

E. Hornbogen, H. Warlimont

# Metallkunde

Aufbau und Eigenschaften  
von Metallen und Legierungen

Mit einem Beitrag  
von Th. Ricker

Zweite, völlig neubearbeitete  
und erweiterte Auflage

Mit 281 Abbildungen

**Springer-Verlag**

Berlin Heidelberg New York  
London Paris Tokyo  
Hong Kong Barcelona  
Budapest

# Inhalt

<b>1 Allgemeiner Überblick</b> . . . . .	1
1.1 Natur der Metalle . . . . .	1
1.2 Geschichte der Metalle . . . . .	4
1.3 Metalle als Werkstoffe . . . . .	5
1.4 Aufgaben der Metallkunde . . . . .	7
Literatur . . . . .	8
<b>2 Übergang in den festen Zustand</b> . . . . .	9
2.1 Aggregatzustände . . . . .	19
2.2 Übergang gasförmig zu kristallin . . . . .	10
2.3 Übergang flüssig zu kristallin . . . . .	10
2.4 Keimbildung . . . . .	12
2.5 Heterogene Keimbildung . . . . .	15
2.6 Stabile und instabile Grenzflächen . . . . .	15
2.7 Erstarrung in einer Form . . . . .	17
2.8 Einkristalle . . . . .	18
Literatur . . . . .	19
<b>3 Kristallstrukturen</b> . . . . .	20
3.1 Bindung und Koordination . . . . .	20
3.2 Punkte, Richtungen und Ebenen . . . . .	23
3.3 Stereographische Projektion . . . . .	27
3.4 Intermetallische Phasen . . . . .	30
3.5 Anisotropie . . . . .	34
3.6 Quasikristalline Phasen . . . . .	34
Literatur . . . . .	35
<b>4 Konstitution von Legierungen</b> . . . . .	36
4.1 Grundlagen der heterogenen Gleichgewichte . . . . .	36
4.2 Mischkristalle, geordnete Atomverteilung, intermetallische Phasen . . . . .	39
4.3 Zweistoffsysteme . . . . .	40
4.4 Mehrstoffsysteme . . . . .	50
Literatur . . . . .	52

<b>5 Gitterbaufehler</b> . . . . .	53
5.1 Überblick . . . . .	53
5.2 Leerstellen . . . . .	54
5.3 Versetzungen . . . . .	56
5.4 Stapelfehler . . . . .	60
5.5 Korngrenzen . . . . .	62
Literatur . . . . .	65
<b>6 Elektronen in Metallen</b> . . . . .	66
6.1 Modell freier Elektronen . . . . .	66
6.2 Bändermodell . . . . .	69
6.3 Leitfähigkeit . . . . .	72
6.4 Supraleitung . . . . .	74
6.5 Ferromagnetismus . . . . .	76
Literatur . . . . .	78
<b>7 Physikalische Eigenschaften</b> . . . . .	79
7.1 Gitterschwingungen und spezifische Wärme . . . . .	79
7.2 Wärmeausdehnung . . . . .	82
7.3 Elastische Eigenschaften . . . . .	84
7.4 Elektrische und Wärmeleitfähigkeit . . . . .	87
7.5 Physikalische Eigenschaften von Vielkristallen und Phasengemischen	90
Literatur . . . . .	92
<b>8 Plastizität und Bruch</b> . . . . .	93
8.1 Zugversuch . . . . .	93
8.2 Strukturabhängigkeit der plastischen Verformung . . . . .	96
8.3 Verformung von Ein- und Vielkristallen . . . . .	100
8.4 Zwillingsbildung . . . . .	105
8.5 Verformungstextur . . . . .	107
8.6 Kriechen, Superplastizität . . . . .	108
8.7 Bruch . . . . .	111
8.8 Wechselverformung, Ermüdung . . . . .	114
8.9 Mischkristallhärtung . . . . .	117
Literatur . . . . .	118
<b>9 Thermisch aktivierte Reaktionen</b> . . . . .	119
9.1 Aktivierungsenergie . . . . .	120
9.2 Diffusion . . . . .	122
9.3 Erholung . . . . .	126
9.4 Spannungsrelaxation . . . . .	128
9.5 Rekristallisation . . . . .	129
Literatur . . . . .	133

