

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung in die Schweißtechnik	1
1.1	Geschichte der Schweißtechnik	1
1.2	Einordnung des Schweißens in die Fertigungsverfahren	3
1.3	Einteilung der Schweißverfahren	3
1.4	Abgrenzen des Schweißens gegenüber dem Löten	6
	Schrifttum	6
2	Grundlagen des Lichtbogenschweißens	7
2.1	Der elektrische Lichtbogen	7
2.1.1	Erzeugung von Ladungsträgern	7
2.1.1.1	Stoßionisation	7
2.1.1.2	Feldemission	8
2.1.1.3	Thermoemission	9
2.1.2	Zünden des Lichtbogens	9
2.1.2.1	Berührungszündung	9
2.1.2.2	Berührungsloses Zünden	10
2.1.3	Teile des Lichtbogens	10
2.1.3.1	Katodenfall und Anodenfall	10
2.1.3.2	Lichtbogenplasma	11
2.1.4	Eigenschaften des Lichtbogens	11
2.1.4.1	Die Lichtbogenkennlinie	11
2.1.4.2	Temperaturen im Lichtbogen	12
2.1.4.3	Strahlung des Lichtbogens	12
2.1.4.4	Magnetische Kräfte am Lichtbogen	13
2.2	Stromart und Polung	13
2.2.1	Schweißen mit Gleichstrom	13
2.2.2	Schweißen mit Wechselstrom	14
2.3	Der Werkstoffübergang beim Schweißen	15
2.3.1	Kräfte beim Werkstoffübergang	15
2.3.1.1	Viskosität und Oberflächenspannung	16
2.3.1.2	Erdbeschleunigung	16
2.3.1.3	Sogkräfte der Plasmaströmung	16
2.3.1.4	Pinch-Effekt	17

2.3.1.5	Tropfenablösung durch expandierende Gase	17
2.3.1.6	Kräfte, die der Tropfenablösung entgegenwirken	18
2.4	Einstellen und Regeln von Schweißprozessen	18
2.4.1	Möglichkeiten der Einstellung	18
2.4.1.1	Einstellen von Stromstärke und Lichtbogenspannung bei waagerechten Kennlinien	20
2.4.1.2	Einstellen von Stromstärke und Lichtbogenspannung bei fallenden Kennlinien	20
2.4.1.3	Vergleich der Unterschiede bei der Einstellung	21
2.4.2	Möglichkeiten der Regelung	21
2.4.2.1	Die Δu -Regelung	22
2.4.2.2	Die Δi -Regelung	23
2.4.2.3	Vergleich der Regelungen	23
	Schrifttum	23
3	Schweißstromquellen	26
3.1	Der Schweißtransformator	26
3.1.1	Das Transformatorprinzip	26
3.1.2	Einstellen des Schweißtransformators	27
3.1.2.1	Verstellen durch Streukern	27
3.1.2.2	Verstellen durch Windungsanzapfung	28
3.1.2.3	Verstellen durch Transduktoren	28
3.1.2.4	Weitere Möglichkeiten der Verstellung	28
3.1.3	Netzanschluß des Schweißtransformators	28
3.1.4	Der Leistungsfaktor - $\cos \varphi$	28
3.2	Der Schweißgleichrichter	30
3.2.1	Bauarten von Schweißgleichrichtern	30
3.2.1.1	Einphasengleichrichtung	30
3.2.1.2	Drehstromgleichrichtung	31
3.2.2	Einstellen des Schweißgleichrichters	32
3.3	Der Schweißumrichter	33
3.3.1	Analogstromquellen	33
3.3.2	Getaktete Stromquellen	34
3.3.2.1	Primärgetaktete Stromquellen	34
3.3.2.2	Sekundärgetaktete Stromquellen	35

