dandelon.com
© 2008 AGI-Information Management Consultants
May be used for personal purposes only or by
libraries associated to dandelon.com network.

Günter Schulze

Die Metallurgie des Schweißens

Eisenwerkstoffe – Nichteisenmetallische Werkstoffe

Dritte, neu bearbeitete und erweiterte Auflage

Mit 497 Abbildungen, 97 Tabellen, 25 Beispielen im Text und 55 Aufgaben

Springer

Inhaltsverzeichnis

Häufig benutzte Symbole		XXIV
Abkürzungen		XXVII
1	**Grundlagen der Werkstoffkunde und der Korrosion**	1
1.1	**Schweißtechnik erfordert die Werkstoffkunde**	1
1.2	**Aufbau metallischer Werkstoffe**	2
1.2.1	Bindungsformen der Metalle	2
1.2.1.1	Metallische Bindung	4
1.2.1.2	Ionenbindung (heteropolare Bindung)	5
1.2.1.3	Atombindung (kovalente Bindung)	5
1.2.2	Gitteraufbau der Metalle	6
1.2.2.1	Gitterbaufehler (Realkristalle)	7
1.2.3	Gefüge, Korn, Kristallit, Korngröße	12
1.3	**Mechanische Eigenschaften der Metalle**	15
1.3.1	Verformungsvorgänge im Idealkristall	15
1.3.2	Verformung und Verfestigung in technischen Werkstoffen	16
1.3.3	Verfestigung	18
1.3.4	Einfluß der Korngrenzen	19
1.4	**Phasenumwandlungen**	22
1.4.1	Phasenumwandlung flüssig-fest	24
1.4.1.1	Primärkristallisation von (reinen) Metallen	24
1.4.1.2	Primärkristallisation von Legierungen	27
1.4.2	Phasenumwandlungen im festen Zustand	30
1.4.2.1	Diffusionskontrollierte Phasenumwandlungen	32
1.4.2.2	Diffusionslose Phasenumwandlungen (Martensitbildung)	34
1.5	**Thermisch aktivierte Vorgänge**	38
1.5.1	Diffusion	38
1.5.1.1	Nichtstationäre Diffusionsvorgänge	40
1.5.2	Erholung und Rekristallisation	42
1.5.3	Warmverformung	45
1.6	**Grundlagen der Legierungskunde**	46
1.6.1	Aufbau und Eigenschaften der Phasen	46
1.6.1.1	Mischkristalle	46
1.6.1.1.1	Substitutionsmischkristalle	46
1.6.1.1.2	Einlagerungsmischkristalle	48
1.6.1.2	Intermediäre Verbindungen	48
1.6.2	Zustandsschaubilder	49
1.6.2.1	Zustandsschaubild für vollkommene Löslichkeit im flüssigen und festen Zustand	50
1.6.2.2	Eutektische Systeme	51

1.6.2.3	Systeme mit begrenzter Löslichkeit	53
1.6.2.4	Systeme mit intermediären Phasen	53
1.6.2.5	Systeme mit Umwandlungen im festen Zustand	55
1.6.3	Nichtgleichgewichtszustände	55
1.6.3.1	Kristallseigerung	55
1.6.3.2	Entartetes Eutektikum	57
1.6.4	Aussagefähigkeit und Bedeutung der Zustandsschaubilder für das Schweißen	57
1.6.4.1	Abschätzen des Schweißverhaltens	57
1.6.4.2	Mechanische Gütewerte	58
1.6.5	Dreistoffsysteme	59
1.6.5.1	Ternäre Schaubilder in ebener Darstellung	61
1.6.5.1.1	Isothermische Schnitte	61
1.6.5.1.2	Vertikalschnitte	62
1.6.5.1.3	Quasibinäre Schnitte	62
1.7	**Grundlagen der Korrosion**	63
1.7.1	Definitionen und Begriffe	64
1.7.2	Elektrochemische Vorgänge	65
1.7.3	Korrosionsvorgänge in wäßrigen Lösungen	68
1.7.3.1	Wasserstoffkorrosion (Säurekorrosion)	70
1.7.3.2	Sauerstoffkorrosion	70
1.7.3.3	Das Korrosionsverhalten beeinflussende Faktoren	71
1.7.3.3.1	Ionenkonzentration	71
1.7.3.3.2	Sauerstoffgehalt	74
1.7.3.3.3	Elektrolyttemperatur	75
1.7.3.3.4	Strömungsgeschwindigkeit	76
1.7.3.3.5	Medienkonzentration	77
1.7.4	Elektrochemische Polarisation	77
1.7.4.1	Stromdichte-Potential-Kurven	78
1.7.4.2	Aktivierungspolarisation	79
1.7.4.3	Konzentrationspolarisation	80
1.7.5	Passivität	81
1.7.6	Korrosionsarten	83
1.7.6.1	Korrosionsarten ohne mechanische Beanspruchung	83
1.7.6.1.1	Kontaktkorrosion	84
1.7.6.1.2	Lochkorrosion (Lochfraß)	84
1.7.6.1.3	Spaltkorrosion (Berührungskorrosion)	86
1.7.6.1.4	Selektive Korrosion	87
1.7.6.1.5	Korrosionsvorgänge in besonderen Umgebungen	88
	Atmosphärische Korrosion	88
	Mikrobiologische Korrosion	90
1.7.6.2	Korrosionsarten mit mechanischer Beanspruchung	91
1.7.6.2.1	Spannungsrißkorrosion (SpRK)	91
1.7.6.2.2	Kavitation(skorrosion)	93
1.7.6.2.3	Erosion(skorrosion)	94
1.7.6.2.4	Reibkorrosion („Fressen")	94
1.7.7	Gestaltungsrichtlinien; Werkstoffwahl	94
1.7.7.1	Spalt-, Berührungskorrosion	98
1.7.7.2	Konzentrationselemente	98
1.7.7.3	Wasserlinienkorrosion, atmosphärische Korrosion	98
1.7.7.4	Kontaktkorrosion	99

