

# Inhaltsverzeichnis

## Vorwort

<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	1
1.1	Grundsätze zu Schweißkonstruktionen im Druckgerätebau .....	1
1.1.1	Sicherheit des Druckgerätes und Regelwerk .....	1
1.1.2	Beanspruchungen, Auslegung und Gestaltung .....	2
1.1.3	Werkstoffe und Werkstoffeigenschaften .....	3
1.2	Herstellung und Inverkehrbringen von Druckgeräten .....	4
1.2.1	Hersteller und Verantwortung .....	4
1.2.2	Fertigung und Montage .....	5
1.2.3	Endprüfung und Inverkehrbringen .....	6
1.3	Schrifttum .....	7
<b>2</b>	<b>Werkstoffe im Druckgerätebau</b> .....	8
2.1	Werkstoffkundliche Grundlagen .....	8
2.1.1	Begriffsbestimmungen .....	8
2.1.1.1	Warmfestigkeit .....	8
2.1.1.2	Warmstreckgrenze .....	8
2.1.1.3	Zeitstandfestigkeit und Zeitdehngrenze .....	8
2.1.2	Verhalten der Stähle bei erhöhten Temperaturen .....	8
2.1.3	Kriechverhalten von Werkstoffen .....	10
2.1.4	Schädigung durch Kriechprozesse .....	11
2.1.4.1	Allgemeiner Schädigungsmechanismus .....	11
2.1.4.2	Besonderheiten bei austenitischen Chrom-Nickel-Stählen und Nickellegierungen .....	13
2.1.4.3	Beeinflussung des Schädigungsverhaltens .....	13
2.1.5	Schädigung durch Anlassversprödung .....	14
2.2	Gefügebau und Einsatzgrenzen der Stähle .....	15
2.3	Normung der Stähle .....	18
2.3.1	Europäische Normung der Druckbehälterstähle .....	18
2.3.1.1	Stähle gemäß der Druckgeräterichtlinie (DGRL) .....	18
2.3.1.2	Harmonisierte europäische Normen für Druckbehälterstähle .....	18
2.3.2	Nationale Normung der Druckbehälterwerkstoffe .....	22
2.3.3	US-amerikanische Normung der Druckbehälterstähle .....	23
2.3.3.1	Allgemeines .....	23
2.3.3.2	Systematik der US-Normstähle .....	23
2.3.3.3	Druckbehälterstähle nach ASTM .....	26
2.3.3.4	ASTM A533 – Flacherzeugnisse aus legierten Druckbehälterstählen .....	28
2.3.3.5	ASTM A213 – Nahtlose Behälter, Überhitzer und Wärmetauscherrohre aus nichtrostenden Druckbehälterstählen .....	29
2.4	Druckbehälterstähle – Verwendung nach mechanischen und physikalischen Eigenschaften .....	32
2.4.1	Allgemeines .....	32
2.4.2	Unlegierte Druckbehälterstähle mit festgelegten Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen .....	33
2.4.3	Druckbehälterstähle aus Feinkornbaustählen .....	34
2.5	Druckbehälterstähle – Verwendung nach chemischer Zusammensetzung .....	36
2.5.1	Allgemeines .....	36
2.5.2	Legierte Druckbehälterstähle mit festgelegten Eigenschaften bei Temperaturen bis 500 °C .....	38
2.5.2.1	Bainitisch- (martensitisch-) ferritische Stähle .....	38
2.5.2.2	Weichmartensitische Stähle .....	39

2.5.2.3	Ferritische Chrom-Stähle .....	41
2.5.2.4	Austenitisch-ferritische Chrom-Nickel-Stähle (Duplexstähle) .....	42
2.5.3	Legierte Druckbehälterstähle für Temperaturen über 500 °C .....	44
2.5.3.1	Bainitisch-martensitische Stähle mit reduziertem Chromgehalt .....	44
2.5.3.2	Martensitische Stähle mit 9 bis 12 % Chrom .....	47
2.5.3.3	Austenitische Stähle .....	51
2.5.4	Legierte Druckbehälterstähle für tiefe Temperaturen .....	54
2.6	Sonderwerkstoffe für spezifische Einsatzgebiete .....	55
