einrichtungen zum Schweißen .....	81
Wirtschaftlichkeit des Verfahrens .....	82
Schweißen mit selbstschützenden Fülldrahtelektroden (Prozeßnummer 114) .....	83
Prinzip des Verfahrens .....	83
Einrichtung zum Schweißen .....	83
Werkstoffübergang und Schutzmechanismus .....	84
Schweißen mit Netzmanteldrahtelektroden (Prozeßnummer 115) .....	85
Prinzip des Verfahrens .....	85
Fehler beim Metall-Lichtbogenschweißen .....	86
Poren .....	86
Schlackeneinschlüsse .....	87

Wurzelfehler .....	87
Einbrandkerben .....	87
Anwendung des Metall-Lichtbogenschweißens .....	87
Schweißgeeignete Werkstoffe .....	88
Wanddicken .....	88
Fertigungszweige .....	88
Anwendungsbeispiele .....	89
Entwicklungstendenzen .....	90
Schrifttum .....	90
<b>Schutzgasschweißen .....</b>	<b>92</b>
Grundsätzliches zu den Verfahren .....	92
Einteilung der Schutzgasschweißverfahren .....	92
Elektroden .....	94
Wolframelektroden .....	94
Drahtelektroden .....	96
1 Herstellung .....	96
2 Eigenschaften .....	97
Schweißstäbe und -drähte .....	102
Schutzgase zum Schutzgasschweißen .....	103
Zusammensetzungen .....	103
Gasversorgung .....	105
Draht-Schutzgas-Kombinationen .....	106
Chemische Zusammensetzung des Schweißgutes .....	106
Mechanisch-technologische Eigenschaften .....	108
Schrifttum .....	109
Wolfram-Wasserstoffschweißen (WHG – Prozeßnummer 149) .....	110
Entwicklung des Verfahrens .....	110
Prinzip des Verfahrens .....	110
Stromquellen zum WHG-Schweißen .....	111
Ausführung des Schweißens .....	111
Anwendung des Verfahrens .....	112
Schrifttum .....	112
Wolfram-Inertgasschweißen (WIG – Prozeßnummer 141) .....	112
Entwicklung des Verfahrens .....	112
Prinzip des Verfahrens .....	112
Stromquellen zum WIG-Schweißen .....	113
Ausrüstung zum WIG-Schweißen .....	114
Schweißbrenner .....	114
Steuergeräte .....	117
Zündhilfen .....	118
Kraterfülleinrichtungen .....	119
Stromart und Polarität .....	120
Fugenformen und Fugenvorbereitung .....	122
Die Technik des WIG-Schweißens .....	124
Heften .....	124
Zünden des Lichtbogens .....	124
Brennerhaltung und Führung .....	125
Zugabe von Schweißzusätzen .....	125
Wurzelschutz .....	126
Einfluß der Schweißbedingungen .....	126
Schutzgasmenge .....	126

Zustand der Elektroden .....	127
Einfluß von Stromart und Polarität .....	128
Einfluß von Stromstärke, Lichtbogenspannung und Schweißgeschwindigkeit .....	128
Schweißen mit Stromimpulsen .....	129
Einstellparameter .....	130
WIG-Orbitalschweißen .....	131
Fehler beim WIG-Schweißen .....	131
Poren .....	132
Bindefehler .....	132
Wolframeinschlüsse .....	133
Oxideinschlüsse .....	133
Anwendung des WIG-Schweißens .....	133
Schweißgeeignete Werkstoffe .....	134
Wanddicken .....	134
Fertigungszweige .....	134
Anwendungsbeispiele .....	134
Entwicklungstendenzen .....	136
Schrifttum .....	136
Plasmaschweißen (Prozeßnummer 15) .....	137
Entwicklung des Verfahrens .....	137
Prinzip des Verfahrens .....	137
Einschnüren des Lichtbogens .....	139
Gase zum Plasmaschweißen .....	140
Einteilung des Verfahrens .....	140
Plasmaverbindungsschweißen .....	140
1 Mikroplasmenschweißen .....	141
2 Plasma-Dickblechschweißen .....	141
Plasmaauftragschweißen .....	141
1 Plasma-Pulverschweißen .....	141
2 Plasma-Heißdrahtschweißen .....	142
Ausrüstung zum Plasmaschweißen .....	143
Aufbau eines Mikroplasmenschweißgerätes .....	143
Aufbau einer Plasma-Dickblechschweißanlage .....	144
Fugenvorbereitung .....	144
Die Technologie des Schweißens .....	145
Durchdrücktechnik .....	145
Stichlochtechnik .....	145
Einfluß der Schweißbedingungen .....	146
Polarität .....	146
Stromstärke .....	147
Schweißspannung .....	147
Menge des Plasmagases .....	147
Einstellwerte .....	148
Die Regelung des Plasmaprozesses .....	148
Optische und pneumatische Sensoren .....	149
Elektrische Sensoren .....	149
Fehler beim Plasmaschweißen .....	150
Eingefallene Oberfläche .....	150
Fehlerhafte Endkrater .....	150
Porenbildung .....	150
Anwendung des Verfahrens .....	151
Vergleich mit dem WIG-Verfahren .....	151

