

Günter Schulze

Die Metallurgie des Schweißens

Eisenwerkstoffe - Nichteisenmetallische
Werkstoffe

4., neu bearbeitete Auflage

 Springer

Inhalt

| | |
|-------------------------|--------|
| Häufig benutzte Symbole | .XVIII |
| Abkürzungen | XX |

| | | |
|---------|--|-----------|
| 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 in Idealkristallen | 15 |
| 1.3.2 | Verformungsvorgänge in technischen Metallen | 16 |
| 1.3.3 | Verfestigung der Metalle | 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 |
| | Ausscheidungsumwandlung | 32 |
| | Ordnungsumwandlung | 33 |
| | Massivumwandlung | 33 |
| | Polymorphe Umwandlung | 34 |
| 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 |
| I | Substitutionsmischkristalle | 46 |
| | Einlagerungsmischkristalle | 48 |

| | <i>Inhalt</i> | <i>IX</i> |
|---------------|--|-----------|
| 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 | " 5 1 |
| 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 | Aussägefähigkeit 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 |
| | Isothermische Schnitte | 61 |
| | Vertikalschnitte | 62 |
| | 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 | Korrosionsmechanismen in wässrigen Lösungen | 68 |
| 1.7.3.1 | Wasserstoffkorrosion (Säurekorrosion) | 69 |
| 1.7.3.2 | Sauerstoffkorrosion | 70 |
| 1.7.3.3 | Das Korrosionsverhalten beeinflussende Faktoren | 71 |
| | Ionenkonzentration | 71 |
| | Sauerstoffgehalt | „ 7 4 |
| | Elektrolyttemperatur | 75 |
| | Strömungsgeschwindigkeit | 76 |
| | Medienkonzentration | 77 |
| 1.7.4 | Elektrochemische Polarisierung | 77 |
| 1.7.4.1 | Stromdichte-Potenzial-Kurven | 78 |
| 1.7.4.2 | Aktivierungspolarisation | 78 |
| 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 | Spannungsrissskorrosion (SpRK) | 91 |
| 1.7.6.2.2 | Kavitation(skorrosion) | 93 |
| 1.7.6.2.3 | Erosion(skorrosion) | 94 |
| V7.6.2.4 | Reibkorrosion (»Fressen«) | 94 |

| <u>X</u> | <u>Inhalt</u> | <u>^</u> |
|-------------|---|-------------|
| 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 |
| | Inhibitoren ^ | 101 |
| | Kathodischer Korrosionsschutz | 103 |
| | Anodischer Korrosionsschutz | 105 |
| 1.7.8.2 | Passive Schutzverfahren | 106 |
| | Organische Beschichtungen | 106 |
| | Anorganische Überzüge | 106 |
| | 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 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.^ 2.5.3.3 | Möglichkeiten und Grenzen der ZTU-Schaubilder | 150 |
| 2.5.3.4 | Anwendbarkeit der ZTU-Schaubilder auf Schweißvorgänge | 152 |
| | Allgemeines Verfahren | 154 |

| | | |
|------------|---|------------|
| | Isothermisches Schweißen | 154 |
| | Stufenhärtungsschweißen | 155 |
| 2.5.3.5 | ZTA-Schaubilder | 155 |
| | Isothermische ZTA-Schaubilder | 156 |
| | 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 |
| | Terrassenbruch | 189 |
| 2.7.6.2 | Thermomechanisch gewalzte Feinkornbaustähle | 190 |
| | Metallkundliche Grundlagen; Stahlherstellung | 191 |
| | Eigenschaften und Verarbeitung | 192 |
| 2.7.6.3 | Vergütete Feinkornbaustähle | 197 |
| 2.8 | Korrosionsbeständige Stähle | 200 |
| 2.8.1 | Erzeugen und Erhalten der Korrosionsbeständigkeit | 200 |
| 2.8.2 | Korrosionsverhalten der Stähle in speziellen Medien | 202 |
| | Korrosion in Wässern | 202 |
| | Korrosion durch chemischen Angriff | 202 |
| 2.8.3 | Werkstoffliche Grundlagen | 203 |
| 2.8.3.1 | Die Zustandsschaubilder Fe-Cr, Fe-Ni | 203 |
| 2.8.3.2 | Das Zustandsschaubild Fe-Cr-Ni | 204 |
| 2.8.3.3 | Einfluss wichtiger Legierungselemente | 205 |
| | Nickel | 205 |
| | Kohlenstoff | 206 |
| | Stickstoff | 206 |
| | Molybdän | 207 |
| | Silicium | 207 |
| | Wasserstoff | 207 |
| 2.8.3.4 | Ausscheidungs- und Entmischungsvorgänge | 208 |
| 2:8.3.4.1 | Interkristalline Korrosion (IK) | 208 |