2.6.1	Druckwasserstoffbeständige Stähle .....	55
2.6.2	Hochwarmfeste Legierungen auf Nickel- und Kobaltbasis .....	56
2.7	Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe nach DIN EN 1011 .....	57
2.7.1	Allgemeine Anleitungen für das Lichtbogenschweißen nach DIN EN 1011-1 .....	58
2.7.2	Lichtbogenschweißen von ferritischen Stählen nach DIN EN 1011-2 .....	59
2.7.3	Lichtbogenschweißen von nichtrostenden Stählen nach DIN EN 1011-3 .....	60
2.8	Schrifttum .....	63
<b>3</b>	<b>Schweißzusätze und Hilfsstoffe zum Schweißen von metallischen Werkstoffen im Kraftwerks-, Rohrleitungs- und Druckbehälterbau .....</b>	<b>70</b>
3.1	Allgemeine Grundsätze zur Auswahl und Anwendung der Schweißzusätze im Druck- behälterbau .....	70
3.2	Zusammenstellung von Normen und Regeln für Schweißzusätze und Hilfsstoffe .....	70
3.3	Schweißzusätze und allgemeine Verarbeitungshinweise für unlegierte Druckbehälterstähle und Feinkornbaustähle .....	72
3.3.1	Grundwerkstoffe .....	72
3.3.2	Empfehlungen zur schweißtechnischen Verarbeitung .....	72
3.3.3	Schweißzusätze für Baustähle und Feinkornbaustähle nach verschiedenen Normen bis zu einer 0,2-Dehngrenze von 500 MPa .....	74
3.3.4	Schweißzusätze für Feinkornbaustähle mit 0,2-Dehngrenze > 500 MPa .....	77
3.4	Schweißzusätze für unlegierte und legierte warmfeste Druckbehälterstähle .....	79
3.4.1	Einsatzbereiche der Grundwerkstoffe .....	79
3.4.2	Allgemeine schweißtechnische Verarbeitung .....	79
3.4.3	Schweißzusätze für unlegierte warmfeste Stähle .....	79
3.4.4	Schweißzusätze für Feinkornbaustähle .....	79
3.4.5	Mo- und CrMo-legierte Schweißzusätze .....	80
3.4.6	Schweißzusätze für mehrfach legierte, bainitische warmfeste Stähle .....	81
3.4.7	Schweißzusätze für martensitische warmfeste Stähle .....	85
3.4.8	Schweißzusätze für austenitische warmfeste Stähle und Nickellegierungen im Hoch- temperaturbereich .....	91
3.4.9	Schweißzusätze für Mischverbindungen zwischen unterschiedlichen warmfesten Stählen .....	93
3.5	Schweißzusätze für nichtrostende Stähle .....	98
3.5.1	Anwendung der Grundwerkstoffe .....	98
3.5.2	Schweißtechnische Verarbeitung .....	98
3.5.3	Schweißzusätze .....	99
3.5.4	Hinweise zu den verschiedenen Schweißverfahren .....	104
3.6	Schweißzusätze für Schwarz-Weiß-Verbindungen .....	105
3.7	Schweißzusätze für Nickellegierungen .....	106
3.7.1	Anwendung der Grundwerkstoffe .....	106
3.7.2	Schweißtechnische Verarbeitung .....	107
3.7.3	Schweißzusätze für das Lichtbogenhandschweißen .....	107
3.7.4	Schweißzusätze zum Schutzgasschweißen und Unterpulverschweißen .....	108
3.8	Schweißzusätze für kaltzähe Stähle .....	108

3.8.1	Auswahl der Schweißzusätze .....	108
3.9	Schrifttum .....	109
<b>4</b>	<b>Verfahren und Einrichtungen zum Wärmen sowie Regelwerke zur Wärme-</b> <b>behandlung von Schweißverbindungen</b> .....	<b>112</b>
4.1	Bedeutung des Vorwärmens und Verfahrensweise .....	112
4.1.1	Flammwärmen .....	112
4.1.2	Heißluftglühen im Ofen .....	114
4.1.3	Heizelementwärmen .....	118
4.1.4	Induktives Wärmen .....	119
