

3

# Werkstofftechnik

## Werkstoffe – Eigenschaften – Prüfung – Anwendung

von Wolfgang Seidel

7., aktualisierte Auflage

mit 424 Bildern sowie zahlreichen Tabellen,  
Beispielen, Übungen und Testaufgaben

0900 3804

HANSER

# Inhaltsverzeichnis

<b>Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen</b> .....	16
<b>1 Struktur und Eigenschaften der Metalle</b> .....	19
1.0 Überblick .....	19
1.1 Metallbindung und Gitterstruktur .....	19
1.1.0 Übersicht .....	19
1.1.1 Wechselwirkung zwischen Atomen .....	20
1.1.2 Kristallstruktur der Metalle .....	25
1.1.2.1 Der kristalline Zustand (Idealkristall) .....	25
1.1.2.2 Gittertypen .....	28
1.1.2.3 Realstruktur .....	32
1.1.2.4 Gitterstruktur und technische Eigenschaften .....	36
1.2 Kristallisation .....	39
1.2.0 Übersicht .....	39
1.2.1 Phasenumwandlungen .....	40
1.2.2 Thermische Analyse .....	42
1.2.3 Übergang gasförmig–kristallin .....	43
1.2.4 Übergang flüssig–kristallin .....	44
1.3 Elastische und plastische Verformung .....	49
1.3.0 Übersicht .....	49
1.3.1 Mechanische Beanspruchung .....	49
1.3.2 Elastische Verformung .....	50
1.3.3 Plastische Verformung .....	51
1.3.4 Technische Formgebung (Kaltumformung) .....	54
1.4 Thermisch aktivierte Vorgänge .....	56
1.4.0 Übersicht .....	56
1.4.1 Gittervorgänge unter Temperatureinfluss .....	56
1.4.2 Diffusion .....	57
1.4.3 Erholung und Rekristallisation .....	60
Lernzielorientierter Test zu Kapitel 1 .....	66
<b>2 Legierungen</b> .....	68
2.0 Überblick .....	68
2.1 Aufbau der Legierungen .....	68
2.1.0 Übersicht .....	68
2.1.1 Mischkristall .....	69
2.1.2 Überstruktur .....	70
2.1.3 Intermetallische Verbindungen .....	71
2.1.4 Gefügebau der Legierungen .....	72
2.2 Zustandsdiagramme .....	73
2.2.0 Übersicht .....	73

2.2.1	Begriffe, Einstoffsystem . . . . .	74
2.2.2	Zweistoffsysteme (binäre Systeme) . . . . .	75
2.2.2.0	Einführung . . . . .	75
2.2.2.1	Völlige Löslichkeit im festen Zustand . . . . .	77
2.2.2.2	Unlöslichkeit im festen Zustand . . . . .	78
2.2.2.3	System mit Mischungslücke . . . . .	78
2.2.2.4	System mit Peritektikum . . . . .	80
2.2.3	Das Lesen der Zweistoffdiagramme . . . . .	81
2.2.3.1	Regeln . . . . .	81
2.2.3.2	Beispiele . . . . .	81
2.3	Legierungseigenschaften . . . . .	84
2.3.0	Übersicht . . . . .	84
2.3.1	Tendenzen . . . . .	85
Lernzielorientierter Test zu Kapitel 2 . . . . .		88
<b>3</b>	<b>Eisen-Kohlenstoff-Legierungen</b> . . . . .	89
3.0	Überblick . . . . .	89
3.1	Reines Eisen . . . . .	89
3.2	Komponente Kohlenstoff . . . . .	91
3.3	Allgemeines zum System Eisen-Kohlenstoff . . . . .	92
3.4	System Eisen-Eisencarbid (Fe-Fe <sub>3</sub> C) . . . . .	93
3.5	Die Gefügearten des Systems Eisen-Eisencarbid . . . . .	97
3.6	Einteilung der Eisenwerkstoffe . . . . .	100
3.7	Stabiles System Eisen-Kohlenstoff (Fe-C) . . . . .	102
Lernzielorientierter Test zu Kapitel 3 . . . . .		104
<b>4</b>	<b>Wärmebehandlung der Eisenwerkstoffe</b> . . . . .	106
4.0	Überblick . . . . .	106
4.1	Grundlagen der Wärmebehandlung . . . . .	106
4.1.0	Übersicht . . . . .	107
4.1.1	Erwärmung in das Austenitgebiet (Austenitisierung) . . . . .	108
4.1.2	Abkühlung aus dem Austenitgebiet . . . . .	111
4.2	Thermische Verfahren . . . . .	121
4.2.0	Übersicht . . . . .	121
4.2.1	Glühen . . . . .	122
4.2.1.1	Diffusionsglühen . . . . .	123
4.2.1.2	Grobkornglühen . . . . .	124
4.2.1.3	Normalglühen . . . . .	124
4.2.1.4	Weichglühen (sphäroidisierendes Glühen) . . . . .	126
4.2.1.5	Spannungsarmglühen . . . . .	127
4.2.1.6	Rekristallisationsglühen . . . . .	128
4.2.2	Härten . . . . .	130
4.2.3	Vergüten . . . . .	133
4.2.4	Randschichthärten ohne Änderung der chemischen Zusammensetzung . . . . .	137