1.7.7.5 Spannungsrißkorrosion (SpRK) 99
1.7.7.6 Besonderheiten beim Schweißen 100
1.7.8 Hinweise zum Korrosionsschutz 101
1.7.8.1 Aktive Schutzverfahren 101
1.7.8.1.1 Inhibitoren 101
1.7.8.1.2 Kathodischer Korrosionsschutz 103
1.7.8.1.3 Anodischer Korrosionsschutz 105
1.7.8.2 Passive Schutzverfahren 106
1.7.8.2.1 Organische Beschichtungen 106
1.7.8.2.2 Anorganische Überzüge 106
1.7.8.2.3 Metallische Überzüge 107

1.8 Aufgaben zu Kapitel 1 110

1.9 Schrifttum 121

2 Stähle – Werkstoffgrundlagen 123

2.1 Allgemeines 123

2.2 Einteilung der Stähle 124

2.3 Stahlherstellung 125
2.3.1 Erschmelzungsverfahren 125
2.3.1.1 Sekundärmetallurgie 128
2.3.2 Vergießungsverfahren; Desoxidieren 130
2.3.2.1 Vergießen und Erstarren des Stahles 131
2.3.2.2 Unberuhigt vergossener Stahl; Kennzeichen FU (U) 132
2.3.2.3 Beruhigt vergossener Stahl; Kennzeichen (R) 132
2.3.2.4 Besonders beruhigt vergossener Stahl; Kennzeichen FF (RR) 133

2.4 Das Eisen-Kohlenstoff-Schaubild (EKS) 133

2.5 Die Wärmebehandlung der Stähle 136
2.5.1 Glühbehandlungen 138
2.5.1.1 Spannungsarmglühen 138
2.5.1.2 Normalglühen 139
2.5.2 Härten und Vergüten 140
2.5.2.1 Härten 140
2.5.2.2 Vergüten 143
2.5.3 Die Austenitumwandlung dargestellt im ZTU- und ZTA-Schaubild 145
2.5.3.1 ZTU-Schaubilder für kontinuierliche Abkühlung 148
2.5.3.2 ZTU-Schaubilder für isothermische Wärmeführung 150
2.5.3.3 Möglichkeiten und Grenzen der ZTU-Schaubilder 150
2.5.3.4 Anwendbarkeit der ZTU-Schaubilder auf Schweißvorgänge 152
2.5.3.4.1 Allgemeines Verfahren 154
2.5.3.4.2 Isothermisches Schweißen 154
2.5.3.4.3 Stufenhärtungsschweißen 155
2.5.3.5 ZTA-Schaubilder 155
2.5.3.5.1 Isothermische ZTA-Schaubilder 156
2.5.3.5.2 Kontinuierliche ZTA-Schaubilder 157