<b>10 Strukturelle Phasenumwandlungen</b> . . . . .	134
10.1 Umwandlungsarten . . . . .	134
10.2 Thermodynamische Grundlagen und Triebkräfte . . . . .	135
10.3 Teilvorgänge der Umwandlungen . . . . .	138
10.4 Umwandlungstypen . . . . .	144
10.4.1 Diskontinuierliche Umwandlungen . . . . .	144
10.4.2 Entmischungsreaktionen . . . . .	148
10.4.3 Allgemeine Umwandlung und Ausscheidung . . . . .	150
10.4.4 Ordnungsreaktionen . . . . .	151
10.4.5 Martensitische Umwandlungen . . . . .	154
10.4.6 Bainitische Umwandlungen . . . . .	160
Literatur . . . . .	161
<b>11 Untersuchungsmethoden der Mikrostruktur</b> . . . . .	162
11.1 Mikroskopische Methoden . . . . .	162
11.1.1 Lichtmikroskopie (LM) . . . . .	162
11.1.2 Rasterelektronenmikroskopie (REM) . . . . .	166
11.1.3 Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) . . . . .	167
11.1.4 Feldionenmikroskopie (FIM) und Atomsondenspektroskopie . . . . .	169
11.1.5 Beugung von Röntgenstrahlen . . . . .	171
11.1.6 Elektronenbeugung . . . . .	172
11.1.7 Chemische Analyse der Gefügebestandteile . . . . .	174
11.1.8 Raster-Tunnel-Mikroskopie . . . . .	175
11.2 Makroskopische Methoden . . . . .	175
11.2.1 Physikalsche Analyse . . . . .	176
11.2.2 Thermochemische Analyse . . . . .	180
Literatur . . . . .	182
<b>12 Erstarrung flüssiger Legierungen – Gußwerkstoffe</b> . . . . .	183
12.1 Metallschmelzen . . . . .	183
12.2 Bildung von Mischkristallen . . . . .	185
12.3 Eutektische Erstarrung . . . . .	189
12.4 Seigerung . . . . .	191
12.5 Gußlegierungen . . . . .	192
12.6 Gießtechnik . . . . .	198
Literatur . . . . .	201
<b>13 Umformung und Werkstoffprüfung</b> . . . . .	202
13.1 Einfluß von Gefüge, Temperatur und Verformungsgeschwindigkeit . . . . .	202
13.2 Mechanik der Umformung . . . . .	204
13.3 Umformverfahren . . . . .	207
13.4 Werkstoffprüfverfahren . . . . .	212
13.5 Kaltverfestigte Werkstoffe . . . . .	216
Literatur . . . . .	218

<b>14 Aufbau, Umwandlungen und Eigenschaften der Stähle</b> . . . . .	219
14.1 Legierungsgruppen und Gleichgewichtssysteme . . . . .	219
14.2 Umwandlungen, Gefüge, mechanische Eigenschaften . . . . .	222
14.3 Stahlsorten . . . . .	228
Literatur . . . . .	233
<b>15 Teilchengehärtete Legierungen</b> . . . . .	234
15.1 Gefügeabhängige Eigenschaften . . . . .	234
15.2 Härtungsmechanismen . . . . .	236
15.3 Wechselwirkung von Versetzungen mit Teilchen . . . . .	236
15.4 Ausscheidungsgefüge . . . . .	241
15.5 Aushärtbare Aluminiumlegierungen . . . . .	243
15.6 Weitere aushärtende Nichteisenmetall-Legierungen . . . . .	245
15.7 Besonderheiten der Eisenlegierungen und Stähle . . . . .	246
15.8 Dispersionshärtung . . . . .	248
15.9 Warmfeste Legierungen . . . . .	248
Literatur . . . . .	252
<b>16 Oberflächen, Korrosion und Verschleiß</b> . . . . .	253
16.1 Oberflächenenergie, Adsorption und Adhäsion . . . . .	253
16.2 Korrosion . . . . .	255
16.3 Chemisch beständige Stähle Korrosionsschutz, . . . . .	260
16.4 Verzunderung . . . . .	262
16.5 Reibung and Verschleiß . . . . .	264
Literatur . . . . .	267
<b>17 Pulvermetallurgie</b> . . . . .	268
17.1 Umgehung des flüssigen Zustands . . . . .	268
17.2 Pulvermetallurgische Verfahren . . . . .	269
17.3 Sintertheorie . . . . .	272
17.4 Anwendungen der Pulvermetallurgie . . . . .	275
Literatur . . . . .	280
<b>18 Magnetische Werkstoffe</b> . . . . .	281
18.1 Ferromagnetische Phasen . . . . .	281
18.2 Magnetische Kenngrößen . . . . .	282
18.3 Physikalische und metallkundliche Grundlagen . . . . .	284
18.4 Weichmagnetische Werkstoffe . . . . .	292
18.5 Hartmagnetische Werkstoffe . . . . .	297
18.6 Besondere Werkstoffeigenschaften durch magnetische Anomalien . . . . .	304
18.7 Eigenschaftsverbesserungen bei Magnetwerkstoffen . . . . .	306
Literatur . . . . .	307

<b>19 Metalle und Strahlung</b> . . . . .	309
19.1 Strahlenschäden . . . . .	309
19.2 Reaktorwerkstoffe . . . . .	311
19.3 Metallkunde des Urans . . . . .	316
19.4 Ionenimplantation . . . . .	317
Literatur . . . . .	319
<b>20 Ausgewählte Spezialgebiete der Metallkunde</b> . . . . .	320
20.1 Die drei Werkstoffgruppen und Werkstoffverbunde . . . . .	320
20.1.1 Drei Werkstoffgruppen und leitende Nichtmetalle . . . . .	320
20.1.2 Beispiele für Verbundwerkstoffe . . . . .	326
20.2 Amorphe Metalle . . . . .	329
20.2.1 Herstellung, Zusammensetzung, Struktur . . . . .	329
20.2.2 Beziehungen zwischen Struktur und Eigenschaften . . . . .	331
20.2.3 Anwendung amorpher Metalle . . . . .	333
20.3 Legierungen mit Formgedächtnis . . . . .	334
20.4 Technische Supraleiter . . . . .	341
20.4.1 Grundlagen technischer Supraleiter . . . . .	341
20.4.2 Nb-Ti-Supraleiter . . . . .	344
20.4.3 Nb <sub>3</sub> Sn-Supraleiter . . . . .	345
20.4.4 Weitere Supraleiter und konkurrierende Werkstoffe . . . . .	346
Literatur . . . . .	347
<b>Sachverzeichnis</b> . . . . .	349