

B. Ilchner • R. F. Singer

# Werkstoff Wissenschaften und Fertigungstechnik

Eigenschaften, Vorgänge, Technologien

5., neu bearbeitete Auflage

Mit 235 Abbildungen und 31 Tabellen

*fyj* Springer

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einordnung in allgemeine Zusammenhänge</b>	<b>1</b>
1.1	Werkstoffe im Stoffkreislauf	1
1.1.1	Rohstoffversorgung	1
1.1.2	Verfolgung von Stoffflüssen. Substitution bei Mangel, Pufferfunktion von Lagern, Verlust durch Dissipation	6
1.2	Recycling und Wiederverwendung	8
1.3	Werkstoffe und Energie	11
1.4	Umweltbelastung durch Werkstoffherstellung	12
1.5	Was kosten Werkstoffe?	13
1.6	Werkstoffe und Kulturgeschichte	14
<b>2</b>	<b>Werkstoffgruppen und Werkstoffeigenschaften</b>	<b>19</b>
2.1	Werkstoffgruppen	19
2.2	Werkstoffeigenschaften	22
<b>3</b>	<b>Das Mikrogefüge und seine Merkmale</b>	<b>25</b>
3.1	Zielsetzung und Definition	25
3.2	Probenvorbereitung für Lichtmikroskopie	27
3.3	Das Lichtmikroskop	28
3.4	Das Elektronenmikroskop	29
3.5	Der Elektronenstrahl in der Analyse	32
3.6	Quantitative Bildanalyse	35
3.7	Einteilung und Natur der mikroskopisch nachweisbaren Gefügebestandteile	37
3.7.1	Körner	37
3.7.2	Die dritte Dimension der Gefüge	39
3.7.3	Poren	40
3.7.4	Einschlüsse	40
3.7.5	Ausscheidungen und Dispersoide	40
3.7.6	Eutektische Gefüge	42
3.7.7	Martensit	42

3.7.8	Versetzungen	42
3.7.9	Zwillinge	43
3.8	Ergänzende mikroskopische Verfahren	45
3.8.1	Akustische Mikroskopie	45
3.8.2	Tunneleffekt-Rastermikroskopie	46
3.8.3	Atomare Kraftmikroskopie	46
<b>4</b>	<b>Gleichgewichte</b>	<b>49</b>
4.1	Zustände und Phasen. Gew.-% und At.-%.	49
4.2	Stabilität von Zuständen	50
4.3	Kinetik der Umwandlungen	52
4.4	Thermodynamische Messgrößen	53
4.4.1	Wärmeinhalt und Enthalpie	53
4.4.2	Bildungswärme	57
4.4.3	Thermodynamisches Potenzial und Entropie	58
4.5	Messverfahren	59
4.5.1	Kalorimeter, thermische Analyse, DTA	60
4.5.2	Dampfdruckmessung	63
4.5.3	Temperaturmessung	64
4.6	Zustandsdiagramme metallischer und keramischer Mehrstoffsysteme	66
4.6.1	Vorbemerkung	66
4.6.2	Wie liest man ein Zustandsdiagramm?	68
4.6.3	Das Zustandsdiagramm Fe-C	73
4.6.4	Zustandsdiagramme ternärer Systeme	75
4.7	Ellingham-Richardson-Diagramme	77
<b>5</b>	<b>Atomare Bindung und Struktur der Materie</b>	<b>81</b>
5.1	Gase	81
5.2	Bindungskräfte in kondensierten Phasen	82
5.3	Schmelzen und Gläser	85
5.4	Kristalle	88
5.4.1	Raumgitter und Elementarzellen	88
5.4.2	Wichtige Gittertypen	92
5.4.3	Gitterfehlstellen	96
5.4.4	Thermische Ausdehnung	97
5.4.5	Experimentelle Untersuchung von Gitterstrukturen	98
5.5	Lösungen und Mischkristalle	100
5.6	Hochpolymere Werkstoffe	102
5.6.1	Molekulare Grundstrukturen	102
5.6.2	Entwicklungsprinzipien makromolekularer Werkstoffe	105
5.6.3	Thermoplaste, Duroplaste, Elastomere	108
<b>6</b>	<b>Diffusion. Atomare Platzwechsel</b>	<b>111</b>
6.1	Diffusionsvorgänge	111
6.1.1	Definition	111
6.1.2	Mathematische Beschreibung	112