| | | |
|-------------|---|------------|
| | Gegenmaßnahmen | 210 |
| 2.8.3.4.2 | Sigma-Phase (cr-Phase) | 210 |
| 2.8.3.4.3 | 475°C-Versprödung | 211 |
| 2.8.4 | Einteilung und Stahlsorten | 214 |
| 2.8.4.1 | Martensitische Chromstähle | 215 |
| 2.8.4.2 | Ferritische Chromstähle | 215 |
| 2.8.4.3 | Austenitische Chrom-Nickel-Stähle | 217 |
| | Stickstofflegierte austenitische Stähle | 220 |
| 2.8.4.4 | Austenitisch-ferritische Stähle (Duplexstähle) | 221 |
| 2.9 | Aufgaben zu Kapitel 2 | 224 |
| 2.10 | Schrifttum | 235 |
| 3 | Einfluss des Schweißprozesses auf die Eigenschaften der Verbindung | 237 |
| 3.1 | Schweißbarkeit - Begriff und Definition | 237 |
| 3.1.1 | Schweißeignung | 238 |
| 3.1.2 | Schweißsicherheit | 238 |
| 3.1.3 | Schweißmöglichkeit | 238 |
| 3.1.4 | Bewertung und Folgerungen | 239 |
| 3.2 | Schweißeignung der Stähle | 239 |
| 3.2.1 | Unlegierte Stähle | 239 |
| 3.2.1.1 | Erschmelzungs- und Vergießungsart | 239 |
| 3.2.1.2 | Chemische Zusammensetzung | 240 |
| 3.2.2 | Legierte Stähle | 243 |
| 3.3 | Wirkung der Wärmequelle | 244 |
| 3.3.1 | Temperatur-Zeit-Verlauf | 245 |
| 3.3.2 | Eigenspannung; Schrumpfung, Verzug | 249 |
| 3.3.2.1 | Querschrumpfung | 252 |
| 3.3.2.2 | Winkelschrumpfung | 252 |
| 3.3.2.3 | Längsschrumpfung | 253 |
| 3.3.2.4 | Haupteinflüsse auf Schrumpfungen und Spannungen | 253 |
| | Wärmemenge und Schweißverfahren | 253 |
| | Werkstoffeinfluss | 254 |
| | Konstruktionseinfluss | 254 |
| 3.3.3 | Metallurgische Wirkungen des Temperatur-Zeit-Verlaufs | 254 |
| 3.3.3.1 | Sauerstoff | 256 |
| 3.3.3.2 | Stickstoff | 257 |
| 3.3.3.3 | Wasserstoff | 258 |
| 3.4 | Das Sprödbruchproblem | 261 |
| 3.4.1 | Werkstoffmechanische Grundlagen | 261 |
| 3.4.2 | Probleme konventioneller Berechnungskonzepte | 263 |
| 3.4.3 | Sprödbruchbegünstigende Faktoren | 265 |
| 3.4.3.1 | Werkstoffliche Faktoren | 266 |
| 3.4.3.2 | Konstruktive Faktoren | 267 |
| 3.4.4 | Maßnahmen zum Abwenden des Sprödbruchs | 268 |