4.2	Regelwerke zur Wärmebehandlung von Schweißverbindungen .....	120
4.2.1	EU-Richtlinie Druckgeräte .....	120
4.2.2	AD 2000-Regelwerk .....	121
4.2.3	VdTÜV-Werkstoffblätter .....	122
4.2.4	Verbandsvereinbarung 2003/3 – Wärmebehandlung von Schweißverbindungen .....	122
4.2.5	FDBR-Norm 18 – Wärmebehandlung von Schweißverbindungen .....	122
4.2.6	DIN EN 13480 – Metallische industrielle Rohrleitungen .....	124
4.2.7	DIN EN 12952 – Wasserrohrkessel und Anlagenkomponenten .....	125
4.2.8	DIN EN 12953 – Großwasserraumkessel .....	126
4.2.9	DIN EN 13445 – Unbefeuerte Druckbehälter .....	127
4.3	Schrifttum .....	128
<b>5</b>	<b>Gestaltung und Berechnung</b> .....	<b>131</b>
5.1	Allgemeines .....	131
5.2	Grundsätze zur Anwendung der technischen Regelwerke .....	132
5.3	Allgemeine Grundsätze zur Gestaltung von druckbeaufschlagten Bauteilen .....	133
5.4	Grundlagen der Regelwerke .....	135
5.4.1	Anforderungen an Werkstoffe .....	135
5.4.2	Bewertung der Bauteilbeanspruchung – Vergleichsspannungshypothesen .....	137
5.4.3	Spannungskategorien .....	139
5.4.3.1	Allgemeines .....	139
5.4.3.2	Primärspannungen .....	139
5.4.3.3	Sekundärspannungen .....	140
5.4.3.4	Spannungsspitzen .....	140
5.5	Dimensionierung bei innerem und äußerem Überdruck .....	141
5.5.1	Bewertung von Schweißnähten .....	141
5.5.2	Auslegung bei innerem Überdruck .....	142
5.5.2.1	Allgemeines .....	142
5.5.2.2	Auslegung mit zeitunabhängiger zulässiger Spannung (Auslegung bei Betrieb unterhalb des Zeitstandbereichs) .....	143
5.5.2.3	Auslegung mit zeitabhängiger zulässiger Spannung (Auslegung bei Betrieb im Zeitstandbereich) .....	145
5.5.3	Auslegung bei äußerem Überdruck .....	146
5.5.4	Druckprobe .....	146
5.6	Spannungen im Bereich geometrischer Diskontinuitäten .....	147
5.7	Imperfektionen in Schweißnähten und deren Bewertung .....	150
5.7.1	Allgemeines .....	150
5.7.2	Längsnähte .....	150
5.7.3	Rundnähte .....	150
5.7.4	Spiralnähte .....	151
5.8	Spannungen aus Schnittmomenten in Rohrleitungssystemen .....	151
5.9	Anforderungen und Auslegung von Flanschverbindungen .....	154

5.10	Pratzen, Sättel und integrale Anschweißteile zur Lastabtragung (Unterstützungs- konstruktionen) .....	156
5.10.1	Allgemeines .....	156
5.10.2	Rohrleitungen .....	156
5.10.3	Behälter .....	158
5.11	Wechslerschöpfung und Zeitstanderschöpfung .....	158
5.11.1	Allgemeines .....	158
5.11.2	Wechslerschöpfung .....	158
5.11.2	Zeitstanderschöpfung .....	164
5.12	Vermeiden von Spaltkorrosion .....	165
5.13	Plattierungen und Auskleidungen .....	165
5.14	Schrifttum .....	166
<b>6</b>	<b>Prüfungen im Druckgerätebau .....</b>	<b>169</b>
6.1	Zerstörungsfreie Prüfung .....	169
6.1.1	Volumenprüfverfahren .....	170
6.1.1.1	Durchstrahlungsprüfung .....	170
6.1.1.2	Ultraschallprüfung .....	176
6.1.2	Oberflächenprüfverfahren .....	185
6.1.2.1	Sichtprüfung .....	185
6.1.2.2	Eindringprüfung .....	188
6.1.2.3	Magnetpulverprüfung .....	192
6.1.2.4	Wirbelstromprüfung .....	197
6.1.3	ASME-Code .....	201
6.1.3.1	Prüfpersonal .....	201
6.1.3.2	Sichtprüfung .....	202
