
Hans-Jürgen Bargel · Günter Schulze[†]
(Hrsg.)

Werkstoffkunde

11., bearbeitete Auflage

 Springer Vieweg

Inhaltverzeichnis

1 Grundlagen der Metall- und Legierungskunde	1
Hans-Jürgen Bargel und Günter Schulze	
1.1 Aufbau kristalliner Stoffe	1
1.1.1 Bindungsformen anorganischer Stoffe	1
1.1.2 Gitteraufbau des Idealkristalls	2
1.1.3 Realkristalle, Gitterbaufehler, Energie von Fehlstellen	5
1.1.4 Einkristall, Vielkristall	11
1.2 Eigenschaften der Metalle	13
1.2.1 Elektrische und thermische Eigenschaften	13
1.2.2 Mechanische Eigenschaften	16
1.3 Phasenumwandlungen	23
1.3.1 Primärkristallisation bei reinen Metallen	23
1.3.2 Primärkristallisation bei Legierungen	25
1.3.3 Einfluss der Korngrenzen	28
1.3.4 Umwandlungen im festen Zustand	28
1.3.5 Martensitbildung	29
1.4 Thermisch aktivierte Vorgänge	32
1.4.1 Diffusion	33
1.4.2 Kristallerholung und Rekristallisation	36
1.4.3 Kriechen und Spannungsrelaxation	40
1.5 Grundlagen der Legierungsbildung	41
1.5.1 Mischkristalle	42
1.5.2 Intermediäre Kristalle	43
1.6 Zustandsschaubilder	44
1.6.1 Grundlagen, Begriffe, Definitionen	44
1.6.2 Phasengesetz	45
1.6.3 Aufstellen der Zustandsschaubilder	46
1.6.4 Zustandsschaubilder von Zweistofflegierungen	48
1.6.5 Zustandsschaubilder mit intermediären Phasen	55
1.6.6 Zustandsschaubilder mit Umwandlungen im festen Zustand	57
1.6.7 Nichtgleichgewichtszustände	58
1.7 Eigenschaften technischer Legierungen – Anwendungen der Zustandsschaubilder	60
1.7.1 Eigenschaften von Legierungen aus Kristallgemengen	61

1.7.2	Eigenschaften von Legierungen aus Mischkristallen	61
1.7.3	Eigenschaften von Legierungen mit Umwandlungen im festen Zustand	63
1.8	Korrosion	66
1.8.1	Elektrochemische Grundlagen	68
1.8.2	Korrosionsformen	73
1.8.3	Korrosionsarten	74
1.8.4	Korrosionsverhalten der Werkstoffe	76
1.8.5	Korrosionsschutz	77
1.8.6	Korrosionsprüfungen	78
1.9	Fragen und Aufgaben zu Kap. 1	79
	Literatur	80
2	Einwirkung von Herstellung und Weiterverarbeitung auf die Eigenschaften von Metallen	81
	Hans-Jürgen Bargel und Günter Schulze	
2.1	Metallgewinnung, Verhüttung	81
2.1.1	Erze, Anreicherungsverfahren	81
2.1.2	Verhüttung, Reduktion	82
2.1.3	Raffination	82
2.1.4	Nichtmetallische Verunreinigungen	83
2.1.5	Gase im Metall	84
2.2	Schmelzen und Erstarren	85
2.2.1	Ausgewählte Erstarrungsvorgänge	85
2.2.2	Seigerungen	87
2.2.3	Lunker	88
2.2.4	Einfluss des Gießverfahrens	89
2.3	Umformen	91
2.3.1	Warmformgebung	91
2.3.2	Kaltformgebung	94
2.4	Sintern (Pulvermetallurgie)	95
2.4.1	Pulverherstellung, Sintervorgang	96
2.4.2	Möglichkeiten und Eigenschaften von Sinterwerkstoffen	97
2.5	Schweißen	97
2.5.1	Thermische Wirkung	98
2.5.2	Schweißeigenspannungen	99
2.5.3	Aufbau und Eigenschaften der thermisch beeinflussten Bereiche	101
2.5.4	Werkstoffbedingte Besonderheiten und Schwierigkeiten beim Schweißen	103
2.6	Werkstoffbedingte Probleme beim Löten	107
2.7	Wärmebehandlung	111
2.7.1	Ziel der Wärmebehandlung	111
2.7.2	Temperaturführung	111
2.7.3	Glühbehandlungen (gleichgewichtsnahe Zustände) ..	112
2.7.4	Härten	114