| | | |
|------------|---|-----|
| 3.5 | Fehler in der Schweißverbindung | 268 |
| 3.5.1 | Metallurgische Fehler | 269 |
| 3.5.1.1 | Die Wirkung der Gase | 270 |
| | Verhindern der Gasaufnahme ^ | 271 |
| 3.5.1.2 | Fehler beim Schweißbeginn und Schweißende " | 271 |
| 3.5.1.3 | Probleme des Einbrands | 273 |
| 3.5.1.4 | Einschlüsse; Schlacken | 274 |
| 3.5.1.5 | Zündstellen | 275 |
| 3.5.1.6 / | Rissbildung im Schweißgut und in der WEZ | 276 |
| 3.5.2 | Bewertung der Fehler | 286 |
| 3.6 | Aufgaben zu Kapitel 3 | 289 |
| 3.7 | Schrifttum | 296 |
| 4 | Schweißmetallurgie der Eisenwerkstoffe | 299 |
| 4.1 | Aufbau der Schweißverbindung | 299 |
| 4.1.1 | Vorgänge im Schweißbad | 300 |
| 4.1.1.1 | Die Primärkristallisation der Schweißschmelze | 300 |
| 4.1.1.2 | Massentransporte im Schweißbad • | 307 |
| 4.1.2 | Werkstoffliche Vorgänge in der Wärmeeinflusszone | 309 |
| 4.1.3 | Die WEZ in Schweißverbindungen aus umwandlungsfähigen Stählen | 310 |
| 4.1.3.1 | Der Einfluss des Nahtaufbaus; Einlagen-, Mehrlagentechnik | 316 |
| 4.1.3.2 | Eigenschaften und mechanische Gütewerte | 318 |
| | Härteverteilung | 319 |
| | Mechanische Eigenschaften des Schweißguts | 322 |
| | Mechanische Eigenschaften der Wärmeeinflusszone | 325 |
| 4.1.3.3 | Vorwärmen der Fügeteile | 327 |
| 4.1.3.4 | Einfluss der Stahlherstellungsart und der chemischen Zusammensetzung | 333 |
| | Seigerungen | 333 |
| | Alterungsprobleme | 334 |
| 4.1.4 | Verbinden unterschiedlicher Werkstoffe | 334 |
| 4.2 | Zusatzwerkstoffe und Hilfsstoffe zum Schweißen unlegierter Stähle und von Feinkornbaustählen | 336 |
| 4.2.1 | Konzepte der Normung | 336 |
| 4.2.2 | Metallurgische Betrachtungen | 337 |
| 4.2.3 | Schweißzusätze für Stähle mit einer Mindeststreckgrenze bis 500 N/mm ² | 337 |
| 4.2.3.1 | Umhüllte Stabelektroden für das Lichtbogenhandschweißen (DIN EN ISO 2560) | 337 |
| 4.2.3.1.1 | Aufgaben der Elektrodenumhüllung | 338 |
| 4.2.3.1.2 | Metallurgische Grundlagen | 339 |
| 4.2.3.1.3 | Eigenschaften der wichtigsten Stabelektroden | 341 |
| | ^Sauer-umhüllte Stabelektroden (A) | 341 |
| | Rutil-umhüllte Stabelektroden (R) | 342 |
| | Basisch-umhüllte Stabelektroden (B) | 342 |
| ➤ | Zellulose-umhüllte Stabelektroden (C) | 344 |

| | | |
|------------|---|-----|
| 4.2.3.1.4 | Bedeutung des Wasserstoffs | 344 |
| 4.2.3.1.5 | Normung der umhüllten Stabelektroden | 349 |
| 4.2.3.2 | Schweißzusätze für das Schutzgasschweißen | 353 |
| | WIG-Schweißen | 353 |
| | MSG-Schweißen | 355 |
| 4.2.3.3 | Schweißzusätze für das UP-Schweißen | 363 |
| 4.2.3.3.1 | Drahtelektroden | 363 |
| 4.2.3.3.2 | Schweißpulver | 366 |
| | Schmelzpulver | 368 |
| | Agglomerierte Pulver | 368 |
| | Metallurgisches Verhalten der Schweißpulver | 369 |
| 4.2.4 | Schweißzusätze für Stähle mit einer Mindeststreckgrenze über 500 N/mm ² | 374 |
| 4.3 | Schweißen der wichtigsten Stahlsorten | 374 |
| 4.3.1 | Unlegierte niedriggekohlte C-Mn-Stähle | 374 |
| 4.3.1.1 | Baustähle nach DIN EN 10025-2 | 379 |
| | Gütegruppen (Stahlgütegruppen) | 382 |
| | Wahl der Gütegruppe | 383 |
| 4.3.2 | Feinkornbaustähle; normalgeglüht und thermomechanisch behandelt | 384 |
| 4.3.2.1 | Allgemeine Konzepte | 384 |
| 4.3.2.2 | Einfluss der Abkühlbedingungen auf die mechanischen Gütewerte der Verbindung | 385 |
| 4.3.2.3 | Fertigungstechnische Hinweise | 389 |
| | Nahtvorbereitung | 389 |
| | Wärmebehandlung | 390 |
| | Schweißtechnologie | 392 |
| | Risserscheinungen | 392 |
| 4.3.2.4 | Schweißzusatzwerkstoffe | 393 |
| | Stabelektroden | 393 |
| | Drahtelektroden; Schweißpulver (UP-Schweißen) | 395 |
| | Drahtelektroden; Schutzgase (MSG-Schweißen) | 398 |
| 4.3.3 | Feinkornbaustähle; vergütet | 398 |
| 4.3.4 | Höhergekohlte Stähle | 402 |
| 4.3.5 | Warmfeste Stähle | 406 |
| 4.3.5.1 | Ferritische Stähle (ferritisch-perlitisch) | 407 |
| 4.3.5.2 | Ferritische Stähle (ferritisch-bainitisch) | 407 |
| 4.3.5.3 | Ferritische Stähle (martensitisch) | 409 |
| 4.3.5.4 | Austenitische Stähle | 411 |
| 4.3.5.5 | Versprödungs- und Rissmechanismen | 411 |
| | Wiedererwärmungsris (Ausscheidungsris) | 411 |
| | Anlassversprödung | 412 |
| 4.3.6 | Kaltzähe Stähle | 413 |
| 4.3.7 | Korrosionsbeständige Stähle | 414 |
| 4.3.7.1 | Einfluss der Verarbeitung auf das Korrosionsverhalten | 414 |
| 4.3.7.2 | Konstitutions-Schaubilder | 417 |
| f* | 4.3.7.3 Maftensitische Chromstähle | 422 |
| | 4.3.7.4 Ferritische und halferritische Stähle | 425 |
| | 4.3.7.5 Austenitische Chrom-Nickel-Stähle | 431 |
| \$ | Primärkristallisation | 433 |
| | Heißrissbildung | 433 |