6.1.3.3	Eindringprüfung .....	202
6.1.3.4	Magnetpulverprüfung .....	202
6.1.3.5	Ultraschallprüfung .....	203
6.1.3.6	Durchstrahlungsprüfung .....	204
6.1.4	Schrifttum .....	205
6.2	Zerstörende Prüfung .....	208
6.2.1	Mechanisch-technologische Prüfungen .....	208
6.2.1.1	Zugversuch nach DIN EN ISO 6892-1 und Querzugversuch nach DIN EN ISO 4136 .....	210
6.2.1.2	Biegeversuch nach DIN EN ISO 5173 .....	212
6.2.1.3	Kerbschlagversuch DIN EN ISO 9016 .....	213
6.2.1.4	Härteprüfung nach DIN EN ISO 9015 .....	215
6.2.1.5	Zeitstandversuch nach DIN EN ISO 204 .....	216
6.2.2	Metallographische Prüfung nach DIN EN ISO 17639 .....	218
6.2.3	Bruchprüfung .....	219
6.2.4	Schrifttum .....	219
6.3	Verfahrens- und Schweißerprüfungen .....	220
6.3.1	Verfahrensprüfungen .....	222
6.3.2	Schweißerprüfungen .....	222
6.3.3	Arbeitsproben .....	222
6.3.4	Handfertigkeitssproben .....	223
6.3.5	Schrifttum .....	223
6.4	Funktionsprüfungen .....	225
6.4.1	Festigkeits- und Druckprüfung .....	225
6.4.1.1	Festigkeitsprüfung .....	225
6.4.1.2	Druckprüfung .....	226
6.4.2	Schrifttum .....	233

<b>7</b>	<b>Beispiele von geschweißten Druckgeräten – Dampferzeuger, Druckbehälter, Chemieapparate und Rohrleitungen</b> .....	234
7.1	Wesentliche Grundsätze zur Gestaltung und Herstellung von Schweißkonstruktionen im Druckgerätebau .....	234
7.1.1	Besonderheiten beim Schweißen .....	234
7.1.2	Einflussgrößen auf die Schweißbarkeit einer Konstruktion .....	235
7.1.3	Verfahren zum Schweißen metallischer Werkstoffe .....	236
7.1.4	Stumpfnähte im Druckgerätebau bevorzugen .....	241
7.1.5	Schweißnahtvorbereitung und Berechnung der Schweißgutmenge .....	242
7.1.6	Schweißen von Längs- und Rundnähten .....	242
7.1.7	Schweißen an Ausschnitten von Druckgeräten .....	245
7.1.8	Schweißen von Tragpratzen und Behälterfüßen .....	246
7.1.9	Schweißen an plattierten Behälter- und Rohrwandungen .....	247
7.1.10	Schweißen an unterschiedlichen Stahlwerkstoffen .....	248
7.1.11	Prüfgerechtes Gestalten von geschweißten Bauteilen im Druckgerätebau .....	249
7.1.12	Empfehlungen zur schweißtechnischen Planung im Druckgerätebau .....	253
	Schrifttum .....	256
7.2	Dampferzeuger .....	258
7.2.1	Bauarten und Anwendungsgebiete .....	258
7.2.2	Dreizugdampferzeuger – Rauchrohrkessel .....	261
7.2.3	Industriedampferzeuger .....	261
7.2.4	Dampferzeuger für Sonderbrennstoffe .....	263
7.2.5	Dampferzeuger für Kraftwerksanlagen .....	264
7.2.5.1	Öl- und erdgasbefeuerte Anlagen .....	264
7.2.5.2	Dampferzeuger mit Steinkohlefeuerung .....	264
7.2.5.3	Dampferzeuger mit Braunkohlefeuerung .....	266
7.2.6	Dampferzeuger hinter Gasturbinen .....	267
7.2.7	Dampferzeuger mit Wirbelschichtfeuerung .....	269
7.2.8	Schweißtechnische Herausforderungen beim Bau von Dampferzeugern .....	270
	Schrifttum .....	270
7.3	Druckbehälter, Chemiereaktoren und Chemieapparate .....	272
7.3.1	Bauarten und Anwendungsbereiche .....	272
7.3.2	Schweißverbindungen in Druckbehälter- und Apparatebau .....	272
7.3.2.1	Schwerer Druckbehälter aus 12CrMo9-10 .....	273