4.3	Thermochemische Verfahren . . . . .	142
4.3.0	Übersicht . . . . .	142
4.3.1	Einsatzhärten . . . . .	144
4.3.2	Nitrieren . . . . .	147
4.4	Thermomechanische Verfahren . . . . .	150
4.4.0	Übersicht . . . . .	151
4.4.1	Verfahrensgrundlagen . . . . .	152
4.4.2	Verfahrensvarianten . . . . .	153
	Lernzielorientierter Test zu Kapitel 4 . . . . .	154
<b>5</b>	<b>Eisengusswerkstoffe . . . . .</b>	<b>156</b>
5.0	Überblick . . . . .	156
5.1	Allgemeines zur Gefügeausbildung . . . . .	158
5.1.0	Übersicht . . . . .	158
5.1.1	Gefügebau und Eigenschaften . . . . .	158
5.1.1.1	Grundgefüge . . . . .	158
5.1.1.2	Graphiteinlagerung . . . . .	159
5.1.1.3	Wanddickenabhängigkeit der Eigenschaften . . . . .	161
5.2	Gusseisen mit Lamellengraphit . . . . .	163
5.2.0	Übersicht . . . . .	164
5.2.1	Erschmelzung . . . . .	164
5.2.2	Wärmebehandlung . . . . .	165
5.2.3	Eigenschaften und Anwendung . . . . .	165
5.3	Gusseisen mit Kugelgraphit . . . . .	167
5.3.0	Übersicht . . . . .	167
5.3.1	Erschmelzung . . . . .	167
5.3.2	Wärmebehandlung . . . . .	169
5.3.3	Eigenschaften und Anwendung . . . . .	169
5.4	Temperguss . . . . .	170
5.4.0	Übersicht . . . . .	171
5.4.1	Erschmelzung und Behandlung . . . . .	171
5.4.2	Eigenschaften und Anwendung . . . . .	172
5.5	Stahlguss . . . . .	173
5.5.0	Übersicht . . . . .	174
5.5.1	Erschmelzung und Behandlung . . . . .	174
5.5.2	Eigenschaften und Anwendung . . . . .	175
5.6	Sondergussarten . . . . .	176
5.7	Erstarrung in der Form . . . . .	176
5.7.0	Übersicht . . . . .	176
5.7.1	Stängelkristalle (Säulenkristalle, Transkristallite) . . . . .	177
5.7.2	Lunker . . . . .	177
5.7.3	Gasblasen . . . . .	179
5.7.4	Seigerungen . . . . .	179
5.7.5	Einschlüsse . . . . .	180
	Lernzielorientierter Test zu Kapitel 5 . . . . .	181