3.4	Mehrstellen-Schweißanlagen	35
3.4.1	Mehrfachanlagen	35
3.4.2	Mehrstellenanlagen	35
3.4.2.1	Schweißplatzversorgung	36
3.5	Der Schweißumformer	36
3.5.1	Aufbau des Schweißumformers	37
3.5.2	Bauarten konventioneller Generatoren	37
3.5.2.1	Arten der Erregung	37
3.5.2.2	Aufbau des Magnetfeldes	38
3.5.3	Neuere Bauarten	39
3.5.4	Zusatzeinrichtungen	39
3.6	Impulsstromquellen	40
3.6.1	Konventionelle Impulsstromquellen	40
3.6.2	Transistorisierte Impulsstromquellen	40
3.7	Eigenschaften von Stromquellen	41
3.7.1	Die statische Kennlinie	41
3.7.2	Arbeitspunkt und Einstellbereich	42
3.7.3	Einschaltdauer	44
3.7.4	Leerlaufspannung	44
3.7.5	Leistungsschild	45
3.7.6	Vergleich von Schweißstromquellen	46
	Schrifttum	47
4	Metall-Lichtbogenschweißen	48
4.1	Einteilung des Metall-Lichtbogenschweißens	48
4.2	Entwicklung des Verfahrens	49
4.3	Elektroden	50
4.3.1	Stabelektroden	50
4.3.1.1	Herstellung von Stabelektroden	50
4.3.1.2	Einteilung	51
4.3.1.3	Abmessungen von Stabelektroden	54
4.3.2	Selbstschützende Fülldrahtelektroden	54
4.3.2.1	Herstellung von Fülldrahtelektroden	54
4.3.2.2	Abmessungen von Fülldrahtelektroden	54
4.3.3	Netzmanteldrahtelektroden	55

4.3.3.1	Herstellung von Netzmanteldrahtelektroden	55
4.3.3.2	Abmessung von Netzmanteldrahtelektroden	56
4.4	Lichtbogenhandschweißen	56
4.4.1	Prinzip des Verfahrens	56
4.4.2	Stromquellen zum Lichtbogenhandschweißen	56
4.4.3	Elektrodenhalter und Schweißleitungen	56
4.4.4	Wirkung und Zweck der Umhüllung	57
4.4.4.1	Die wichtigsten Umhüllungsbestandteile	58
4.4.4.2	Die verschiedenen Umhüllungstypen	60
4.4.4.3	Hochleistungselektroden	64
4.4.4.4	Lagerung von Stabelektroden	64
4.4.4.5	Rücktrocknen von Elektroden	66
4.4.5	Fugenformen und Fugenvorbereitung	66
4.4.6	Elektrodenkennwerte	66
4.4.6.1	Umhüllungsverhältnis	66
4.4.6.2	Ausbringen	67
4.4.6.3	Abschmelzleistung	68
4.4.7	Die Technik des Schweißens	68
4.4.7.1	Zünden des Lichtbogens	68
4.4.7.2	Heften	68
4.4.7.3	Elektrodenführung in den verschiedenen Positionen	68
4.4.8	Einfluß der Schweißbedingungen	69
4.4.8.1	Stromart und Polung	69
4.4.8.2	Stromstärke, Lichtbogenspannung und Schweißgeschwindigkeit	70
4.4.8.3	Einstellwerte	70
4.4.9	Besonderheiten beim Lichtbogenhandschweißen	72
4.4.9.1	Das Wiederzünden über dem Hüllenkrater	72
4.4.9.2	Das Schweißen mit basischen Elektroden	73
4.4.9.3	Das Schweißen mit Hochleistungselektroden	74
4.4.9.4	Fallahtschweißen mit Stabelektroden	74
4.4.9.5	Elektroden mit Tiefenbrandeffekt	75
4.4.9.6	Magnetische Blaswirkung	75
4.5	Andere Verfahren des Metall-Lichtbogenschweißens	76
4.5.1	Unterschieneschweißen	77
4.5.1.1	Prinzip des Verfahrens	77

