

# Inhaltsverzeichnis

## Vorwort

<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	1
1.1	Wie es begann .....	1
1.2	Normung ist wichtig .....	7
1.2.1	Einteilung der Schutzgasschweißverfahren .....	7
1.3	Beschreibung des Metall-Schutzgasschweißens .....	8
	Schrifttum .....	9
<b>2</b>	<b>Grundlagen der Elektrotechnik für das Lichtbogenschweißen</b> .....	11
2.1	Stromfluss .....	11
2.2	Spannung und Widerstand .....	12
2.3	Ohmsches Gesetz .....	14
2.4	Induktivität und Kapazität .....	15
2.5	Transformator .....	17
2.6	Reihenschaltung .....	18
2.7	Parallelschaltung .....	19
2.8	Gleich- und Wechselstromtechnik .....	20
2.9	Mittelwert und Effektivwert .....	22
2.10	Elektrisches Verhalten des Lichtbogenbereiches .....	23
2.11	Elektrische Leistung .....	24
2.12	Berechnung der Lichtbogenleistung .....	26
2.13	Leitungsquerschnitt und Belastung von schweißstromführenden Leitern .....	27
2.14	Energie .....	28
2.15	Wirkungsgrad .....	29
2.16	Streckenenergie und Wärmeeinbringung .....	30
2.17	I-U-Ausgangskennlinie der Schweißstromquelle .....	30
2.18	I-U-Arbeitspunkte .....	31
2.19	Einschaltdauer .....	33
2.20	Steuerungs- und Leistungselektronik in der Schweißstromquelle .....	34
2.21	Digital gesteuerte Schweißstromquelle .....	34
2.22	Validierung und Kalibrierung von Strom und Spannung .....	36
2.23	Elektrische und technische Sicherheit .....	38
2.24	Elektromagnetische Felder (EMF) .....	40
2.25	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) .....	41
2.26	Begriffe, Formelzeichen und Gleichungen .....	43
	Schrifttum .....	44
<b>3</b>	<b>Werkstoffübergang, physikalische Wirkungen und Prozessregelung</b> .....	46
3.1	Einführung .....	46
3.2	Werkstoffübergang (Lichtbogenart) .....	46
3.2.1	Möglichkeiten moderner Schweißstromquellen .....	46
3.2.2	Werkstoffübergang im Kurzschluss .....	47
3.2.3	Kurzschlussfreier Werkstoffübergang .....	47
3.3	Physikalische Wirkungen .....	48
3.3.1	Wärmeeinbringung .....	48

3.3.2	Kraftwirkungen .....	48
3.3.3	Zusammenhänge .....	48
3.4	Prozessregelung .....	49
3.4.1	Technischer Hintergrund der „klassischen“ Prozessregelung .....	49
3.4.2	Der Weg zur „modernen“ Prozessregelung .....	52
3.4.3	Synergiesteuerung .....	53
3.4.4	Dynamikverstellung .....	54
3.4.5	Komplexere Prozessregelungen .....	55
3.4.6	Start und Ende des Schweißprozesses .....	61
3.4.7	Dynamik während des Schweißens .....	62
3.4.8	Bedienung – Dynamikverstellung am Brenner .....	64
3.4.9	Anwendungshinweise zur Dynamikverstellung .....	64
3.4.10	Nützliche Einschränkung von Parametern .....	65
	Schrifttum .....	66
<b>4</b>	<b>Prozessregelung des Metall-Schutzgasschweißens .....</b>	<b>67</b>
4.1	Grundlegende Anforderungen an Schweißstromquellen .....	67
4.2	Vorschubgeschwindigkeit der Drahtelektrode .....	68
4.3	Regelung der Lichtbogenlänge .....	69
4.3.1	Delta- ( $\Delta$ -) U-Regelung (äußere Regelung) .....	69
4.3.2	Delta- ( $\Delta$ -) I-Regelung (innere Regelung) .....	70
4.4	Prozessregelvarianten .....	71
4.4.1	Ungeregelter Kurzlichtbogen .....	71
4.4.2	Geregelter Kurzlichtbogen .....	72
4.4.3	Spritzerarmer Kurzlichtbogen .....	73
4.4.4	Energiereduzierter Kurzlichtbogen .....	73
4.4.5	Leistungsgesteigerter Kurzlichtbogen .....	74
4.4.6	Sprühlichtbogen .....	74
4.4.7	Modifizierter Sprühlichtbogen .....	74
4.4.8	Impulslichtbogen: Der gesteuerte Tropfenübergang .....	75
4.4.8.1	U-U-Modulation .....	77
4.4.8.2	U-I-Modulation .....	78
4.4.8.3	I-I-Modulation .....	80
4.4.9	Modifizierter Impulslichtbogen .....	83
4.4.10	Wechselstromprozesse (MSG-AC-Schweißen) .....	84
4.4.11	Kombinierte Prozessregelvarianten .....	87
4.4.12	Zyklische Drahtbewegung .....	92
4.5	Anwendungshinweise .....	92
4.5.1	Technologische Zuordnung .....	92
4.5.2	Allgemeine Einstellung und Bedienung .....	93
4.5.3	Einstell- und Regelparametergrößen für das MSG-Impulsschweißen .....	96
4.6	Herstellerbezeichnungen .....	101
	Schrifttum .....	103
<b>5</b>	<b>Anlagentechnik und Bedienkonzepte .....</b>	<b>104</b>
5.1	Anlagen und Einrichtungen .....	104
5.1.1	Anlagenstruktur .....	104
5.1.2	Aufbau einer MSG-Schweißanlage .....	105
5.2	Einstellung und Bedienung .....	109