<b>6</b>	<b>Eisenknetwerkstoffe (unlegierte und legierte Stähle)</b>	182
6.0	Überblick	182
6.1	Benennung und Eigenschaften	182
6.1.0	Übersicht	182
6.1.1	Bezeichnung der Stähle	183
6.1.1.1	Einteilung der Stähle nach DIN EN 10 020	183
6.1.1.2	Bildung von Kurznamen nach DIN EN 10 027-1	184
6.1.1.3	Europäisches Werkstoffnummern-System nach DIN EN 10 027-2	186
6.1.2	Einfluss verschiedener Elemente im Stahl	187
6.2	Stahlgruppen	190
6.2.0	Übersicht	190
6.2.1	Baustähle	191
6.2.2	Baustähle für Wärmebehandlung	192
6.2.3	Chemisch beständige Stähle	194
6.2.4	Warmfeste Stähle	195
6.2.5	Stähle für niedrige Temperaturen	196
6.2.6	Arbeitsstähle	197
	Lernzielorientierter Test zu Kapitel 6	199
<b>7</b>	<b>Nichteisenmetalle (NE-Metalle)</b>	201
7.0	Überblick	201
7.1	Allgemeines zur Werkstoffbezeichnung	202
7.1.0	Übersicht	202
7.1.1	Herstellung und Verwendung	202
7.1.2	Chemische Zusammensetzung, Komponenten	203
7.1.3	Mechanische Eigenschaften	203
7.1.4	Werkstoff- und Zustandsbezeichnungen nach EN	203
7.2	Aluminium, Aluminiumlegierungen	205
7.2.0	Übersicht	205
7.2.1	Reinaluminium	206
7.2.1.1	Eigenschaften	206
7.2.1.2	Anwendung	207
7.2.2	Aluminiumlegierungen	207
7.2.2.1	Einteilung, Eigenschaften	207
7.2.2.2	Wirkung der Legierungselemente	208
7.2.2.3	Aushärten	210
7.2.3	Legierungstyp, technische Anwendung	213
7.3	Kupfer, Kupferlegierungen	217
7.3.0	Übersicht	217
7.3.1	Reinkupfer	217
7.3.2	Kupfer-Zink-Legierungen (Messing)	219
7.3.3	Kupfer-Zinn-Legierungen	222
7.4	Blei, Zinn, Antimon und deren Legierungen	223
7.4.0	Übersicht	223
7.4.1	Blei	224
7.4.2	Zinn	225

7.4.3	Antimon .....	225
7.4.4	Blei-Antimon-Zinn-Legierungen (Weißmetalle) .....	225
7.5	Titan, Titanlegierungen .....	227
7.5.0	Übersicht .....	228
7.5.1	Reintitan .....	228
7.5.2	Titanlegierungen .....	229
	Lernzielorientierter Test zu Kapitel 7 .....	229
<b>8</b>	<b>Sinterwerkstoffe</b> .....	<b>231</b>
8.0	Überblick .....	231
8.1	Grundlagen der Sintertechnik .....	231
8.1.0	Übersicht .....	232
8.1.1	Pulverherstellung .....	232
8.1.2	Formgebung .....	232
8.1.3	Sintern .....	233
8.1.4	Nachbehandlung .....	235
8.2	Eigenschaften, Anwendungsgebiete .....	235
8.2.0	Übersicht .....	236
8.2.1	Sintermetalle .....	236
8.2.2	Gesinterte Carbidhartmetalle (Hartmetalle) .....	237
8.2.3	Oxid- und Mischkeramik .....	237
8.2.4	Nichtoxidkeramik .....	239
	Lernzielorientierter Test zu Kapitel 8 .....	240
<b>9</b>	<b>Korrosion und Korrosionsschutz</b> .....	<b>241</b>
9.0	Überblick .....	241
9.1	Grundlagen .....	241
9.1.0	Übersicht .....	241
9.1.1	Ursachen der Korrosion .....	242
9.1.2	Chemische Korrosion .....	242
9.1.3	Elektrochemische Korrosion .....	243
9.1.4	Passivierung .....	245
9.2	Korrosionsarten .....	246
9.2.0	Übersicht .....	246
9.2.1	Korrosionsarten ohne mechanische Beanspruchung .....	247
9.2.1.1	Gleichmäßige und ungleichmäßige Flächenkorrosion .....	247
9.2.1.2	Lochkorrosion .....	247
9.2.1.3	Spaltkorrosion .....	248
9.2.1.4	Bimetallkorrosion (Kontaktkorrosion) .....	248
9.2.2	Korrosionsarten mit mechanischer Beanspruchung .....	249
9.2.2.1	Spannungskorrosion/Spannungsrisskorrosion .....	249
9.2.2.2	Schwingungsrisskorrosion .....	249
9.2.2.3	Erosions- und Kavitationskorrosion .....	250
9.3	Korrosionsschutz .....	251
9.3.0	Übersicht .....	251