2.8	Eigenspannungen	114
2.8.1	Eigenspannungen infolge Kaltverformung	115
2.8.2	Eigenspannungen infolge schneller Abkühlung ...	115
2.8.3	Nachweis und Abbau von Eigenspannungen	116
2.9	Fragen und Aufgaben zu Kapitel 2	116
	Literatur	117
	Nützliche Links	117
3	Werkstoffprüfung	119
	Hans-Jürgen Bargel	
3.1	Statische Festigkeits- und Verformungskennwerte	119
3.1.1	Spannung-Verformung-Verlauf	119
3.1.2	Elastische Kennwerte	121
3.1.3	Kennwerte des Zugversuchs	123
3.1.4	Kennwerte des Druckversuchs	126
3.1.5	Biegeversuch und Verdrehversuch	127
3.1.6	Zeitstandversuch	128
3.1.7	Einflussfaktoren	129
3.2	Festigkeits- und Verformungskennwerte bei schwingender Beanspruchung	132
3.2.1	Definitionen	133
3.2.2	Prüfverfahren	136
3.2.3	Einflüsse auf die Schwingfestigkeit	136
3.2.4	Werkstoffverhalten bei schwingender Beanspruchung	140
3.3	Härtekennwerte	143
3.3.1	Begriffe	143
3.3.2	Statische Härteprüfverfahren	144
3.3.3	Dynamische Härteprüfverfahren	148
3.3.4	Einflüsse auf die Härtewerte	148
3.4	Kennwerte des Bruchverhaltens	149
3.4.1	Bruchformen	149
3.4.2	Bruchkriterien, Grundlagen der Bruchmechanik ..	152
3.4.3	Verfahren zur Prüfung des Zähigkeitsverhaltens ..	155
3.4.4	Einflüsse auf das Bruchverhalten	159
3.4.5	Anwendungsgrenzen von Bruchversuchen	161
3.5	Technologische Prüfverfahren	161
3.5.1	Prüfung der Umformeigenschaften	162
3.5.2	Prüfung der Gießeigenschaften	163
3.5.3	Weitere technologische Prüfungen	164
3.6	Zerstörungsfreie Prüfung	164
3.6.1	Kapillarverfahren	164
3.6.2	Magnetische und induktive Verfahren	165
3.6.3	Schallverfahren	166
3.6.4	Strahlenverfahren	167
3.7	Metallografische Untersuchungsverfahren	168
3.7.1	Makroskopische Verfahren	168
3.7.2	Mikroskopische Verfahren	168

3.8	Physikalische Analyseverfahren	171
3.8.1	Spektralanalyse	171
3.8.2	Röntgenfeinstrukturuntersuchung	171
3.9	Fragen und Aufgaben zu Kap. 3	172
	Literatur	173
	Nützliche Links	173
4	Eisenwerkstoffe	175
	Günter Schulze und Hans-Jürgen Bargel	
4.1	Eisen-Kohlenstoff-Schaubild (EKS)	175
4.1.1	Metallkundliche Grundlagen	175
4.1.2	Phasenänderungen im Eisen-Kohlenstoff-Schaubild (EKS)	176
4.2	Einteilung der Eisenwerkstoffe	181
4.3	Stahlherstellung	181
4.3.1	Hochofenerzeugnisse	181
4.3.2	Erschmelzungsverfahren	182
4.3.3	Sekundärmetallurgie (Pfannenmetallurgie)	184
4.3.4	Weitere Verarbeitung von Stahl	185
4.4	Wirkung der Eisenbegleiter	188
4.4.1	Mangan	188
4.4.2	Silicium	189
4.4.3	Phosphor	189
4.4.4	Schwefel	189
4.4.5	Stickstoff	190
4.4.6	Wasserstoff	192
4.4.7	Sauerstoff	192
4.4.8	Nichtmetallische Einschlüsse	193
4.5	Wärmebehandlung der Stähle	194
4.5.1	Ziel der Wärmebehandlung	194
4.5.2	Glühbehandlungen von Stahl	194
4.5.3	Härten	198
4.5.4	Austenitumwandlung	204
4.5.5	Härteverfahren	211
4.5.6	Vergüten	216
4.5.7	Verfahren zum Härten oberflächennaher Schichten	220
4.5.8	Wärmebehandlungsfehler	227
4.6	Legierungselemente im Stahl	227
4.6.1	Einteilung und allgemeine Wirkung	228
4.6.2	Austenitumwandlung, Darstellung im ZTU-Schaubild	231
4.6.3	Härtbarkeit und Härteverhalten legierter Stähle ...	233
4.7	Normgerechte Bezeichnung der Eisenwerkstoffe	234
4.7.1	Benennung nach DIN EN 10027-1	234
4.7.2	Kennzeichnung durch Werkstoffnummern (DIN EN 10027-2)	236
4.8	Stahlgruppen	236
4.8.1	Einteilung der Stähle	236