2.6 Festigkeitserhöhung metallischer Werkstoffe 157
2.6.1 Prinzip der Festigkeitserhöhung 157
2.6.2 Abschätzen der maximalen Festigkeit 158
2.6.2.1 Theoretische Schubfestigkeit 158
2.6.2.2 Theoretische Kohäsionsfestigkeit 159
2.6.3 Methoden zum Erhöhen der Festigkeit 159
2.6.3.1 Kaltverfestigung 159
2.6.3.2 Mischkristallverfestigung 160
2.6.3.3 Ausscheidungshärtung 161
2.6.3.4 Korngrenzenhärtung 165
2.6.3.5 Martensithärtung 165
2.6.3.6 Thermomechanische Behandlung 167

2.7 Unlegierte und (niedrig-)legierte Stähle 167
2.7.1 Wirkung der Legierungselemente 167
2.7.2 Unlegierte Baustähle nach DIN EN 10025-2 168
2.7.3 Stähle für den Maschinen- und Fahrzeugbau 171
2.7.3.1 Vergütungsstähle 174
2.7.3.2 Einsatzstähle 175
2.7.4 Warmfeste Stähle 177
2.7.5 Kaltzähe Stähle 182
2.7.6 Feinkornbaustähle 184
2.7.6.1 Normalgeglühte Feinkornbaustähle 188
2.7.6.1.1 Terrassenbruch 189
2.7.6.2 Thermomechanisch gewalzte Feinkornbaustähle 190
2.7.6.2.1 Metallkundliche Grundlagen; Stahlherstellung 191
2.7.6.2.2 Eigenschaften und Verarbeitung 192
2.7.6.2.3 DIN EN 10028-5: Feinkornbaustähle, thermomechanisch umgeformt 195
2.7.6.2.4 DIN EN 10208: Stahlrohre für Rohrleitungen für brennbare Medien 195
2.7.6.3 Vergütete Feinkornbaustähle 196

2.8 Korrosionsbeständige Stähle 198
2.8.1 Erzeugen und Erhalten der Korrosionsbeständigkeit 198
2.8.2 Korrosionsverhalten der Stähle in speziellen Medien 200
2.8.3 Werkstoffliche Grundlagen 201
2.8.3.1 Die Zustandsschaubilder Fe-Cr, Fe-Ni 201
2.8.3.2 Das Zustandsschaubild Fe-Cr-Ni 202
2.8.3.3 Einfluß wichtiger Legierungselemente 203
2.8.3.3.1 Nickel 203
2.8.3.3.2 Kohlenstoff 204
2.8.3.3.3 Stickstoff 204
2.8.3.3.4 Molybdän 205
2.8.3.3.5 Silicium 205
2.8.3.3.6 Wasserstoff 205
2.8.3.4 Ausscheidungs- und Entmischungsvorgänge 206
2.8.3.4.1 Interkristalline Korrosion (IK) 206
Gegenmaßnahmen 208
2.8.3.4.2 Sigma-Phase (σ-Phase) 208
2.8.3.4.3 475 °C-Versprödung 209
2.8.4 Einteilung und Stahlsorten 212
2.8.4.1 Martensitische Chromstähle 213
2.8.4.2 Ferritische Chromstähle 213

2.8.4.3 Austenitische Chrom-Nickel-Stähle 215
Stickstofflegierte austenitische Stähle 218
2.8.4.4 Austenitisch-ferritische Stähle (Duplexstähle) 219

2.9 Aufgaben zu Kapitel 2 222

2.10 Schrifttum 233

3 Einfluß des Schweißprozesses auf das Verhalten und die Eigenschaften der Verbindung 235

3.1 Schweißbarkeit – Begriff und Definition 235
3.1.1 Schweißeignung 236
3.1.2 Schweißsicherheit 236
3.1.3 Schweißmöglichkeit 236
3.1.4 Bewertung und Folgerungen 237

3.2 Schweißeignung der Stähle 237
3.2.1 Unlegierte Stähle 237
3.2.1.1 Erschmelzungs- und Vergießungsart 237
3.2.1.2 Chemische Zusammensetzung 238
3.2.2 Legierte Stähle 241

3.3 Wirkung der Wärmequelle 242
3.3.1 Temperatur-Zeit-Verlauf 243
3.3.2 Eigenspannung; Schrumpfung, Verzug 247
3.3.2.1 Querschrumpfung 250
3.3.2.2 Winkelschrumpfung 250
3.3.2.3 Längsschrumpfung 251
3.3.2.4 Haupteinflüsse auf Schrumpfungen und Spannungen 251
3.3.2.4.1 Wärmemenge und Schweißverfahren 251
3.3.2.4.2 Werkstoffeinfluß 252
3.3.2.4.3 Konstruktionseinfluß 252
3.3.3 Metallurgische Wirkungen des Temperatur-Zeit-Verlaufs 252
3.3.3.1 Sauerstoff 254
3.3.3.2 Stickstoff 255
3.3.3.3 Wasserstoff 256