9.3.1	Aktiver Korrosionsschutz . . . . .	252
9.3.1.1	Werkstoffauswahl . . . . .	252
9.3.1.2	Korrosionsschutzgerechtes Konstruieren . . . . .	253
9.3.1.3	Katodischer Korrosionsschutz . . . . .	253
9.3.1.4	Beeinflussung des Korrosionsmediums . . . . .	254
9.3.2	Passiver Korrosionsschutz . . . . .	255
9.3.2.1	Vorbereitung der Oberfläche . . . . .	255
9.3.2.2	Organische Beschichtungen . . . . .	255
9.3.2.3	Metallische Überzüge . . . . .	257
Lernzielorientierter Test zu Kapitel 9 . . . . .		260
<b>10</b>	<b>Schmierstoffe</b> . . . . .	261
10.0	Überblick . . . . .	261
10.1	Flüssige Schmierstoffe . . . . .	261
10.1.0	Übersicht . . . . .	261
10.1.1	Zusammensetzung und Eigenschaften . . . . .	262
10.1.2	Schmierölarten . . . . .	265
10.1.3	Kühlschmierstoffe . . . . .	267
10.2	Schmierfette . . . . .	269
10.2.0	Übersicht . . . . .	269
10.2.1	Zusammensetzung und Eigenschaften . . . . .	269
10.2.2	Schmierfettarten . . . . .	271
10.3	Festschmierstoffe . . . . .	273
10.3.0	Übersicht . . . . .	273
10.3.1	Festschmierstoffarten . . . . .	274
10.3.2	Festschmierstoffe mit Schichtgitterstruktur . . . . .	274
Lernzielorientierter Test zu Kapitel 10 . . . . .		275
<b>11</b>	<b>Kunststoffe</b> . . . . .	277
11.0	Überblick . . . . .	277
11.1	Struktur von Kunststoffen . . . . .	277
11.1.0	Übersicht . . . . .	278
11.1.1	Entstehung der Makromoleküle . . . . .	278
11.1.2	Räumliche Anordnung der Makromoleküle . . . . .	281
11.1.3	Hilfs- und Zusatzstoffe . . . . .	285
11.2	Eigenschaften und Verarbeitung von Kunststoffen . . . . .	286
11.2.0	Übersicht . . . . .	286
11.2.1	Allgemeine Eigenschaften . . . . .	287
11.2.2	Thermisch mechanische Eigenschaften von Kunststoffen . . . . .	289
11.2.2.1	Einfluss von Struktur und Temperatur . . . . .	289
11.2.2.2	Einfluss der Belastungsdauer/-geschwindigkeit . . . . .	296
11.3	Verarbeitung von Kunststoffen . . . . .	298
11.4	Ausgewählte Kunststoffe . . . . .	300
11.4.0	Übersicht . . . . .	301
11.4.1	Thermoplaste . . . . .	301
11.4.1.1	Polyethylen PE . . . . .	301