| | <i>Inhalt</i> | <i>XV</i> |
|------------|---|------------|
| | Messerlinienkorrosion | 436 |
| | Metallurgie des Schweißens | 437 |
| 4.3.7.6 | Austenitisch-ferritische Stähle (Duplexstähle) | 440 |
| 4.3.8 | Verbinden/Auftragen unterschiedlicher Werkstoffe | 446 |
| 4.3.8.1 | Austenit-Ferrit-Verbindungen | 446 |
| 4.3.8.2 | Schweißplattieren | 448 |
| 4.3.8.3 | Schweißpanzern | 451 |
| 4.4 | Eisen-Gusswerkstoffe | 456 |
| 4.4.1 | Stahlguss (G, GS, GE, GX) | 456 |
| 4.4.1.1 | Stahlguss für allgemeine Verwendung | 456 |
| - | Fertigungsschweißen | 457 |
| | Instandsetzungsschweißen | 460 |
| | Konstruktionsschweißen | 460 |
| 4.4.1.2 | Hochfester schweißgeeigneter Stahlguss | 460 |
| 4.4.1.3 | Legierter Stahlguss | 462 |
| 4.4.2 | Gusseisen (EN-GJL, alt: GG; EN-GJS, alt: GGG; ISO/JV, alt: GJV) | 462 |
| 4.4.2.1 | Gusseisen mit Lamellengrafit (EN-GJL, alt: GG) | 463 |
| | Artgleiches Schweißen (Gusseisenwarmschweißen) | 466 |
| | Artfremdes Schweißen (Gusseisenkaltschweißen) | 467 |
| 4.4.2.2 | Gusseisen mit Kugelgrafit (EN-GJS, alt: GGG) | 467 |
| | Artgleiches/artähnliches Schweißen | 471 |
| | Artfremdes Schweißen | 471 |
| | Schweißverfahren | 471 |
| | Legiertes (austenitisches) Gusseisen mit Kugelgrafit | 473 |
| 4.4.3 | Temperguss (EN-GJMW, alt: GTW; EN-GJMB, alt: GTS) | 474 |
| 4.4.3.1 | Weißer Temperguss (EN-GJMW, alt: GTW) | 474 |
| 4.4.3.2 | Schwarzer Temperguss (EN-GJMB, alt: GTS) | 475 |
| 4.5 | Aufgaben zu Kapitel 4 | 478 |
| 4.6 | Schrifttum | 495 |
| 5 | Schweißmetallurgie der nichteisenmetallischen Werkstoffe | 503 |
| 5.1 | Die WEZ in Schweißverbindungen aus Nichteisenmetallen | 503 |
| 5.1.1 | Einphasige Werkstoffe | 504 |
| 5.1.2 | Mehrphasige Werkstoffe | 505 |
| 5.1.3 | Ausscheidungshärtende Legierungen | 505 |
| 5.1.4 | Hochreaktive Werkstoffe | 507 |
| 5.1.5 | Kaltverfestigte Werkstoffe | 508 |
| 5;2 | Schwermetalle | 508 |
| 5.2:1 | Kupfer und Kupferlegierungen | 509 |
| 5.2.1.1 | Hinweise zum Schweißen | 511 |
| 5.2.1.1.1 | Kupfer | 511 |
| 5.2.1.1.2 | Kupferlegierungen | 515 |
| | Kupfer-Zink-Legierungen (Messinge) | 516 |
| | Kupfer-Zinn-Legierungen (Zinnbronzen) | 518 |
| | Kupfer-Aluminium-Legierungen (Aluminiumbronzen) | 518 |
| | Kupfer-Nickel-Legierungen | 519 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 5.2.2 | Nickel und Nickellegierungen | 520 |
| 5.2.2.1 | Einfluss der Legierungselemente auf das Schweißverhalten | 524 |
| 5.2.2.2 | Schweißmetallurgie | 525 |
| 5.2.2.2.1 | Allgemeine Werkstoffprobleme | 525 |