4.8.2	Baustähle	239
4.8.3	Härtbare Maschinenbaustähle	252
4.8.4	Warmfeste und hitzebeständige Stähle	260
4.8.5	Kaltzähe Stähle	264
4.8.6	Nichtrostende Stähle	266
4.8.7	Druckwasserstoffbeständige Stähle	278
4.8.8	Werkzeugstähle	279
4.9	Eisengusswerkstoffe	284
4.9.1	Begriff, Bedeutung, Einteilung	284
4.9.2	Stahlguss	286
4.9.3	Gusseisen – Übersicht	290
4.9.4	Hartguss	291
4.9.5	Graues Gusseisen	292
4.9.6	Temperguss	301
4.10	Fragen und Aufgaben zu Kap. 4	305
	Literatur	306
	Nützliche Links	307
5	Nichteisenmetalle	309
	Hermann Hilbrans	
5.1	Normgerechte Bezeichnung der Nichteisenmetalle	309
5.1.1	Kurzzeichen	310
5.1.2	Werkstoffnummern	312
5.2	Kupfer und Kupferlegierungen	312
5.2.1	Kupferherstellung	313
5.2.2	Unlegiertes Kupfer	313
5.2.3	Niedriglegiertes Kupfer	316
5.2.4	Kupfer-Zink-Legierungen	317
5.2.5	Kupfer-Zink-Nickel-Legierungen	318
5.2.6	Kupfer-Zinn-Legierungen	319
5.2.7	Kupfer-Nickel-Werkstoffe mit besonderen elektrischen Eigenschaften	321
5.2.8	Korrosionsbeständige Kupfer-Nickel- Legierungen	322
5.3	Nickel und Nickellegierungen	323
5.3.1	Reinnickel	323
5.3.2	Legiertes Nickel	325
5.3.3	Nickel-Kupfer-Werkstoffe	325
5.3.4	Hochwarmfeste und hitzebeständige Nickellegierungen	326
5.3.5	Korrosionsbeständige Nickellegierungen	329
5.3.6	Nickelhaltige Magnetwerkstoffe	330
5.4	Aluminium und Aluminiumlegierungen	332
5.4.1	Unlegiertes Aluminium	333
5.4.2	Legierungssysteme des Aluminiums	334
5.4.3	Wärmebehandlung und Aushärten	336
5.4.4	Aluminium-Knetlegierungen	337
5.4.5	Aluminium-Gusslegierungen	338
5.4.6	Verarbeitung von Aluminiumlegierungen	339

5.5	Magnesium und Magnesiumlegierungen	340
5.5.1	Reinmagnesium	341
5.5.2	Magnesiumlegierungen	341
5.6	Titan und Titanlegierungen	343
5.6.1	Unlegiertes Titan	343
5.6.2	Titanlegierungen	344
5.7	Zirkonium und Reaktorwerkstoffe	346
5.8	Zinn und Zinnlegierungen	347
5.8.1	Reinzinn	347
5.8.2	Zinnlegierungen	348
5.9	Zink und Zinklegierungen	349
5.9.1	Unlegiertes und niedriglegiertes Zink	349
5.9.2	Zink-Überzüge	350
5.9.3	Zink-Druckguss	350
5.10	Blei und Bleilegierungen	351
5.10.1	Weichblei	352
5.10.2	Bleilegierungen	352
5.11	Recycling metallischer Werkstoffe	352
5.12	Fragen und Aufgaben zu Kap. 5	354
	Literatur	355
6	Anorganische nichtmetallische Werkstoffe.....	357
	Karl-Heinz Hübner	
6.1	Einteilung, Definition, Bedeutung	357
6.2	Glas	359
6.3	Keramik	363
6.3.1	Tonkeramische Werkstoffe	364
6.3.2	Oxidkeramische Werkstoffe	367
6.3.3	Ferroelektrische keramische Werkstoffe	370
6.3.4	Magnetische keramische Werkstoffe	372
6.4	Kohlewerkstoffe	373
6.5	Nichtoxidische Hartstoffe	376
6.5.1	Nichtmetallische Hartstoffe	377
6.5.2	Hartstoffe mit metallischen Eigenschaften	378
6.6	Halbleiter	381
6.6.1	Einleitung.....	381
6.6.2	Bändermodell	382
6.6.3	Eigenleitung	383
6.6.4	Störstellenleitung	384
6.6.5	p-n-Übergang	386
6.6.6	Transistor	388
6.6.7	Hall-Generator	389
6.6.8	Fotoelektrische Bauelemente	390
6.7	Nanotechnologie und Nanomaterialien	392
6.8	Fragen und Aufgaben zu Kapitel 6	394
	Literatur	395

