

# Inhalt

<b>1 Schweißbarkeit von metallischen Werkstoffen</b> .....	1
1.1 Definition der Schweißbarkeit von Bauteilen.....	1
1.2 Schweißbeignung.....	2
1.3 Schweißsicherheit.....	5
1.4 Schweißmöglichkeit.....	6
1.5 Abschließende Betrachtung.....	6
<b>2 Umwandlung unlegierter und niedriglegierter Stähle</b> .....	9
2.1 Einleitung.....	9
2.2 Erstarrung und Umwandlungen von Metallen im Gleichgewicht.....	9
2.2.1 Zustandsschaubilder.....	9
2.2.2 Eutektische Umwandlung.....	12
2.2.3 Peritektische Umwandlung.....	14
2.2.4 Intermediäre Phasen.....	15
2.2.5 Umwandlungen im festen Zustand.....	16
2.3 Eisen-Kohlenstoff-Zustandsschaubild.....	17
2.4 Umwandlungsschaubilder und Gefüge der unlegierten und niedriglegierten Stähle.....	23
2.4.1 Vorgang des Austenitisierens.....	23
2.4.1.1 Isothermische Zeit-Temperatur-Austenitisierungs- schaubilder.....	23
2.4.1.2 Kontinuierliche Zeit-Temperatur-Austenitisierungs- schaubilder.....	25
2.4.2 Gefüge von Stählen.....	27
2.4.2.1 Ferrit.....	27
2.4.2.2 Perlit.....	28
2.4.2.3 Bainit.....	29
2.4.2.4 Martensit.....	30
2.4.3 Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubilder.....	33
2.4.3.1 Isothermische ZTU-Schaubilder.....	33
2.4.3.2 Kontinuierliche ZTU-Schaubilder.....	36
2.4.3.3 Schweiß-ZTU-Schaubilder.....	41
<b>3 Temperaturverteilung und Gefügeausbildung in Schweißnähten</b> .....	43
3.1 Auswirkungen des Schweißens auf den Werkstoff.....	43
3.2 Temperatureinleitung und -verteilung in der Schweißnaht.....	43
3.3 Erstarrung des Schweißgutes.....	47
3.4 Gefügezonen im wärmebeeinflussten Grundwerkstoff.....	53

---

<b>4</b>	<b>Schweißspannungen</b> .....	59
4.1	Definition von Eigenspannungen .....	59
4.2	Entstehung von Schweißspannungen .....	62
4.3	Auswirkungen von Schweißspannungen .....	72
4.4	Maßnahmen zur Verringerung von Eigenspannungen in Schweißnähten .....	75
4.4.1	Minimierung von Schweißspannungen.....	75
4.4.2	Abbau vorhandener Schweißspannungen .....	76
4.5	Methoden zur Messung von Eigenspannungen .....	78
<b>5</b>	<b>Schweißen von unlegierten und niedriglegierten Stählen</b> .....	83
5.1	Einteilung der Stähle .....	83
5.2	Bezeichnung der Stähle .....	85
5.2.1	Bezeichnung der un- und niedriglegierten Stähle.....	85
5.2.2	Bezeichnung der Stähle gemäß DIN EN 10027 .....	86
5.2.2.1	Kennzeichnung nach Kurznamen gemäß DIN EN 10027 Teil 1 .....	86
5.2.2.2	Kennzeichnung durch Werkstoffnummern nach DIN EN 10027 Teil 2 .....	90
5.3	Einfluss der Legierungs- und Begleitelemente auf die Eigenschaften von Stählen.....	90
5.4	Schweißbare Feinkornstähle .....	96
5.4.1	Auswirkung der Kornfeinung auf die Eigenschaften der Feinkornstähle .....	97
5.4.2	Einteilung von Feinkornstählen .....	101
5.4.3	Einsatzgebiet für Feinkornstähle .....	104
5.4.4	Auswirkung des Schweißprozesses auf das Gefüge und die mechanischen Eigenschaften von Feinkornstählen.....	105
5.4.5	Schweißen von Feinkornstählen .....	108
5.4.5.1	Rechnerische Ermittlung der Abkühlzeiten .....	109
5.4.5.2	Graphische Ermittlung der Abkühlzeiten .....	113
5.4.5.3	Anwendung des STAZ-Schaubildes .....	117
5.4.6	Schweißfehler an Feinkornstählen .....	121
5.4.6.1	Heißrisse .....	121
5.4.6.2	Kaltrisse .....	121
5.4.6.3	Terrassenbrüche.....	123
5.4.6.4	Erweichung der WEZ .....	124
5.5	Allgemeine Baustähle .....	124
5.5.1	Schweißbarkeit .....	126
5.5.2	Änderung des Gefüges und der Eigenschaften.....	128
5.5.3	Verarbeitung und Einsatzgebiete.....	129
5.6	Einsatz- und Vergütungsstähle .....	129
5.6.1	Schweißbarkeit .....	129
5.6.2	Änderung des Gefüges und der Eigenschaften durch den Schweißprozess.....	131
5.6.2.1	Einsatzstähle.....	131
5.6.2.2	Vergütungsstähle.....	131