| | Nickel-Chrom-(Eisen-)Legierungen | 526 |
| | Molybdänhaltige Nickelbasis-Legierungen | 526 |
| | Ausscheidungshärtende Nickelbasis-Legierungen | 527 |
| 5.2.2.3 | Schweißpraxis | 529 |
| 5.3 | Leichtmetalle | 531 |
| 5.3.1 | Aluminium und Aluminiumlegierungen | 531 |
| 5.3.1.1 | Lieferformen | 533 |
| 5.3.1.2 | Bezeichnungsweise | 533 |
| 5.3.1.3 | Metallurgisch bedingte Schweißnahtdefekte | 535 |
| | Heißrisse | 535 |
| | Spannungsrisse | 536 |
| | Poren | 536 |
| 5.3.1.4 | Aluminium-Knetlegierungen | 536 |
| 5.3.1.5 | Aluminium-Gusslegierungen | 537 |
| 5.3.1.6 | Ausscheidungshärtende Aluminiumlegierungen | 537 |
| 5.3.1.7 | Aluminium-Sonderlegierungen | 543 |
| | Aluminium-Lithiumlegierungen | 543 |
| | Aluminium-Druckgusslegierungen | 543 |
| | Dispersionshärtende Aluminiumlegierungen | 544 |
| 5.3.1.8 | Schweißzusatzwerkstoffe | 545 |
| 5.3.1.9 | Schweißpraxis | 547 |
| 5.3.1.9.1 | Vorbereitende Maßnahmen | 547 |
| 5.3.1.9.2 | Schweißverfahren | 548 |
| | Wolfram-Inertgasschweißen (WIG) | 548 |
| | Metall-Inertgasschweißen (MIG) | 550 |
| | Laserschweißen | 550 |
| 5.3.2 | Magnesium und Magnesiumlegierungen | 551 |
| 5.3.3 | Beryllium | 553 |
| 5.4 | Hochschmelzende und hochreaktive Werkstoffe | 553 |
| 5.4.1 | Titan und Titanlegierungen | 554 |
| 5.4.1.1 | Eigenschaften und Schweißverhalten der Titanwerkstoffe | 556 |
| | Unlegiertes Titan | 557 |
| | Alpha- und Nah-Alpha-Legierungen | 557 |
| | Alpha-Beta-Legierungen | 558 |
| | Beta-Legierungen | 559 |
| | Titan-Sonderlegierungen | 559 |
| 5.4.1.2 | Metallurgisch bedingte Schweißnahtdefekte | 560 |
| 5.4.1.3 | Schweißpraxis | 561 |
| 5.4.2 | Molybdän und Molybdänlegierungen | 562 |
| 5.4.3 | Zirkonium und Zirkoniumlegierungen | 563 |
| 5.4.4 | Tantal und Tantallegierungen | 564 |
| 5.5 | Aufgaben zu Kapitel 5 | 566 |
| 5.6 | Schrifttum | 574 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 6 | Anhang (spezielle Werkstoffprüfverfahren) | 579 |
| 6.1 | Prüfung auf Heißrissanfälligkeit | 579 |
| 6.1.1 | Verfahren mit Selbstbeanspruchung der Probe | 580 |
| 6.1.2 | Verfahren mit Fremdbeanspruchung der Probe | 580 |
| 6.2 | Prüfung auf Kaltrissanfälligkeit | 583 |
| 6.2.1 | Implant-Test | 583 |
| 6.2.2 | Der <i>Pellini-Versuch</i> | 586 |
| 6.3 | Der Kerbschlagbiegeversuch (DINEN 10045) | 587 |
| | Prüfung von Proben mit Schweißnaht | 591 |
| 6.4 | Der instrumentierte Kerbschlagbiegeversuch | 591 |
| 6.5 | Das COD-Konzept von <i>Cottrell</i> und <i>Wells</i> | 594 |
| 6.6 | Schrifttum | 596 |
| 7 | Sachwortverzeichnis | 597 |