7.3.2.2	Chemiereaktor .....	276
7.3.2.3	Plattierter Chemieapparat (Digester) .....	279
7.3.2.4	Wärmetauscher und Röhrenreaktor .....	283
	Schrifttum .....	287
7.4	Rohrleitungen und Rohrleitungssysteme .....	288
	Schrifttum .....	296
<b>8</b>	<b>Qualitätssicherung und technisches Regelwerk im Druckgerätebau</b> .....	297
8.1	Selbstverantwortung des Herstellers .....	297
8.2	Gesetzliche Vorgaben – Zusammenhang zwischen Druckgeräterichtlinie (DGRL) und technischen Regeln .....	297
8.3	Technische Regelwerke im Druckbehälterbau .....	299
8.3.1	AD 2000-Regelwerk .....	299
8.3.2	Harmonisierte Norm EN 13445 .....	300
8.3.3	Anforderungen an den Betrieb .....	301
8.3.3.1	AD 2000-Regelwerk .....	301
8.3.3.2	DIN EN 13445 .....	301
8.3.4	Anforderung an das schweißtechnische Personal .....	301

8.3.4.1	AD 2000-Regelwerk .....	302
8.3.4.2	DIN EN 13445 .....	304
8.3.5	Zulassung von Arbeitsverfahren, Verfahrensprüfungen und Schweißanweisungen .....	304
8.3.5.1	Verfahrensprüfungen nach AD 2000-Merkblatt HP 2/1 .....	304
8.3.5.2	Anerkennung der Schweißverfahren nach DIN EN 13445-4 .....	305
8.3.6	Arbeitsprüfungen .....	305
8.3.7	Wärmebehandlung nach dem Schweißen .....	306
8.4	Technisches Regelwerk im industriellen Rohrleitungsbau .....	306
8.4.1	AD 2000-Regelwerk .....	306
8.4.2	Harmonisierte Norm EN 13480 .....	307
8.4.2.1	Qualitätssichernde Anforderungen an den Betrieb .....	308
8.4.2.2	Anforderungen an das Personal für die Herstellung von dauerhaften Verbindungen (Schweißverbindungen) .....	308
8.4.2.3	Anforderungen an Arbeitsverfahren für dauerhafte Verbindungen (Anforderungen an Schweißverfahren) .....	309
8.4.2.4	Anforderungen an das Personal zum Prüfen von dauerhaften Verbindungen (Schweiß- verbindungen) .....	310
8.5	Technische Regelwerke im Kesselbau .....	311
8.5.1	Harmonisierte Norm EN 12952 – Wasserrohrkessel und Anlagenkomponenten .....	311
8.5.1.1	Anforderungen an den Betrieb .....	312
8.5.1.2	Anforderungen an das schweißtechnische Personal .....	313
8.5.1.3	Qualifizierung und Anerkennung von Schweißverfahren .....	314
8.5.1.4	Wärmebehandlung nach dem Schweißen .....	314
8.5.2	Harmonisierte Norm EN 12953 – Großwasserraumkessel .....	314
8.5.2.1	Anforderungen an den Betrieb .....	315
8.5.2.2	Anforderungen an das Schweißpersonal .....	316
8.5.2.3	Anforderungen und Anerkennung der Schweißverfahren .....	316
8.5.2.4	Wärmebehandlung nach dem Schweißen .....	316
8.6	Schweißerprüfung nach DIN EN ISO 9606-1 .....	316
8.7	ASME Code Section IX .....	317
8.7.1	Einführung .....	317
8.7.2	Grundsätzliches .....	318
8.7.3	Schweißer-/Maschinenschweißer- und Schweißverfahrensprüfungen .....	319
8.7.3.1	Schweißer- und Maschinenschweißerprüfungen .....	319
8.7.3.2	Schweißverfahrensprüfungen .....	321
8.7.4	Informationsstellen zum ASME Code .....	321
8.7.5	Bedingungen zur Übereinstimmung der Anforderungen nach ASME Code Section IX mit der DGRL .....	322
8.8	Betriebssicherheitsverordnung – Anforderungen an den Betreiber von überwachungs- bedürftigen Anlagen .....	322
8.9	Schrifttum .....	324