---

5.6.3	Verarbeitung und Einsatzgebiete .....	132
5.7	Niedriglegierte kaltzähe Nickelstähle .....	132
5.7.1	Einsatzgebiete .....	132
5.7.2	Schweißbeignung .....	133
5.8	Kesselbleche und warmfeste Baustähle .....	134
5.8.1	Schweißbeignung .....	134
5.8.2	Änderung des Gefüges und der Eigenschaften .....	135
5.8.3	Schweißtechnische Verarbeitung und Einsatzgebiet .....	135
<b>6</b>	<b>Hochlegierte Stähle .....</b>	<b>137</b>
6.1	Einteilung .....	137
6.2	Grundwerkstoffe .....	137
6.2.1	Nomenklatur der hochlegierten Stähle .....	137
6.2.2	Einfluss der Legierungselemente auf das Mikrogefüge der Stähle .....	138
6.2.3	Einteilung und Eigenschaften der korrosionsbeständigen Stähle .....	141
6.2.3.1	Ferritische Chromstähle .....	142
6.2.3.2	Ferritisch-martensitische Chromstähle .....	143
6.2.3.3	Martensitische Chromstähle .....	143
6.2.3.4	Ferritisch-austenitische Chrom-Nickel-(Duplex-)Stähle .....	144
6.2.3.5	Stabile und metastabile austenitische Chrom-Nickel-Stähle ..	146
6.3	Korrosion an nichtrostenden Stählen .....	147
6.3.1	Grundlagen der Korrosion .....	147
6.3.2	Gründe für die Korrosionsbeständigkeit der hochlegierten Chrom- und Chrom-Nickel-Stähle .....	154
6.3.3	Korrosionsarten bei hochlegierten Stählen .....	154
6.3.3.1	Interkristalline Korrosion .....	155
6.3.3.2	Spalt- und Lochkorrosion .....	161
6.3.3.3	Transkristalline Spannungsrisskorrosion .....	164
6.3.3.4	Kontaktkorrosion .....	166
6.4	Ausscheidungen und versprödende Phasen in korrosionsbeständigen Stählen .....	166
6.4.1	Ferritische, ferritisch-martensitische und martensitische Chromstähle .....	166
6.4.1.1	Karbidausscheidung .....	166
6.4.1.2	Grobkornbildung .....	168
6.4.1.3	475°-Versprödung .....	168
6.4.1.4	$\sigma$ -Phase .....	169
6.4.2	Austenitische und ferritisch-austenitische Chrom-Nickel-Stähle .....	170
6.4.2.1	Karbidausscheidung .....	170
6.4.2.2	$\sigma$ -Phase .....	170
6.4.2.3	Chi-Phase und Laves-Phase .....	172
6.5	Schweißen von hochlegierten Stählen .....	172
6.5.1	Schaeffler-Diagramm .....	172
6.5.2	De-Long-Diagramm .....	175