4.5.2	Schwerkraft- und Federkraftlichtbogenschweißen	77
4.5.2.1	Prinzip des Verfahrens	77
4.5.2.2	Zusatzwerkstoffe und Einrichtungen zum Schweißen	78
4.5.2.3	Wirtschaftlichkeit des Verfahrens	79
4.5.3	Das Schweißen mit selbstschützenden Fülldrahtelektroden	80
4.5.3.1	Prinzip des Verfahrens	80
4.5.3.2	Einrichtung zum Schweißen	80
4.5.3.3	Werkstoffübergang und Schutzmechanismus	81
4.5.4	Das Schweißen mit Netzmanteldrahtelektroden	82
4.5.4.1	Prinzip des Verfahrens	82
4.6	Fehler beim Metall-Lichtbogenschweißen	83
4.6.1	Poren	83
4.6.2	Schlackeneinschlüsse	84
4.6.3	Wurzelfehler	84
4.6.4	Einbrandkerben	84
4.7	Anwendung des Metall-Lichtbogenschweißens	84
4.7.1	Schweißgeeignete Werkstoffe	84
4.7.2	Wanddicken	85
4.7.3	Fertigungszweige	85
4.7.4	Anwendungsbeispiele	86
4.8	Entwicklungstendenzen	87
	Schrifttum	87
5	Schutzgasschweißen	89
5.1	Grundsätzliches zu den Verfahren	89
5.1.1	Einteilung der Schutzgasschweißverfahren	89
5.1.2	Elektroden	91
5.1.2.1	Wolframelektroden	91
5.1.2.2	Drahtelektroden	93
5.1.2.2.1	Herstellung	93
5.1.2.2.2	Eigenschaften	94
5.1.3	Schweißstäbe und -drähte	100
5.1.4	Schutzgase zum Schutzgasschweißen	101
5.1.4.1	Zusammensetzungen	101
5.1.4.2	Gasversorgung	102

5.1.5	Draht-/Schutzgas-Kombinationen	104
5.1.5.1	Chemische Zusammensetzung des Schweißgutes	104
5.1.5.2	Mechanisch-technologische Eigenschaften	106
	Schrifttum	107
5.2	Wolfram-Wasserstoffschweißen (WHG)	108
5.2.1	Entwicklung des Verfahrens	108
5.2.2	Prinzip des Verfahrens	108
5.2.3	Stromquellen zum WHG-Schweißen	109
5.2.4	Ausführung des Schweißens	109
5.2.5	Anwendung des Verfahrens	109
	Schrifttum	110
5.3	Wolfram-Inertgasschweißen (WIG)	110
5.3.1	Entwicklung des Verfahrens	110
5.3.2	Prinzip des Verfahrens	110
5.3.3	Stromquellen zum WIG-Schweißen	111
5.3.4	Ausrüstung zum WIG-Schweißen	111
5.3.4.1	Schweißbrenner	113
5.3.4.2	Steuergeräte	115
5.3.4.3	Zündhilfen	116
5.3.4.4	Kraterfülleinrichtungen	116
5.3.5	Stromart und Polarität	117
5.3.6	Fugenformen und Fugenvorbereitung	120
5.3.7	Die Technik des WIG-Schweißens	122
5.3.7.1	Heften	122
5.3.7.2	Zünden des Lichtbogens	122
5.3.7.3	Brennerhaltung und Führung	122
5.3.7.4	Zugabe von Schweißzusätzen	123
5.3.7.5	Wurzelschutz	123
5.3.8	Einfluß der Schweißbedingungen	123
5.3.8.1	Schutzgasmenge	124
5.3.8.2	Zustand der Elektroden	124
5.3.8.3	Einfluß von Stromart und Polarität	125
5.3.8.4	Einfluß von Stromstärke, Lichtbogenspannung und Schweißgeschwindigkeit	125
5.3.8.5	Schweißen mit Stromimpulsen	126