6.1.3	Lösungen der Diffusionsgleichung	114
6.1.4	Schichtaufbau durch Diffusion	115
6.1.5	Abhängigkeit des Diffusionskoeffizienten. Thermische Aktivierung	118
6.1.6	Diffusionsmechanismen	120
6.2	Andere Triebkräfte	122
6.2.1	Ionenleitung	122
6.2.2	Wärmeleitung	123
<b>7</b>	<b>Zustandsänderungen und Phasenumwandlungen</b>	<b>127</b>
7.1	Systematik der Umwandlungen	127
7.2	Keimbildung (homogen und heterogen)	128
7.3	Verdampfung und Kondensation	132
7.4	Schmelzen und Erstarren	134
7.4.1	Wärmetransport	134
7.4.2	Umverteilung von Legierungselementen. Seigerungen	135
7.4.3	Instabilität der Wachstumsfront. Dendriten	139
7.4.4	Ausbildung der Kornstruktur. Einkristalle, Stängelkristalle, Polykristalle	143
7.4.5	Eutektische Erstarrung	145
7.4.6	Glasige Erstarrung	146
7.5	Diffusionsgesteuerte Umwandlung im festen Zustand	149
7.5.1	Schichtwachstum (ebener Fall)	149
7.5.2	Ausscheidung aus übersättigten Mischkristallen	151
7.5.3	Ausscheidung in aushärtbaren Aluminiumlegierungen	155
7.5.4	Ausscheidung von Ferrit aus Austenit in Stählen. Eutektoider Zerfall	157
7.5.5	Spinodale Entmischung	160
7.6	Diffusionslose Umwandlung im festen Zustand. Martensit	161
<b>8</b>	<b>Vorgänge an Grenzflächen</b>	<b>165</b>
8.1	Grenzflächenenergie	165
8.2	Adsorption	166
8.3	Wachstumsformen	167
8.4	Benetzung. Kapillarität	168
8.5	Sintern. Konsolidieren von Pulvern	169
8.5.1	Treibende Kraft	169
8.5.2	Festphasensintern	171
8.5.3	Flüssigphasensintern	172
8.6	Kornwachstum	173
8.7	Ostwald-Reifung	175
<b>9</b>	<b>Korrosion und Korrosionsschutz</b>	<b>179</b>
9.1	Beispiele für Werkstoffschädigung. Definition	179
9.2	Korrosion durch wässrige Lösungen	180
9.2.1	Elektrolyte	180
9.2.2	Elektroden	181