---

6.5.3	Schweißeignung und schweißtechnische Verarbeitung der korrosionsbeständigen Stähle.....	177
6.5.3.1	Ferritische Chromstähle .....	177
6.5.3.2	Ferritisch-martensitische Chromstähle.....	179
6.5.3.3	Martensitische Chromstähle .....	180
6.5.3.4	Ferritisch-austenitische Stähle (Duplex-Stähle).....	181
6.5.3.5	Stabile und metastabile austenitische Chrom-Nickel-Stähle..	182
6.5.3.6	Austenit-Ferrit-Verbindungen (Schwarz-Weiß-Verbindungen) .....	185
<b>7</b>	<b>Schweißen von Gusswerkstoffen auf Eisenbasis .....</b>	<b>197</b>
7.1	Bedeutung des Schweißens für die Bearbeitung von Gusswerkstoffen.....	197
7.2	Bezeichnungen der wichtigsten Gusswerkstoffe.....	200
7.2.1	Bezeichnung von Gusseisenwerkstoffen durch Werkstoffkurzzeichen .....	200
7.2.2	Bezeichnung von Gusseisenwerkstoffen durch Nummern.....	201
7.3	Die wichtigsten Legierungselemente in Eisengusswerkstoffen .....	204
7.4	Einsatzgebiete und schweißtechnische Verarbeitung der Gusswerkstoffe .....	205
7.4.1	Stahlguss .....	205
7.4.1.1	Eigenschaften und Einsatzgebiete .....	205
7.4.1.2	Schweißeignung und schweißtechnische Verarbeitung .....	206
7.4.2	Temperguss .....	207
7.4.2.1	Gefüge, Eigenschaften und Einsatzgebiete .....	207
7.4.2.2	Schweißeignung und schweißtechnische Verarbeitung .....	210
7.4.2.3	Schweißverfahren für Temperguss.....	211
7.4.3	Gusseisen mit Kugel- oder Lamellengraphit.....	212
7.4.3.1	Schweißtechnische Verarbeitung.....	213
7.4.4	Austenitisches Gusseisen mit Kugel- oder Lamellengraphit ..	215
7.4.4.1	Einsatzgebiete und Schweißeignung .....	215
<b>8</b>	<b>Schweißen von Aluminiumwerkstoffen.....</b>	<b>217</b>
8.1	Grundlegende Eigenschaften von Aluminium .....	217
8.1.1	Einleitung .....	217
8.1.2	Aufbau und Eigenschaften von Aluminium.....	217
8.1.3	Metallkundliche Mechanismen bei der thermischen und mechanischen Behandlung von Aluminium .....	221
8.1.3.1	Erholung und Rekristallisation .....	221
8.1.3.2	Aushärtung .....	221
8.1.3.3	Kaltverfestigung .....	228
8.2	Schweißen von Aluminium .....	229
8.2.1	Einleitung .....	229
8.2.2	Auswirkungen der Wärmeausdehnung und -ableitung auf das Schweißergebnis .....	229
8.2.3	Schweißen von ausgehärteten und kaltverfestigten Aluminiumlegierungen.....	230