3.4 Das Sprödbruchproblem 259
3.4.1 Werkstoffmechanische Grundlagen 259
3.4.2 Probleme konventioneller Berechnungskonzepte 261
3.4.3 Sprödbruchbegünstigende Faktoren 263
3.4.3.1 Werkstoffliche Faktoren 264
3.4.3.2 Konstruktive Faktoren 265
3.4.4 Maßnahmen zum Abwenden des Sprödbruchs 266

3.5 Fehler in der Schweißverbindung 266
3.5.1 Metallurgische Fehler 267
3.5.1.1 Die Wirkung der Gase 268
3.5.1.1.1 Verhindern der Gasaufnahme 269
3.5.1.2 Fehler beim Schweißbeginn und Schweißende 269

3.5.1.3	Probleme des Einbrands	271
3.5.1.4	Einschlüsse; Schlacken	272
3.5.1.5	Zündstellen	273
3.5.1.6	Rißbildung im Schweißgut und in der WEZ	274
3.5.2	Bewertung der Fehler	283
3.6	**Aufgaben zu Kapitel 3**	286
3.7	**Schrifttum**	293
4	**Schweißmetallurgie der Eisenwerkstoffe**	295
4.1	**Aufbau der Schweißverbindung**	295
4.1.1	Vorgänge im Schweißbad	296
4.1.1.1	Die Primärkristallisation der Schweißschmelze	296
4.1.1.2	Massentransporte im Schweißbad	303
4.1.2	Werkstoffliche Vorgänge in der WEZ	305
4.1.3	Die WEZ in Schweißverbindungen aus umwandlungsfähigen Stählen	306
4.1.3.1	Der Einfluß des Nahtaufbaus; Einlagen- Mehrlagentechnik	312
4.1.3.2	Eigenschaften und mechanische Gütewerte	314
4.1.3.2.1	Härteverteilung	315
4.1.3.2.2	Mechanische Eigenschaften des Schweißguts	318
4.1.3.2.3	Mechanische Eigenschaften der WEZ	321
4.1.3.3	Vorwärmen der Fügeteile	323
4.1.3.4	Einfluß der Stahlherstellungsart und der chemischen Zusammensetzung	329
4.1.3.4.1	Seigerungen	329
4.1.3.4.2	Alterungsprobleme	330
4.1.4	Verbinden unterschiedlicher Werkstoffe	330
4.2	**Zusatzwerkstoffe und Hilfsstoffe zum Schweißen unlegierter Stähle und Feinkornbaustähle**	332
4.2.1	Konzepte der Normung	332
4.2.2	Metallurgische Betrachtungen	333
4.2.3	Schweißzusätze für Stähle mit einer Mindeststreckgrenze bis 500 N/mm²	333
4.2.3.1	Stabelektroden für das Lichtbogenhandschweißen (DIN EN 499)	333
4.2.3.1.1	Aufgaben der Elektrodenumhüllung	333
4.2.3.1.2	Metallurgische Grundlagen	335
4.2.3.1.3	Eigenschaften der wichtigsten Stabelektroden	337
	Sauerumhüllte Stabelektroden (A)	337
	Rutilumhüllte Stabelektroden (R)	338
	Basischumhüllte Stabelektroden (B)	338
	Zelluloseumhüllte Stabelektroden (C)	340
4.2.3.1.4	Bedeutung des Wasserstoffs	340
4.2.3.1.5	Normung der umhüllten Stabelektroden	344
4.2.3.2	Schweißzusätze für das Schutzgasschweißen	347
4.2.3.2.1	WIG-Schweißen	347
4.2.3.2.2	MSG-Schweißen	349
4.2.3.3	Schweißzusätze für das UP-Schweißen	357
4.2.3.3.1	Drahtelektroden	357