5.3	Bauarten von Schweißstromquellen .....	111
5.3.1	Anlagentechnik für den MSG-Wechselstrom- (AC-) Schweißprozess .....	111
5.4	Bedienkonzepte .....	113
5.4.1	„Einknopf-Bedienung“ (Synergiebetrieb) bei einer MSG-Schweißanlage .....	116
5.4.2	Theoretische Hintergründe der Anlageneinstellung .....	120
5.4.3	Einstellung und Handhabung der Schweißanlagen im Sinne des Arbeitsschutzes .....	123
	Schrifttum .....	123
<b>6</b>	<b>Anpassen der Prozessvarianten an Schweißaufgaben und zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit .....</b>	<b>124</b>
6.1	Stand der Technik .....	124
6.2	Lichtbogen-Hochleistungsschweißverfahren .....	125
6.2.1	Zur Geschichte .....	125
6.2.2	Einteilung der Lichtbogen-Hochleistungsverfahren .....	125
6.2.3	Vorteile der Hochleistungsverfahren .....	127
6.2.4	Hoher Entwicklungsstand der Hochleistungsverfahren .....	128
6.2.5	Digitalisierte Stromquellen – flexible und schnelle Prozessregelung ist möglich .....	128
6.2.6	Anwendungen .....	128
6.2.6.1	Schweißen mit Drahtelektroden großen Drahtdurchmessers .....	129
6.2.6.2	MSG-Tandemschweißen oder MSG-Doppeldrahtschweißen .....	130
6.2.6.3	MSG-Tandemschweißen in vielfältiger Anwendung .....	135
6.2.6.4	Laserstrahl-MSG-Hybridschweißen .....	135
6.2.7	Schlussbetrachtung und Ausblick .....	137
	Schrifttum .....	138
6.3	Lichtbogenlötten .....	138
6.3.1	Anwendung und Vorzüge des Lichtbogenlötens .....	138
6.3.2	Abgrenzung von Lichtbogenschweißen und Lichtbogenlötens .....	138
6.3.3	Definition und Einteilung der Verfahren .....	140
6.3.4	Zeichnungseintrag und Mechanisierung .....	141
6.3.5	Arbeitsweise und Anwendung der Lichtbogenlötverfahren .....	141
6.3.5.1	Kurzlichtbogenverfahren .....	142
6.3.5.2	Impulslichtbogenverfahren .....	142
6.3.6	Werkstoffe zum Lichtbogenlötens .....	143
6.3.6.1	Grundwerkstoffe .....	143
6.3.6.2	Oberflächenbeschichtung und -vorbehandlung .....	143
6.3.6.3	Verzinken als bewährtes Korrosionsschutzverfahren .....	144
6.3.6.4	Lotwerkstoffe und Schutzgase .....	145
6.3.7	Anforderungen an Lötanlagen .....	146
6.3.7.1	Energiequelle .....	146
6.3.7.2	Drahtvorschub .....	147
6.3.7.3	Brennerschlauchpaket .....	147
6.3.7.4	Lötbrenner .....	147
6.3.8	Nahtvorbereitung, Stoßarten und Lötgeometrien .....	147
6.3.8.1	Vorbereiten der Naht .....	147
6.3.8.2	Stoßarten und Anforderungen an die Nahtgeometrie .....	147
6.3.9	Anforderungen an die Nahtqualität .....	148
6.3.10	Prüfverfahren .....	149
6.3.11	Korrosionsschutz von Lötverbindungen .....	149