5.3.8.6	Einstellparameter	126
5.3.9	Fehler beim WIG-Schweißen	127
5.3.9.1	Poren	127
5.3.9.2	Bindefehler	128
5.3.9.3	Wolframeinschlüsse	129
5.3.9.4	Oxideinschlüsse	129
5.3.10	Anwendung des WIG-Schweißens	129
5.3.10.1	Schweißgeeignete Werkstoffe	129
5.3.10.2	Wanddicken	130
5.3.10.3	Fertigungszweige	130
5.3.10.4	Anwendungsbeispiele	130
5.3.11	Entwicklungstendenzen	131
	Schrifttum	132
5.4	Plasmaschweißen	132
5.4.1	Entwicklung des Verfahrens	132
5.4.2	Prinzip des Verfahrens	133
5.4.3	Die Einschnürung des Lichtbogens	135
5.4.4	Gase zum Plasmaschweißen	135
5.4.5	Einteilung des Verfahrens	136
5.4.5.1	Plasmaverbindungsschweißen	136
5.4.5.1.1	Mikroplasmaschweißen	136
5.4.5.1.2	Plasma-Dickblechschweißen	137
5.4.5.2	Plasmaauftragschweißen	137
5.4.5.2.1	Plasma-Pulverauftragschweißen	137
5.4.5.2.2	Plasma-Heißdrahtschweißen	138
5.4.6	Ausrüstung zum Plasmaschweißen	138
5.4.6.1	Aufbau eines Mikroplasmaschweißgerätes	138
5.4.6.2	Aufbau einer Plasma-Dickblechschweißanlage	139
5.4.7	Fugenvorbereitung	140
5.4.8	Die Technologie des Schweißens	140
5.4.8.1	Die Durchdrücktechnik	140
5.4.8.2	Die Stichlochtechnik	141
5.4.9	Einfluß der Schweißbedingungen	141
5.4.9.1	Polarität	141

5.4.9.2	Stromstärke	142
5.4.9.3	Schweißspannung	142
5.4.9.4	Menge des Plasmagases	142
5.4.9.5	Einstellwerte	142
5.4.10	Die Regelung des Plasmaprozesses	144
5.4.10.1	Optische und pneumatische Sensoren	144
5.4.10.2	Elektrische Sensoren	144
5.4.11	Fehler beim Plasmaschweißen	145
5.4.11.1	Eingefallene Oberfläche	145
5.4.11.2	Fehlerhafte Endkrater	145
5.4.11.3	Porenbildung	145
5.4.12	Anwendung des Verfahrens	146
5.4.12.1	Vergleich mit dem WIG-Verfahren	146
5.4.12.1.1	Vorteile des Plasmaschweißens	146
5.4.12.1.2	Nachteile des Plasmaschweißens	147
5.4.12.2	Schweißgeeignete Werkstoffe	148
5.4.12.3	Wanddicken	148
5.4.12.4	Fertigungszweige	148
5.4.12.5	Anwendungsbeispiele	150
5.4.13	Entwicklungstendenzen	150
	Schrifttum	150
5.5	Metall-Schutzgasschweißen (MIG/MAG)	151
5.5.1	Entwicklung des Verfahrens	151
5.5.2	Prinzip des Verfahrens	152
5.5.3	Stromquellen zum MIG-/MAG-Schweißen	153
5.5.4	Ausrüstung zum MIG-/MAG-Schweißen	154
5.5.4.1	Gerätebauarten	154
5.5.4.2	Drahtvorschubgeräte	156
5.5.4.3	Steuergerät	158
5.5.4.4	Schlauchpaket und Brenner	158
5.5.4.5	Druckminderer und Durchflußmesser	160
5.5.5	Werkstoffübergangsformen	160
5.5.5.1	Sprühlichtbogen	161
5.5.5.2	Langlichtbogen	161