7 Kunststoffe	397
Oswald Krüger	
7.1 Einteilung und Aufbau der Kunststoffe	397
7.1.1 Bezeichnungen, Begriffe	397
7.1.2 Eingruppierung der Kunststoffe	398
7.1.3 Vorprodukte, Formstoffe, Zusatzstoffe	399
7.1.4 Normung	401
7.2 Herstellung	402
7.2.1 Chemische Grundlagen	402
7.2.2 Polymerisation	409
7.2.3 Polykondensation	415
7.2.4 Polyaddition	420
7.3 Aufbau und strukturelle Einflüsse	422
7.3.1 Aufbauformen	422
7.3.2 Strukturelle Einflüsse	426
7.4 Kunststoffsorten	428
7.4.1 Thermoplaste	428
7.4.2 Thermoplastische Elastomere (TPE)	438
7.4.3 Elastomere	438
7.4.4 Duroplaste	439
7.5 Temperaturabhängige Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten	442
7.5.1 Thermische Zustands- und Übergangsbereiche	443
7.5.2 Temperaturabhängigkeit	445
7.5.3 Formgebungsmöglichkeiten	447
7.5.4 Verhalten im Gebrauchszustand	450
7.6 Modifizierung von Kunststoffen	451
7.6.1 Strukturveränderungen	451
7.6.2 Weichmachung	453
7.6.3 Additive	453
7.6.4 Füllstoffe	454
7.6.5 Verstärkungsstoffe	455
7.7 Gemeinsame Eigenschaften, charakteristische Merkmale	456
7.7.1 Äußere Merkmale	456
7.7.2 Chemische und physikalische Eigenschaften	457
7.7.3 Mechanische Eigenschaften	458
7.7.4 Elektrische Eigenschaften	462
7.8 Bestimmung von Kunststoffen	464
7.9 Kunststoffprüfung	467
7.9.1 Mechanische Eigenschaften	467
7.9.2 Mechanisch-thermisches Verhalten	476
7.9.3 Elektrische Eigenschaften	478
7.10 Kriterien zur Kunststoffauswahl	482
7.10.1 Allgemeine Anforderungen	482
7.10.2 Eigenschaftskennwerte	483
7.11 Fragen und Aufgaben zu Kap. 7	484
Literatur	484

8 Schadensanalyse	485
Hans-Jürgen Bargel	
8.1 Methodik einer Schadensanalyse	487
8.1.1 Voruntersuchungsphase	487
8.1.2 Entscheidungsphase	488
8.1.3 Untersuchungsphase	488
8.1.4 Auswertungsphase	488
8.2 Schadensuntersuchungen	489
8.3 Verschleißschäden	489
8.3.1 Verschleißsystem	490
8.3.2 Verschleißarten	491
8.3.3 Verschleißmechanismen	491
8.3.4 Verschleißmerkmale	492
8.4 Korrosionsschäden	493
8.5 Wasserstoffversprödung	493
8.6 Fraktografie	496
8.7 Beispiele von Schadenfällen	498
8.7.1 Wasserschaden durch undichten Rohrentlüfter	498
8.7.2 Bruch eines Auslassventils	500
8.7.3 Bruch der Kurbelwelle eines Dieselmotors	501
8.7.4 Lochkorrosion in einem Wärmeübertrager	502
8.7.5 Bruch von Federringen infolge Wasserstoffversprödung	503
8.8 Fragen und Aufgaben zu Kap. 8	504
Literatur	504
Nützliche Links	504
 Lösungen zu den Übungsaufgaben	 505
 Sachverzeichnis	 517