6.3.12	Nacharbeit von lichtbogengelöteten Nähten .....	150
6.3.13	Einsatzbereich von lichtbogengelöteten Verbindungen bei mechanischer und korrosiver Beanspruchung .....	150
6.3.14	Arbeitsschutz beim Lichtbogenlöten .....	150
	Schrifttum .....	150
<b>7</b>	<b>Prozessgase zum Metall-Schutzgasschweißen .....</b>	<b>153</b>
7.1	Eigenschaften und Einfluss der Prozessgase .....	153
7.1.1	Kriterien für die Auswahl der Schweißgase .....	153
7.1.2	Gaseherstellung .....	156
7.2	Normung der Prozessgase .....	157
7.2.1	Entstehung und Stand der Normung .....	157
7.2.2	Einteilung und Bezeichnung der Prozessgase .....	157
7.2.2.1	Einteilung .....	157
7.2.2.2	Bezeichnung .....	158
7.2.3	Reinheit und Mischtoleranz der Prozessgase .....	159
7.2.3.1	Reinheit .....	159
7.2.3.2	Mischtoleranz .....	160
7.3	Eigenschaften und Wirkung der Prozessgase .....	160
7.3.1	Allgemeines .....	160
7.3.2	Inerte und quasi-inerte Gase und Gasgemische .....	161
7.3.2.1	Argon .....	161
7.3.2.2	Helium .....	161
7.3.2.3	Argon-Helium-Gemische .....	162
7.3.2.4	Argon-Wasserstoff-Gemische .....	162
7.3.2.5	Argon-Helium-Wasserstoff-Gemische .....	162
7.3.2.6	Dotierte Gase .....	163
7.3.3	Aktive Gase und Gasgemische .....	164
7.3.3.1	Allgemeines .....	164
7.3.3.2	Kohlendioxid .....	164
7.3.3.3	Argon-Kohlendioxid-Gemische .....	165
7.3.3.4	Argon-Sauerstoff-Gemische .....	167
7.3.3.5	Argon-Kohlendioxid-Sauerstoff-Gemische .....	169
7.3.3.6	Heliumzumischungen .....	170
7.4	Gasversorgung .....	170
7.4.1	Einzelflaschen .....	170
7.4.2	Flaschenbündel .....	171
7.4.3	Tankversorgung .....	172
7.4.4	Mischanlagen .....	173
7.4.5	Zentrale Gasversorgung .....	174
7.4.6	Druckregler .....	174
7.4.7	Schläuche und Gasreinheit .....	177
7.5	Praktische Hinweise zur Anwendung .....	178
7.5.1	Erforderliche Gasmengen .....	178
7.5.2	Veränderungen an Gasdüsen .....	179
7.6	Sicherheit und Arbeitsschutz .....	180
7.6.1	Allgemeines .....	180
7.6.2	Gefahr durch Druck .....	180