5.5.5.3	Kurzlichtbogen	163
5.5.5.4	Mischlichtbogen	163
5.5.5.5	Impulslichtbogen	164
5.5.6	Charakteristik der Schutzgase zum MIG-/MAG-Schweißen	166
5.5.6.1	Werkstoffübergang	166
5.5.6.2	Kurzschlußneigung	166
5.5.6.3	Einbrandform	167
5.5.6.4	Oxidationsverhalten	169
5.5.7	Fugenformen und Fugenvorbereitung	169
5.5.8	Technik des MIG-/MAG-Schweißens	170
5.5.8.1	Einstellen der Anlagen	170
5.5.8.2	Zünden des Lichtbogens	173
5.5.8.3	Brennerhaltung und Führung	173
5.5.9	Einfluß der Schweißbedingungen	174
5.5.9.1	Schutzgasart und -menge	174
5.5.9.2	Einfluß von Stromstärke, Lichtbogenspannung und Schweißgeschwindigkeit	174
5.5.9.3	Sonstige Einflußgrößen	176
5.5.9.4	Einstellwerte	177
5.5.10	Fehler beim Metall-Schutzgasschweißen	180
5.5.10.1	Poren	181
5.5.10.2	Bindefehler	183
5.5.11	Anwendung des MIG-/MAG-Schweißens	184
5.5.11.1	Schweißgeeignete Werkstoffe	184
5.5.11.2	Wanddicken	185
5.5.11.3	Fertigungsbranche	185
5.5.11.4	Anwendungsbeispiele	185
5.5.12	Varianten des Metall-Schutzgasschweißens	187
5.5.12.1	CO ₂ -Hochstromschweißen	187
5.5.12.2	MIG-Dickdrahtschweißen	188
5.5.12.3	MAG-Schweißen mit Fülldrahtelektroden	188
5.5.12.4	MAG-Punktschweißen	188
5.5.12.5	MSG-Engspaltschweißen	189
5.5.12.6	Elektrogasschweißen	190
5.5.12.7	Plasma-Metall-Schutzgasschweißen	191
5.5.13	Entwicklungstendenzen	191
	Schrifttum	192

6	Unterpulverschweißen	194
6.1	Das Verfahren	194
6.1.1	Verfahrensprinzip	194
6.1.2	Entwicklung des Verfahrens	194
6.2	Zusatzwerkstoffe und Hilfsstoffe	195
6.2.1	Elektroden	195
6.2.1.1	Drahtelektroden	195
6.2.1.2	Bandelektroden	197
6.2.2	Schweißpulver	197
6.2.2.1	Aufgaben des Pulvers	197
6.2.2.2	Herstellung von UP-Schweißpulvern	197
6.2.2.3	Einteilung von Schweißpulvern	200
6.2.2.4	Eigenschaften von Schweißpulvern	201
6.2.2.5	Pulververbrauch	202
6.2.2.6	Rücktrocknen von Schweißpulvern	203
6.2.3	Draht-/Pulver-Kombinationen	204
6.2.3.1	Metallurgisches Verhalten	204
6.2.3.2	Mechanisch-technologische Eigenschaften	206
6.3	Aufbau von Anlagen	208
6.3.1	Draht- und Pulverzuführung	208
6.3.2	Stromquellen zum UP-Schweißen	209
6.3.3	Die Regelung	209
6.3.4	Ausführung der Schweißbewegung	210
6.4	Verfahrensvarianten	211
6.4.1	Eindrahtschweißen	211
6.4.2	Paralleldrahtschweißen	212
6.4.3	Tandemschweißen	213
6.4.4	Heißdrahtschweißen	214
6.4.5	UP-Schweißen mit Bandelektrode	214
6.4.6	Engspaltschweißen	217
6.4.7	Leistungsvergleiche	218
6.5	Einfluß der Schweißbedingungen	219
6.5.1	Fugenvorbereitung	219
6.5.1.1	Badsicherungen	220
6.5.2	Einfluß der Einstellparameter	221