5.4.12.1.1	Vorteile des Plasmaschweißens	151
5.4.12.1.2	Nachteile des Plasmaschweißens	153
5.4.12.2	Schweißgeeignete Werkstoffe	153
5.4.12.3	Wanddicken	154
5.4.12.4	Fertigungszweige	154
5.4.12.5	Anwendungsbeispiele	154
5.4.13	Entwicklungstendenzen	155
	Schrifttum	155
5.5	Metall-Schutzgasschweißen (MIG-/MAG-Schweißen – Prozeßnummer 131/135)	156
5.5.1	Entwicklung des Verfahrens	156
5.5.2	Prinzip des Verfahrens	157
5.5.3	Stromquellen zum MIG-/MAG-Schweißen	158
5.5.4	Ausrüstung zum MIG-/MAG-Schweißen	159
5.5.4.1	Gerätebauarten	159
5.5.4.2	Drahtvorschubgeräte	160
5.5.4.3	Steuergerät	163
5.5.4.4	Schlauchpaket und Brenner	164
5.5.4.5	Druckminderer und Durchflußmesser	165
5.5.5	Werkstoffübergangsformen	166
5.5.5.1	Sprühlichtbogen	166
5.5.5.2	Langlichtbogen	167
5.5.5.3	Kurzlichtbogen	168
5.5.5.4	Mischlichtbogen	169
5.5.5.5	MAG-Hochleistungsschweißen	170
5.5.5.6	Impulslichtbogen	171
5.5.6	Charakteristik der Schutzgase zum MIG-/MAG-Schweißen	173
5.5.6.1	Werkstoffübergang	173
5.5.6.2	Kurzschlußneigung	173
5.5.6.3	Einbrandform	174
5.5.6.4	Oxidationsverhalten	175
5.5.7	Fugenformen und Fugenvorbereitung	176
5.5.8	Technik des MIG-/MAG-Schweißens	176
5.5.8.1	Einstellen der Anlagen	177
5.5.8.2	Zünden des Lichtbogens	179
5.5.8.3	Brennerhaltung und Führung	180
5.5.9	Einfluß der Schweißbedingungen	180
5.5.9.1	Schutzgasart und -menge	180
5.5.9.2	Einfluß von Stromstärke, Lichtbogenspannung und Schweißgeschwindigkeit	182
5.5.9.3	Sonstige Einflußgrößen	183
5.5.9.4	Einstellwerte	184
5.5.10	Fehler beim Metall-Schutzgasschweißen	188
5.5.10.1	Poren	188
5.5.10.2	Bindefehler	190
5.5.11	Anwendung des MIG-/MAG-Schweißens	191
5.5.11.1	Schweißgeeignete Werkstoffe	191
5.5.11.2	Wanddicken	191
5.5.11.3	Fertigungszweige	192
5.5.11.4	Anwendungsbeispiele	192
5.5.12	Die Varianten des Metall-Schutzgasschweißens	193
5.5.12.1	MIG-/MAG-Mehrdrahtschweißen	193
5.5.12.2	MIG-Dickdrahtschweißen	194
5.5.12.3	MAG-Schweißen mit Fülldrahtelektroden (Prozeßnummer 136)	194

MAG-Punktschweißen .....	196
MSG-Engspaltschweißen .....	197
Elektrogasschweißen (Prozeßnummer 73) .....	198
Plasma-MIG-Schweißen (Prozeßnummer 151) .....	198
Entwicklungstendenzen .....	199
Schrifttum .....	199

<b>Unterpulverschweißen (Prozeßnummer 12) .....</b>	<b>201</b>
Das Verfahren .....	201
Verfahrensprinzip .....	201
Entwicklung des Verfahrens .....	201
Zusatzwerkstoffe und Hilfsstoffe .....	202
Elektroden .....	202
Drahtelektroden .....	202
Bandelektroden .....	204
Schweißpulver .....	204
Aufgaben des Pulvers .....	204
Herstellung von UP-Schweißpulvern .....	204
Einteilung von Schweißpulvern .....	208
Eigenschaften von Schweißpulvern .....	209
Pulververbrauch .....	210
Rücktrocknen von Schweißpulvern .....	211
Draht-Pulver-Kombinationen .....	211
Metallurgisches Verhalten .....	212
Mechanisch-technologische Eigenschaften .....	214
Aufbau von Anlagen .....	216
Draht- und Pulverzuführung .....	216
Stromquellen zum UP-Schweißen .....	216
Regelung .....	217
Ausführung der Schweißbewegung .....	217
Verfahrensvarianten .....	218
Eindrahtschweißen .....	219
Paralleldrahtschweißen .....	220
Tandemschweißen .....	220
Heißdrahtschweißen .....	222
UP-Schweißen mit Bandelektrode .....	223
Engspaltschweißen .....	225
Leistungsvergleiche .....	226
Einfluß der Schweißbedingungen .....	227
Fugenvorbereitung .....	227
Badsicherungen .....	227
Einfluß der Einstellparameter .....	229
Einfluß der Stromstärke .....	229
Einfluß der Lichtbogenspannung .....	230
Einfluß der Schweißgeschwindigkeit .....	231
Sonstige Einflußgrößen .....	232
Anstellung der Elektrode .....	232
Einstellwerte .....	234
Fehler beim UP-Schweißen .....	234
Poren .....	235
Bindefehler .....	235
Erstarrungsrisse .....	236