9.2.3	Elektrochemische Elemente . . . . .	183
9.2.4	Lokalelemente . . . . .	186
9.2.5	Säurekorrosion, Sauerstoffkorrosion, Rost . . . . .	188
9.2.6	Passivität . . . . .	191
9.3	Maßnahmen zum Korrosionsschutz . . . . .	191
9.3.1	Vermeidung kondensierter Feuchtigkeit . . . . .	191
9.3.2	Wasseraufbereitung und -entlüftung . . . . .	192
9.3.3	Korrosionsbeständige Legierungen . . . . .	192
9.3.4	Überzüge und Beschichtungen . . . . .	192
9.3.5	Kathodischer Schutz . . . . .	193
9.3.6	Alternative Werkstoffgruppen . . . . .	194
9.4	Zusammenwirken von korrosiver und mechanischer Beanspruchung . . . . .	197
9.5	Korrosion in Luft und Gasen bei hoher Temperatur . . . . .	200
9.5.1	Grundmechanismen (Deckschichtbildung, Ionenreaktion) . . . . .	200
9.5.2	Schutzmaßnahmen gegen Hochtemperaturkorrosion . . . . .	205
9.6	Festkörperelektrolyte, Brennstoffzellen . . . . .	206
<b>10</b>	<b>Festigkeit - Verformung - Bruch . . . . .</b>	<b>209</b>
10.1	Definitionen und Maßeinheiten . . . . .	209
10.2	Elastische Formänderung . . . . .	211
10.3	Anelastisches Verhalten, Dämpfung . . . . .	214
10.4	Duktiles und sprödes Verhalten als Grenzfälle . . . . .	216
10.5	Zugversuch, Spannungs-Dehnungs-Kurve . . . . .	216
10.6	Härteprüfung . . . . .	220
10.7	Bruchvorgänge . . . . .	223
10.7.1	Zäher (duktiler) Bruch . . . . .	223
10.7.2	Spröbruch . . . . .	224
10.7.3	Anrisse, Grundzüge der Bruchmechanik . . . . .	225
10.7.4	Kerbschlagzähigkeit . . . . .	230
10.8	Kristallplastizität, Versetzungen . . . . .	232
10.9	Festigkeit und Verformung bei hoher Temperatur . . . . .	236
10.9.1	Erholung und Rekristallisation . . . . .	236
10.9.2	Kriechen und Zeitstandfestigkeit. Spannungsrelaxation . . . . .	239
10.10	Wechselfestigkeit und Ermüdung . . . . .	243
10.11	Viskoses Fließen. Viskoelastisches Verhalten . . . . .	247
10.11.1	Vorbemerkung und Beispiele . . . . .	247
10.11.2	Grundmechanismus. Viskositätsdefinition . . . . .	247
10.11.3	Viskoelastische Modelle . . . . .	250
10.12	Maßnahmen zur Festigkeitssteigerung . . . . .	254
10.12.1	Steigerung der elastischen Steifigkeit . . . . .	255
10.12.2	Steigerung des Widerstands der Legierungen gegen plastische Formänderung . . . . .	256
10.12.3	Steigerung der Bruchfestigkeit und Duktilität . . . . .	263
10.12.4	Härtung durch kombinierte Maßnahmen . . . . .	266

10.12.5	Festigkeitssteigerung durch Fasern (Verbundwerkstoffe) . . . . .	267
10.12.6	Steigerung der Warmfestigkeit . . . . .	268
<b>11</b>	<b>Elektrische Eigenschaften</b> . . . . .	<b>269</b>
11.1	Vorbemerkung über Werkstoffe der Elektrotechnik . . . . .	269
11.2	Stromtransport in metallischen Leitern . . . . .	270
1 1.2.1	Definitionen und Maßeinheiten . . . . .	270
11.2.2	Angaben zu wichtigen Metallen und Legierungen . . . . .	272
11.2.3	Temperaturabhängigkeit und Legierungseinflüsse . . . . .	273
11.2.4	Einflüsse durch elastische und plastische Verformung . . . . .	275
11.3	Supraleitung . . . . .	276
11.4	Nichtleiter, Isolierstoffe . . . . .	279
11.4.1	Technische Isolierstoffe . . . . .	279
11.4.2	Elektrische Polarisierung . . . . .	280
11.5	Halbleiter . . . . .	281
11.5.1	Definition, Kennzeichen, Werkstoffgruppen . . . . .	281
11.5.2	Leitungsmechanismus . . . . .	282
11.5.3	Dotierung, Bändermodell . . . . .	284
11.5.4	Ionenleiter . . . . .	288
<b>12</b>	<b>Magnetismus und Magnetwerkstoffe</b> . . . . .	<b>291</b>
12.1	Magnetische Felder, Definitionen . . . . .	291
12.2	Dia- und Paramagnetismus . . . . .	293
12.3	Ferromagnetismus . . . . .	296
12.3.1	Physikalische Ursachen des Ferromagnetismus . . . . .	296
12.3.2	Antiferro- und Ferrimagnetismus . . . . .	301
12.3.3	Magnetostriktion . . . . .	302
12.3.4	Magnetisierungskurve. Hysterese . . . . .	303
12.3.5	Ummagnetisierungsverluste . . . . .	305
12.4	Technische Magnetwerkstoffe . . . . .	310
12.4.1	Allgemeine Einteilung . . . . .	310
12.4.2	Weichmagnetische Werkstoffe . . . . .	311
12.4.3	Hartmagnetische Werkstoffe . . . . .	314
<b>13</b>	<b>Herstellungs- und verarbeitungstechnische Verfahren</b> . . . . .	<b>319</b>
13.1	Vom Rohstoff zum Werkstoff . . . . .	319
13.1.1	Aufbereitung der Erze und Reduktion zu Metallen . . . . .	319
13.1.2	Stahlherstellung, Reinheitssteigerung der Metalle . . . . .	326
13.1.3	Herstellung keramischer Werkstoffe . . . . .	336
13.1.4	Herstellung von Glas . . . . .	337
13.2	Vom Werkstoff zum Werkstück (Formgebung) . . . . .	338
13.2.1	Fertigungsverfahren im Überblick . . . . .	338
13.2.2	Urformen zu Vorprodukten durch Gießen . . . . .	339
13.2.3	Urformen zu Endprodukten durch Gießen . . . . .	342
13.2.4	Urformen durch Pulvermetallurgie . . . . .	351