11.4.1.2	Polypropylen PP	302
11.4.1.3	Polystyrol PS	303
11.4.1.4	Polyvinylchlorid PVC	303
11.4.1.5	Polyethylenterephthalat PET	304
11.4.1.6	Weitere technische Thermoplaste	305
11.4.2	Duroplaste	306
11.4.2.1	Epoxidharz EP	306
11.4.2.2	Ungesättigtes Polyesterharz UP	307
11.4.2.3	Polyurethan (vernetzt) PUR	308
11.4.3	Elastomere	309
11.4.3.1	Naturkautschuk NR	309
11.4.3.2	Styrol-Butadien-Kautschuk SBR	310
	Lernzielorientierter Test zu Kapitel 11	310
<b>12</b>	<b>Werkstoffprüfung</b>	<b>312</b>
12.0	Überblick	312
12.1	Grundlagen der Werkstoffprüfung	312
12.1.0	Übersicht	312
12.1.1	Werkstoffbeanspruchung	313
12.1.2	Werkstoffprüfung – Begriff, Aufgaben und Einteilung der Werkstoffprüfverfahren	315
12.2	Mechanische Werkstoffprüfung	318
12.2.0	Übersicht	318
12.2.1	Zugversuch	318
12.2.1.0	Übersicht	318
12.2.1.1	Prüfprinzip	319
12.2.1.2	Versuchsauswertung, Kenngrößen	321
12.2.1.3	Werkstoffverhalten unter Zugbeanspruchung	327
12.2.2	Härteprüfung	332
12.2.2.0	Übersicht	332
12.2.2.1	Härteprüfung nach Brinell	334
12.2.2.2	Härteprüfung nach Vickers	336
12.2.2.3	Härteprüfung nach Rockwell (HRC)	338
12.2.2.4	Instrumentierte Eindringprüfung – Martenshärte	340
12.2.2.5	Umwerten von Härtewerten	342
12.2.3	Zähigkeitsprüfung	343
12.2.3.0	Übersicht	343
12.2.3.1	Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy	345
12.2.4	Bruchmechanische Werkstoffprüfung	349
12.2.4.1	Linear elastische Bruchmechanik LEBM	351
12.2.4.2	Fließbruchmechanik FBM	354
12.2.5	Dauerschwingprüfung	359
12.2.5.0	Übersicht	359
12.2.5.1	Dynamische Beanspruchung und Werkstoffverhalten	360
12.2.5.2	Dauerschwingversuch	362
12.2.5.3	Das Dauerfestigkeitsdiagramm nach Smith	365

12.3	Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung .....	368
12.3.0	Übersicht .....	368
12.3.1	Durchstrahlungsprüfung .....	369
12.3.2	Ultraschallprüfung .....	373
12.3.3	Magnetische Prüfverfahren .....	378
12.3.3.1	Einführung .....	378
12.3.3.2	Magnetpulverprüfung .....	379
12.3.3.3	Wirbelstromprüfung .....	382
12.4	Gefügeanalyse – Materialographie .....	386
12.4.0	Überblick .....	386
12.4.1	Makroskopische Untersuchungen .....	386
12.4.2	Lichtmikroskopie .....	387
12.4.3	Rasterelektronenmikroskopie .....	392
12.4.4	Transmissionselektronenmikroskopie .....	395
Lernzielorientierter Test zu Kapitel 12 .....		396
<b>Lösungsteil</b> .....		398
<b>Bildquellen</b> .....		413
<b>Weiterführende Literatur</b> .....		413
<b>Werkstoffauswahl</b> .....		414
<b>Auskunfts- und Beratungsstellen</b> .....		415
<b>Sachwortverzeichnis</b> .....		416