---

8.2.4	Beeinflussung des Schweißergebnisses durch die Al-Oxidschicht .....	232
8.2.5	Heißrisse in Aluminiumlegierungen.....	233
8.2.6	Porenbildung beim Schweißen von Aluminium.....	235
<b>9</b>	<b>Wärmebehandlung der Stähle vor dem Schweißen, während des Schweißens und nach dem Schweißen.....</b>	<b>239</b>
9.1	Technische Wärmebehandlung und ihre Ziele.....	239
9.2	Wärmebehandlung der Stähle vor und nach dem Schweißen .....	241
9.2.1	Grobkornglühen .....	241
9.2.2	Normalglühen.....	243
9.2.3	Härten .....	244
9.2.4	Vergüten .....	245
9.2.5	Spannungsarmglühen .....	247
9.2.6	Wasserstoffarmglühen (soaking).....	248
9.2.7	Gusseisenwarmschweißen.....	249
9.3	Wärmebehandlungen in Verbindung mit dem Schweißen.....	251
9.3.1	Wärmebehandlung des Werkstoffes durch das Schweißen.....	251
9.3.2	Schweißen mit Vorwärmung.....	253
9.3.3	Isothermes Schweißen .....	256
9.3.4	Stufenhärtungsschweißen.....	256
<b>10</b>	<b>Fehler und Schäden an Schweißverbindungen.....</b>	<b>259</b>
10.1	Einleitung .....	259
10.2	Fehler durch unsachgemäße Fertigung .....	259
10.2.1	Äußere Nahtfehler.....	259
10.2.1.1	Schweißspritzer und Zündstellen .....	259
10.2.1.2	Einbrand- und Randkerben .....	260
10.2.1.3	Andere Nahtformfehler .....	261
10.2.2	Innere Nahtfehler.....	262
10.2.2.1	Bindefehler und unverschweißte Stellen .....	262
10.2.2.2	Schlacken- und andere Feststoffeinschlüsse .....	263
10.2.2.3	Mechanische Porenbildung .....	264
10.3	Werkstoffverursachte Schweißfehler .....	266
10.3.1	Heißrisse .....	267
10.3.1.1	Erstarrungsrisse.....	268
10.3.1.2	Aufschmelzungsrisse.....	272
10.3.2	Kaltrisse .....	274
10.3.2.1	Aufhärtungsrisse.....	274
10.3.2.2	Wasserstoffbeeinflusste Kaltrisse.....	275
10.3.2.3	Terrassenbrüche .....	282
10.3.2.4	Ausscheidungsrisse.....	284
10.3.3	Hohlräume im Schweißgut .....	287
10.3.3.1	Metallurgische Porenbildung.....	287
10.3.3.2	Lunkerbildung .....	289
10.4	Korrosion.....	291
10.4.1	Korrosion durch Schweißfertigungsfehler .....	291

---

10.4.1.1 Kontaktkorrosion .....	291
10.4.1.2 Spaltkorrosion.....	292
10.4.2 Selektive Korrosion an Schweißnähten.....	292
10.4.2.1 Interkristalline Korrosion (IK) .....	292
10.4.2.2 Spannungsinduzierte Risskorrosion (SpRK).....	293
<b>11 Prüfung von Schweißverbindungen.....</b>	<b>295</b>
11.1 Einleitung.....	295
11.2 Zugversuch.....	295
11.3 Dauerschwingversuch.....	300
11.4 Ermittlung der Zähigkeit.....	302
11.4.1 Technologischer Biegeversuch.....	302
11.4.2 Kerbschlagbiegeversuch .....	304
11.5 Härteprüfung.....	308
11.5.1 Härteprüfung nach Brinell .....	309
11.5.2 Härteprüfung nach Vickers .....	309
11.5.3 Härteprüfung nach Rockwell.....	311
11.6 Prüfung von Schweißverbindungen.....	312
11.6.1 Prüfung der Schweißbeignung.....	312
11.6.1.1 Kaltrissprüfverfahren.....	313
11.6.1.2 Heißrissprüfverfahren .....	317
11.6.2 Ermittlung äußerer Fehler .....	320
11.6.2.1 Sichtprüfung .....	320
11.6.2.2 Farbeindringverfahren.....	320
11.6.3 Ermittlung oberflächennaher Fehler .....	321
11.6.3.1 Wirbelstromverfahren.....	321
11.6.3.2 Magnetinduktives Verfahren .....	322
11.6.3.3 Magnetpulverprüfung .....	322
11.6.4 Ermittlung innerer Fehler.....	323
11.6.4.1 Durchstrahlungsverfahren mit Röntgen- und Gamma- strahlung .....	323
11.6.4.2 Ultraschallverfahren.....	327
11.6.4.3 Schallemissionsverfahren.....	330
11.6.5 Prüfung der Gefügeausbildung und Ermittlung von Schweiß- fehlerursachen .....	331
11.6.5.1 Metallographische Verfahren.....	331
11.6.5.2 Makroskopische Untersuchungsverfahren .....	331
11.6.5.3 Mikroskopische Untersuchungsverfahren.....	333
<b>Literatur.....</b>	<b>341</b>
<b>Sachverzeichnis.....</b>	<b>359</b>