6.5.2.1	Einfluß der Stromstärke	221
6.5.2.2	Einfluß der Lichtbogenspannung	222
6.5.2.3	Einfluß der Schweißgeschwindigkeit	223
6.5.3	Sonstige Einflußgrößen	223
6.5.3.1	Anstellung der Elektrode	223
6.5.4	Einstellwerte	224
6.6	Fehler beim UP-Schweißen	226
6.6.1	Poren	226
6.6.2	Bindefehler	227
6.6.3	Erstarrungsrisse	227
6.7	Anwendung des Unterpulverschweißens	228
6.7.1	Wanddicken	228
6.7.2	Schweißgeeignete Werkstoffe	229
6.7.3	Fertigungszweige	230
6.7.4	Anwendungsbeispiele	231
6.8	Entwicklungstendenzen	233
	Schrifttum	234
7	Elektroschlackeschweißen	236
7.1	Entwicklung des Verfahrens	236
7.2	Verfahrensprinzip	236
7.3	Geräte zum Elektroschlackeschweißen	237
7.3.1	Drahtzuführung	238
7.3.2	Pendelung	239
7.3.3	Fahrwerk	239
7.3.4	Stromquellen und Regelung	239
7.4	Zusatzwerkstoffe und Hilfsmittel	239
7.4.1	Elektroden	240
7.4.2	Schweißpulver	240
7.5	Einfluß der Schweißparameter	240
7.5.1	Fugenvorbereitung	240
7.5.2	Einfluß der Stromstärke	240
7.5.3	Einfluß der Arbeitsspannung	241
7.5.4	Typische Einstellwerte	241
7.6	Varianten des Elektroschlackeschweißens	241

7.6.1	Schweißen mit abschmelzender Drahtzuführung	242
7.6.2	Schweißen mit Bandedelektroden	244
7.6.2.1	Verbindungsschweißen	244
7.6.2.2	Auftragschweißen	245
7.6.3	Schweißen in Schräglage	247
7.6.4	Schweißen von Rundnähten	247
7.6.5	Elektroschlackeschweißenschnellschweißen	247
7.6.6	Elektroschlackeschweißen von Aluminium	248
7.7	Fehler beim Elektroschlackeschweißen	249
7.7.1	Bindefehler	249
7.7.2	Heißrisse und Lunker	250
7.8	Anwendung des Elektroschlackeschweißens	250
7.8.1	Anwendbarer Dickenbereich	250
7.8.2	Schweißgeeignete Werkstoffe	250
7.8.3	Fertigungszweige	251
7.8.4	Anwendungsbeispiele	251
7.9	Entwicklungstendenzen	252
	Schrifttum	252
8	Lichtbogenpreßschweißen	253
8.1	Lichtbogenbolzenschweißen	253
8.1.1	Varianten des Verfahrens	253
8.1.2	Wirkungsweise des Verfahrens	254
8.1.3	Ausrüstung zum Bolzenschweißen	255
8.1.4	Anwendung des Bolzenschweißens	255
8.2	Lichtbogenpreßschweißen mit magnetisch bewegtem Lichtbogen	256
8.2.1	Verfahrensgrundlage	256
8.2.2	Maschinen zum Schweißen mit magnetisch bewegtem Lichtbogen	257
8.2.3	Anwendung des Verfahrens	257
	Schrifttum	258
9	Mechanisieren beim Lichtbogenschweißen	259
9.1	Mechanisierungsgrade	259
9.1.1	Handschweißen (manuelles Schweißen)	259
9.1.2	Teilmechanisches Schweißen	260

9.1.3	Vollmechanisches Schweißen	260
9.1.4	Automatisches Schweißen	260
9.2	Gründe für das Mechanisieren	260
9.2.1	Wirtschaftliche Gründe	260
9.2.2	Mangel an ausgebildeten Handschweißern	260
9.2.3	Qualitätsgründe	261
9.2.4	Einsparen von Zusatzwerkstoffen	261
9.3	Hilfsmittel zum Mechanisieren	261
9.3.1	Ausführen der Schweißbewegung	261
9.3.1.1	Fahrwerke	261
9.3.1.2	Geräteträger	263
9.3.1.3	Drehvorrichtungen	263
9.3.2	Sonstige Hilfsmittel	263
9.3.3	Schweißkopfführungen	264
9.3.3.1	Mechanische und mechanisch-elektrische Systeme	265
9.3.3.2	Der Lichtbogen als Sensor	266
9.4	Schweißen mit Robotern	267
9.5	Grenzen der Mechanisierung	268
	Schrifttum	270
	Sachverzeichnis	271