7.6.3	Gefahr durch Ersticken .....	180
7.6.4	Brandgefahr .....	181
7.6.5	Tiefkalt verflüssigte Gase .....	181
	Schrifttum .....	181
<b>8</b>	<b>Grundwerkstoffe und Schweißzusätze – Werkstoffarten, Prozesse und Anwendungstechnik</b> .....	<b>183</b>
8.1	Schweißen von Stahlwerkstoffen .....	183
8.1.1	Allgemeine Hinweise zum Verhalten der Stahlwerkstoffe beim Schutzgasschweißen .....	183
8.1.2	Sorten und Eigenschaften von Stahlwerkstoffen zum Schutzgasschweißen .....	184
8.1.2.1	Unlegierte Baustähle .....	184
8.1.2.2	Unlegierte Qualitäts- und Edelstähle .....	188
8.1.2.3	Hochfeste Feinkornbaustähle .....	191
8.1.2.3.1	Normalisierend gewalzte Feinkornbaustähle .....	192
8.1.2.3.2	Thermomechanisch gewalzte Feinkornbaustähle .....	192
8.1.2.3.3	Flüssigkeitsvergütete Feinkornbaustähle .....	193
8.1.2.3.4	Kontrollierte Wärmeführung beim Schweißen hochfester Feinkornbaustähle .....	193
8.1.2.4	Korrosionsbeständige Stähle (hitzebeständige und warmfeste Stähle) .....	194
8.1.2.4.1	Austenitische Stähle .....	196
8.1.2.4.2	Duplexstähle .....	198
8.1.2.4.3	Ferritische Chromstähle .....	199
8.1.2.4.4	Martensitische Chromstähle .....	200
8.1.2.4.5	Hitzebeständige Stähle .....	201
8.1.2.4.6	Warmfeste Stähle .....	202
8.1.2.5	Kaltzähe Stähle .....	203
8.1.2.6	Stahlguss .....	206
8.1.2.7	Gusseisen .....	206
	Schrifttum .....	207
8.1.3	Schweißzusätze zum MSG-Schweißen von Stahlwerkstoffen .....	210
8.1.3.1	Anforderungen und Anwendung von Schweißzusätzen .....	210
8.1.3.2	Schweißen von Feinkornbaustählen .....	214
8.1.3.2.1	Eigenschaften der Grundwerkstoffe .....	215
8.1.3.2.2	Auswahl und Einfluss der Schutzgase .....	217
8.1.3.2.3	Auswahl der Drahtelektroden .....	217
8.1.3.2.4	Hinweise zur Verarbeitung .....	218
8.1.3.2.5	Schweißnahtvorbereitung .....	221
8.1.3.2.6	Herstellen der Schweißverbindung .....	221
8.1.3.2.7	Beispiel für das Festlegen von Schweißbedingungen .....	226
	Schrifttum .....	227
8.1.3.3	Schweißen von nichtrostenden und hitzebeständigen Stählen .....	229
8.1.3.3.1	Normung der Schweißzusätze .....	229
8.1.3.3.2	Hinweise zur Verarbeitung der Stähle .....	233
8.1.3.3.3	Schweißnahtvorbereitung .....	235
8.1.3.3.4	Auswahl und Anwendung der Schutzgase .....	235
8.1.3.3.5	Anwendungstechnik .....	237
8.1.3.3.6	Anlagen zum MSG-Schweißen .....	238
8.1.3.3.7	Herstellen der Schweißverbindung .....	238

8.1.3.3.8	Verfahren der Nachbehandlung .....	241
8.1.3.3.9	Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung .....	243
	Schrifttum .....	245
8.1.4	Schweißnahtvorbereitung und konstruktive Hinweise .....	248
	Schrifttum .....	252
8.1.5	Prüfung und Bewertung von Schweißverbindungen .....	252
	Schrifttum .....	254
8.2	Schweißen von Aluminium und Aluminiumlegierungen .....	256
8.2.1	Werkstoffspezifische Grundlagen .....	256
8.2.2	Einteilung und Bezeichnung der Aluminiumwerkstoffe .....	257
8.2.3	Einfluss der Legierungselemente .....	260
8.2.4	Lieferzustände der Aluminiumwerkstoffe .....	263
8.2.5	Konstruktive Besonderheiten .....	263
8.2.6	Korrosion bei Aluminium .....	265
8.2.6.1	Allgemeines .....	265
8.2.6.2	Einflüsse auf die Korrosion .....	265
8.2.6.3	Korrosionsarten .....	266
8.2.7	Werkstoffspezifische Besonderheiten beim Schweißen von Aluminium .....	267
8.2.7.1	Porenbildung durch Wasserstoff .....	267
8.2.7.2	Kondensation und Verschmutzung .....	268
8.2.7.3	Oxidschicht .....	269
8.2.7.4	Festigkeitsabfall in der Wärmeeinflusszone .....	269
8.2.7.5	Mischverbindungen (Knet- und Gusslegierungen) .....	271
8.2.7.6	Wärmeleitfähigkeit .....	271
8.2.7.7	Schrumpfung und Verzug .....	272
8.2.7.8	Heißrisse in Aluminiumschweißverbindungen .....	272
8.2.8	Schweißprozesse, Geräte, Schutzgase und Schweißzusätze .....	273
8.2.8.1	Lichtbogenarten .....	273
8.2.8.2	Schweißstromquellen und Schweißgeräte .....	276
8.2.8.3	Schutzgase für das Schweißen von Aluminiumwerkstoffen .....	282
8.2.8.4	Zusatzwerkstoffe .....	284
8.2.8.5	Mechanisierungsgrad .....	287
8.2.9	Fertigungstechnische Hinweise .....	289
8.2.9.1	Lagerung, Transport und Verarbeitung von Aluminium .....	289
8.2.9.2	Schweißnahtvorbereitung .....	291
8.2.9.3	Konstruktive Hinweise .....	291
8.2.9.4	Schweißposition, Schweißparameter (Richtwerte) und Vorwärmung .....	293
8.2.9.5	Durchführung des Schweißens .....	294
8.2.9.7	Prüfen und Bewerten der Schweißverbindungen .....	296
	Schrifttum .....	297
8.3	Schweißen von Nickel-, Titan- und Kupferwerkstoffen .....	299
8.3.1	Nickelbasislegierungen .....	299
8.3.2	Titanwerkstoffe .....	300
8.3.3	Kupferwerkstoffe .....	301
	Schrifttum .....	303