13.2.5	Umformen . . . . .	355
13.2.6	Formgebung von Keramik . . . . .	367
13.2.7	Formgebung von Glas . . . . .	369
13.2.8	Formgebung von Kunststoffen . . . . .	371
13.2.9	Spanen und Abtragen . . . . .	381
13.3	Verbinden von Werkstücken . . . . .	387
13.3.1	Schweißen . . . . .	387
13.3.2	Löten . . . . .	394
13.3.3	Kleben . . . . .	396
13.4	Beschichten von Werkstücken . . . . .	397
13.5	Stoffeigenschaft ändern . . . . .	408
13.5.1	Verbesserung der Volumeneigenschaften von Werkstücken . . . . .	408
13.5.2	Verbesserung der Randschichteigenschaften von Werkstücken . . . . .	411
<b>14</b>	<b>Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung . . . . .</b>	<b>413</b>
14.1	Definition, Zuverlässigkeit und Sicherheit . . . . .	413
14.2	Flüssigkeitseindringverfahren . . . . .	415
14.3	Magnetpulververfahren . . . . .	416
14.4	Wirbelstromverfahren . . . . .	417
14.5	Durchleuchtung mit Röntgen- und Gammastrahlen . . . . .	418
14.6	Ultraschallprüfung . . . . .	423
14.7	Schallemissionsanalyse . . . . .	426
14.8	Optische Holographie . . . . .	428
<b>15</b>	<b>Ausgewählte Werkstoffsysteme mit besonderer Bedeutung für den Anwender . . . . .</b>	<b>431</b>
L5I	Stähle . . . . .	431
15.1.1	Baustahl - nicht zur Wärmebehandlung bestimmt . . . . .	438
15.1.2	Baustahl - zur Wärmebehandlung bestimmt . . . . .	441
15.1.3	Nichtrostende Stähle . . . . .	443
15.1.4	Warmfeste Stähle . . . . .	444
15.1.5	Werkzeugstähle . . . . .	445
15.2	Gusseisen . . . . .	446
15.3	Aluminium und Aluminiumlegierungen . . . . .	449
15.3.1	Aluminium-Knetlegierungen . . . . .	451
15.3.2	Aluminium-Gusslegierungen . . . . .	452
15.4	Magnesium und Magnesiumlegierungen . . . . .	453
15.5	Titan und Titanlegierungen . . . . .	455
15.6	Nickel und Nickellegierungen . . . . .	458
15.7	Kupfer und Kupferlegierungen . . . . .	462
15.8	Keramische Werkstoffe und Gläser . . . . .	464

15.9	Kunststoffe. . . . .	466
15.9.1	Thermoplastische Standardkunststoffe. . . . .	467
15.9.2	Faserverstärkte Kunststoffe. . . . .	467
15.9.3	Kunststoffschäume. . . . .	469
<b>Anhang</b>	. . . . .	<b>471</b>
A.1	Weiterführende und ergänzende Lehr- und Handbücher. . . . .	471
A.2	Fachzeitschriften. . . . .	474
A.3	Wichtige Werkstoffkenngrößen metallischer Elemente. . . . .	475
A.4	Kurzbezeichnungen für Werkstoffe. . . . .	479
A.4.1.	Werkstoffnummern. . . . .	479
A.4.2	Kurznamen für Stähle. . . . .	479
A.4.3	Kurznamen für Gusseisen. . . . .	481
A.4.4	Kurznamen für Nichteisenmetalle. . . . .	481
<b>Sachverzeichnis</b>	. . . . .	<b>483</b>