4.2.3.3.2	Schweißpulver	360
	Schmelzpulver	362
	Agglomerierte Pulver	362
	Metallurgisches Verhalten der Schweißpulver	363
4.2.4	Schweißzusätze für Stähle mit einer Mindeststreckgrenze über 500 N/mm²	368
4.3	**Schweißen der wichtigsten Stahlsorten**	368
4.3.1	Unlegierte niedriggekohlte C-Mn-Stähle	368
4.3.1.1	Baustähle nach DIN EN 10025-2	373
4.3.1.1.1	Gütegruppen (Stahlgütegruppen)	376
4.3.1.1.2	Wahl der Gütegruppe	377
4.3.2	Feinkornbaustähle; normalgeglüht und thermomechanisch behandelt	378
4.3.2.1	Allgemeine Konzepte	378
4.3.2.2	Einfluß der Abkühlbedingungen auf die mechanischen Gütewerte der Verbindung	379
4.3.2.3	Fertigungstechnische Hinweise	383
4.3.2.3.1	Nahtvorbereitung	383
4.3.2.3.2	Wärmebehandlung	384
4.3.2.3.3	Schweißtechnologie	386
4.3.2.3.4	Rißerscheinungen	386
4.3.2.4	Schweißzusatzwerkstoffe	387
4.3.2.4.1	Stabelektroden	387
4.3.2.4.2	Drahtelektroden; Schweißpulver (UP-Schweißen)	389
4.3.2.4.3	Drahtelektroden; Schutzgase (MSG-Schweißen)	392
4.3.3	Feinkornbaustähle; vergütet	392
4.3.4	Höhergekohlte Stähle	396
4.3.5	Warmfeste Stähle	400
4.3.5.1	Ferritische Stähle (ferritisch-perlitisch)	401
4.3.5.2	Ferritische Stähle (ferritisch-bainitisch)	401
4.3.5.3	Ferritische Stähle (martensitisch)	403
4.3.5.4	Austenitische Stähle	405
4.3.5.5	Versprödungs- und Rißmechanismen	405
4.3.5.5.1	Wiedererwärmungsriß (Ausscheidungsriß)	405
4.3.5.5.2	Anlaßversprödung	406
4.3.6	Kaltzähe Stähle	407
4.3.7	Korrosionsbeständige Stähle	408
4.3.7.1	Einfluß der Verarbeitung auf das Korrosionsverhalten	408
4.3.7.2	Konstitutions-Schaubilder	411
4.3.7.3	Martensitische Chromstähle	416
4.3.7.4	Ferritische und halbferritische Stähle	419
4.3.7.5	Austenitische Chrom-Nickel-Stähle	425
4.3.7.5.1	Primärkristallisation	426
4.3.7.5.2	Heißrißbildung	427
4.3.7.5.3	Messerlinienkorrosion	430
4.3.7.5.4	Metallurgie des Schweißens	431
4.3.7.6	Austenitisch-ferritische Stähle (Duplexstähle)	434
4.3.8	Verbinden/Auftragen unterschiedlicher Werkstoffe	440
4.3.8.1	Austenit-Ferrit-Verbindungen	440
4.3.8.2	Schweißplattieren	442
4.3.8.3	Schweißpanzern	445

4.4 Eisen-Gußwerkstoffe 450
4.4.1 Stahlguß (G, GS, GX) 450
4.4.1.1 Stahlguß für allgemeine Verwendungszwecke 450
4.4.1.1.1 Fertigungsschweißen 452
4.4.1.1.2 Instandsetzungsschweißen 453
4.4.1.1.3 Konstruktionsschweißen 453
4.4.1.2 Hochfester schweißgeeigneter Stahlguß 453
4.4.1.3 Legierter Stahlguß 455
4.4.2 Gußeisen (EN-GJL, alt: GG; EN-GJS, alt: GGG; GGV) 455
4.4.2.1 Gußeisen mit Lamellengrafit (EN-GJL, alt: GG) 457
4.4.2.1.1 Artgleiches Schweißen (Gußeisenwarmschweißen) 460
4.4.2.1.2 Artfremdes Schweißen (Gußeisenkaltschweißen) 463
4.4.2.2 Gußeisen mit Kugelgrafit (EN-GJS, alt: GGG) 463
4.4.2.2.1 Artgleiches Schweißen 464
4.4.2.2.2 Artfremdes Schweißen 464
4.4.2.2.3 Legiertes (austenitisches) Gußeisen mit Kugelgrafit 466
4.4.3 Temperguß (EN-GJMW, alt: GTW; EN-GJMB, alt: GTS) 466
4.4.3.1 Weißer Temperguß (EN-GJMW, alt: GTW) 466
4.4.3.2 Schwarzer Temperguß (EN-GJMB, alt: GTS) 467