<b>9</b>	<b>Qualitätssicherungsmaßnahmen in der Fertigung</b> .....	304
9.1	Überprüfung (Verifikation) von Stromquelle und Drahtvorschub in Lichtbogen- schweißeinrichtungen .....	304
	Schrifttum .....	
9.2	Sicherheitstechnische Überprüfung von Schweißgeräten und Schweißanlagen – Wiederholungsprüfung .....	313
9.2.1	Einführung .....	313
9.2.2	Grundsätze für den Unternehmer .....	314
9.2.3	Besonderheiten bei der Wiederholungsprüfung von Schweißgeräten und -anlagen ..	316
	Schrifttum .....	319
9.3	Schweißanweisungen – Bedeutung und Anwendung am Beispiel Tragwerkbau .....	321
9.3.1	Schweißanweisungen als Grundlage zur Qualifizierung der Fertigung .....	321
9.3.2	Hinweise zur Qualifizierung von Betrieben nach DIN EN 1090 .....	322
9.3.3	Forderung nach qualifiziertem Schweißverfahren – Entwicklung der Verfahrens- qualifikation .....	322
9.3.4	Methoden zur Qualifizierung von Schweißverfahren – Beispiele nach DIN EN 1090	323
9.3.5	Schweißen nach einer Schweißanweisung (WPS) .....	324
9.3.6	Qualifizierung von Bedienern und Einrichtern nach DIN EN ISO 14732 .....	326
	Schrifttum .....	327
<b>10</b>	<b>Arbeitsschutz beim Lichtbogenschweißen</b> .....	328
10.1	Allgemeine Hinweise für die Schweißaufsicht und das Schweißpersonal .....	328
10.2	DGUV Vorschrift 1 „Grundsätze der Prävention“ .....	330
10.3	DGUV Regel 100-500, Kapitel 2.26 „Schweißen, Schneiden und verwandte Verfahren“ .....	330
10.4	Wesentliche Maßnahmen zum Arbeitsschutz beim Lichtbogenschweißen .....	333
10.5	Maßnahmen zur Ersten Hilfe bei einem Elektrounfall .....	337
	Schrifttum .....	339
<b>11</b>	<b>Qualifizierung von schweißtechnischem Personal und von Schweißverfahren</b> ..	341
11.1	Forderung von qualifiziertem Personal nach DIN EN ISO 3834 .....	341
11.2	Ausbildung und Qualifizierung des internationalen Schweißers nach Richtlinie DVS-IIW/EFW 1111 .....	341
11.3	Prüfung des internationalen Schweißers nach DIN EN ISO 9606 .....	344
11.4	Prüfung von Bedienern und Einrichtern von Schweißanlagen nach DIN EN ISO 14732 .....	346
11.5	Aufgaben und Verantwortung des Schweißaufsichtspersonals nach DIN EN ISO 14731 .....	347
11.6	Forderung der Qualifizierung von Schweißverfahren .....	348
	Schrifttum .....	349
<b>12</b>	<b>Glossar</b> .....	350
	Sachwortverzeichnis .....	371