6.7	Anwendung des Unterpulverschweißens .....	237
6.7.1	Wanddicken .....	237
6.7.2	Schweißgeeignete Werkstoffe .....	237
6.7.3	Fertigungszweige .....	239
6.7.4	Anwendungsbeispiele .....	239
6.8	Entwicklungstendenzen .....	241
	Schrifttum .....	243
<b>7</b>	<b>Elektroschlackeschweißen (Prozeßnummer 72)</b> .....	<b>245</b>
7.1	Entwicklung des Verfahrens .....	245
7.2	Verfahrensprinzip .....	245
7.3	Geräte zum Elektroschlackeschweißen .....	246
7.3.1	Drahtzuführung .....	247
7.3.2	Pendelung .....	248
7.3.3	Fahrwerk .....	248
7.3.4	Stromquellen und Regelung .....	248
7.4	Zusatzwerkstoffe und Hilfsmittel .....	248
7.4.1	Elektroden .....	249
7.4.2	Schweißpulver .....	249
7.5	Einfluß der Schweißparameter .....	249
7.5.1	Fugenvorbereitung .....	249
7.5.2	Einfluß der Stromstärke .....	249
7.5.3	Einfluß der Arbeitsspannung .....	250
7.5.4	Typische Einstellwerte .....	250
7.6	Varianten des Elektroschlackeschweißens .....	251
7.6.1	Schweißen mit abschmelzender Drahtzuführung .....	251
7.6.2	Schweißen mit Bandelektroden .....	253
7.6.2.1	Verbindungsschweißen .....	253
7.6.2.2	Auftragschweißen .....	254
7.6.3	Schweißen in Schräglage .....	256
7.6.4	Elektroschlackeschweißen von Aluminium .....	257
7.7	Fehler beim Elektroschlackeschweißen .....	258
7.7.1	Bindefehler .....	258
7.7.2	Heißrisse und Lunker .....	259
7.8	Anwendung des Elektroschlackeschweißens .....	259
7.8.1	Anwendbarer Dickenbereich .....	260
7.8.2	Schweißgeeignete Werkstoffe .....	260
7.8.3	Fertigungszweige .....	260
7.8.4	Anwendungsbeispiele .....	260
7.9	Entwicklungstendenzen .....	260
	Schrifttum .....	261
<b>8</b>	<b>Lichtbogenpreßschweißen</b> .....	<b>263</b>
8.1	Lichtbogenbolzenschweißen (Prozeßnummer 781) .....	263
8.1.1	Varianten des Verfahrens .....	263
8.1.2	Wirkungsweise des Verfahrens .....	264
8.1.3	Ausrüstung zum Bolzenschweißen .....	265
8.1.4	Anwendung des Bolzenschweißens .....	266
8.2	Lichtbogenpreßschweißen mit magnetisch bewegtem Lichtbogen (Prozeßnummer 185) .....	266
8.2.1	Verfahrensgrundlage .....	266

8.2.2	Maschinen zum Schweißen mit magnetisch bewegtem Lichtbogen .....	267
8.2.3	Anwendung des Verfahrens .....	268
	Schrifttum .....	268
<b>9</b>	<b>Mechanisieren beim Lichtbogenschweißen .....</b>	<b>269</b>
9.1	Mechanisierungsgrade .....	269
9.1.1	Handschweißen (manuelles Schweißen) .....	269
9.1.2	Teilmechanisches Schweißen .....	270
9.1.3	Vollmechanisches Schweißen .....	270
9.1.4	Automatisches Schweißen .....	270
9.2	Gründe für das Mechanisieren .....	270
9.2.1	Wirtschaftliche Gründe .....	270
9.2.2	Mangel an ausgebildeten Handschweißern .....	270
9.2.3	Qualitätsgründe .....	271
9.2.4	Einsparen von Zusatzwerkstoffen .....	271
9.3	Hilfsmittel zum Mechanisieren .....	271
9.3.1	Ausführen der Schweißbewegung .....	271
9.3.1.1	Fahrwerke .....	272
9.3.1.2	Geräteträger .....	272
9.3.1.3	Drehvorrichtungen .....	272
9.3.2	Sonstige Hilfsmittel .....	273
9.3.3	Schweißkopfführungen .....	275
9.3.3.1	Mechanische und mechanisch-elektrische Systeme .....	275
9.3.3.2	Der Lichtbogen als Sensor .....	276
9.3.3.3	Lasersensor .....	277
9.4	Schweißen mit Industrierobotern .....	278
9.5	Grenzen der Mechanisierung .....	280
	Schrifttum .....	281
Sachverzeichnis .....		283