4.5 Aufgaben zu Kapitel 4 470

4.6 Schrifttum 487

5 Schweißmetallurgie der nichteisenmetallischen Werkstoffe 493

5.1 Die WEZ in Schweißverbindungen aus Nichteisenmetallen 493
5.1.1 Einphasige Werkstoffe 494
5.1.2 Mehrphasige Werkstoffe 495
5.1.3 Ausscheidungshärtende Legierungen 495
5.1.4 Hochreaktive Werkstoffe 497
5.1.5 Kaltverfestigte Werkstoffe 498

5.2 Schwermetalle 498
5.2.1 Kupfer und Kupferlegierungen 499
5.2.1.1 Hinweise zum Schweißen 501
5.2.1.1.1 Kupfer 501
5.2.1.1.2 Kupferlegierungen 505
Kupfer-Zink-Legierungen (Messinge) 506
Kupfer-Zinn-Legierungen (Zinnbronzen) 507
Kupfer-Aluminium-Legierungen (Aluminiumbronzen) 508
Kupfer-Nickel-Legierungen 509
5.2.2 Nickel und Nickellegierungen 510
5.2.2.1 Einfluß der Legierungselemente auf das Schweißverhalten 514
5.2.2.2 Schweißmetallurgie 515
5.2.2.2.1 Allgemeine Werkstoffprobleme 515
Nickel-Chrom-(Eisen-)Legierungen 516
Molybdänhaltige Nickelbasis-Legierungen 516
Ausscheidungshärtende Nickelbasis-Legierungen 517
5.2.2.3 Schweißpraxis 519

5.3 Leichtmetalle 520
5.3.1 Aluminium und Aluminiumlegierungen 520
5.3.1.1 Lieferformen 522
5.3.1.2 Bezeichnungsweise 523
5.3.1.3 Metallurgisch bedingte Schweißdefekte 525
5.3.1.3.1 Heißrisse 525
5.3.1.3.2 Spannungsrisse 526
5.3.1.3.3 Poren 526
5.3.1.4 Aluminium-Knetlegierungen 526
5.3.1.5 Aluminium-Gußlegierungen 527
5.3.1.6 Ausscheidungshärtende Aluminiumlegierungen 527
5.3.1.7 Aluminium-Sonderlegierungen 533
5.3.1.7.1 Aluminium-Lithiumlegierungen 533
5.3.1.7.2 Aluminium-Druckgußlegierungen 533
5.3.1.7.3 Dispersionshärtende Aluminiumlegierungen 534
5.3.1.8 Schweißzusatzwerkstoffe 535
5.3.1.9 Schweißpraxis 535
5.3.1.9.1 Vorbereitende Maßnahmen 535
5.3.1.9.2 Schweißverfahren 538
Wolfram-Inertgasschweißen (WIG) 538
Metall-Inertgasschweißen (MIG) 539
Laserschweißen 540
5.3.2 Magnesium und Magnesiumlegierungen 540
5.3.3 Beryllium 542

5.4 Hochschmelzende und hochreaktive Werkstoffe 543
5.4.1 Titan und Titanlegierungen 543
5.4.1.1 Eigenschaften und Schweißverhalten der Titanwerkstoffe 546
5.4.1.1.1 Unlegiertes Titan 546
5.4.1.1.2 Alpha- und Nah-Alpha-Legierungen 547
5.4.1.1.3 Alpha-Beta-Legierungen 547
5.4.1.1.4 Beta-Legierungen 549
5.4.1.1.5 Titan-Sonderlegierungen 549
5.4.1.2 Metallurgisch bedingte Schweißnahtdefekte 550
5.4.1.3 Schweißpraxis 551
5.4.2 Molybdän und Molybdänlegierungen 552
5.4.3 Zirkonium und Zirkoniumlegierungen 553
5.4.4 Tantal und Tantallegierungen 554

5.5 Aufgaben zu Kapitel 5 556

5.6 Schrifttum 463

6 Anhang 567

6.1 Prüfung auf Heißrißanfälligkeit 567
6.1.1 Verfahren mit Selbstbeanspruchung der Probe 568
6.1.2 Verfahren mit Fremdbeanspruchung der Probe 568

6.2 Prüfung auf Kaltrissigkeit 571
6.2.1 Implant-Test 571
6.2.2 Der *Pellini*-Versuch 574

6.3 Der Kerbschlagbiegeversuch (DIN EN 10045) 575

6.4 Der instrumentierte Kerbschlagbiegeversuch 579

6.5 Das COD-Konzept von *Cottrell* und *Wells* 582

6.6 Schrifttum 583

7 Sachwortverzeichnis 584