

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einordnung in allgemeine Zusammenhänge</b> . . . . .	1
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> . . . . .	17
2.1	Werkstoffgruppen . . . . .	17
2.2	Werkstoffeigenschaften . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Das Mikrogefüge und seine Merkmale</b> . . . . .	23
3.1	Zielsetzung und Definition . . . . .	23
3.2	Probenvorbereitung für Lichtmikroskopie . . . . .	25
3.3	Das Lichtmikroskop . . . . .	26
3.4	Das Elektronenmikroskop . . . . .	27
3.5	Der Elektronenstrahl in der Analyse . . . . .	30
3.6	Quantitative Bildanalyse . . . . .	33
3.7	Einteilung und Natur der mikroskopisch nachweisbaren Gefügebestandteile . . . . .	35
3.7.1	Körner . . . . .	35
3.7.2	Die dritte Dimension der Gefüge . . . . .	37
3.7.3	Poren . . . . .	37
3.7.4	Einschlüsse . . . . .	38
3.7.5	Ausscheidungen und Dispersoide . . . . .	38
3.7.6	Eutektische Gefüge . . . . .	40
3.7.7	Martensit . . . . .	40

3.7.8	Versetzungen . . . . .	40
3.7.9	Zwillinge . . . . .	42
3.8	Ergänzende mikroskopische Verfahren . . . . .	43
3.8.1	Akustische Mikroskopie . . . . .	43
3.8.2	Tunneleffekt-Rastermikroskopie . . . . .	43
3.8.3	Atomare Kraftmikroskopie . . . . .	44
<b>4</b>	<b>Gleichgewichte . . . . .</b>	<b>45</b>
4.1	Zustände und Phasen. Gew.-% und At.-% . . . . .	45
4.2	Stabilität von Zuständen . . . . .	47
4.3	Kinetik der Umwandlungen . . . . .	49
4.4	Thermodynamische Messgrößen . . . . .	50
4.4.1	Wärmeinhalt und Enthalpie . . . . .	50
4.4.2	Bildungswärme . . . . .	53
4.4.3	Thermodynamisches Potenzial und Entropie . . . . .	54
4.5	Messverfahren . . . . .	56
4.5.1	Kalorimeter, thermische Analyse, DTA . . . . .	56
4.5.2	Dampfdruckmessung . . . . .	59
4.5.3	Temperaturmessung . . . . .	60
4.6	Zustandsdiagramme metallischer und keramischer Mehrstoffsysteme . . . . .	62
4.6.1	Vorbemerkung . . . . .	62
4.6.2	Wie liest man ein Zustandsdiagramm? . . . . .	64
4.6.3	Das Zustandsdiagramm Fe–C . . . . .	69
4.6.4	Zustandsdiagramme ternärer Systeme . . . . .	71
4.7	Ellingham-Richardson-Diagramme . . . . .	73
<b>5</b>	<b>Atomare Bindung und Struktur der Materie . . . . .</b>	<b>77</b>
5.1	Gase . . . . .	77
5.2	Bindungskräfte in kondensierten Phasen . . . . .	78
5.3	Schmelzen und Gläser . . . . .	81
5.4	Kristalle . . . . .	84
5.4.1	Raumgitter und Elementarzellen . . . . .	84
5.4.2	Wichtige Gittertypen . . . . .	88
5.4.3	Gitterfehlstellen . . . . .	91
5.4.4	Thermische Ausdehnung . . . . .	93
5.4.5	Experimentelle Untersuchung von Gitterstrukturen . . . . .	95
5.5	Lösungen und Mischkristalle . . . . .	97
5.6	Polymere Werkstoffe . . . . .	99
5.6.1	Molekulare Grundstrukturen . . . . .	99
5.6.2	Entwicklungsprinzipien makromolekularer Werkstoffe . . . . .	103
5.6.3	Thermoplaste, Duroplaste, Elastomere . . . . .	106

---

<b>6</b>	<b>Diffusion. Atomare Platzwechsel</b>	109
6.1	Diffusionsvorgänge	109
6.1.1	Definition	109
6.1.2	Mathematische Beschreibung	110
6.1.3	Lösungen der Diffusionsgleichung	111
6.1.4	Schichtaufbau durch Diffusion	114
6.1.5	Abhängigkeit des Diffusionskoeffizienten. Thermische Aktivierung	116
6.1.6	Diffusionsmechanismen	119
6.2	Triebkräfte	120
6.2.1	Thermodynamisches Potenzial	120
6.2.2	Elektrische Felder. Ionenleitung	121
6.2.3	Vergleich mit Wärmeleitung	122
<b>7</b>	<b>Zustandsänderungen und Phasenumwandlungen</b>	125
7.1	Systematik der Umwandlungen	125
7.2	Keimbildung (homogen und heterogen)	126
7.3	Verdampfung und Kondensation	131
7.4	Schmelzen und Erstarren	132
7.4.1	Wärmetransport	132
7.4.2	Umverteilung von Legierungselementen. Seigerungen	133
7.4.3	Instabilität der Wachstumsfront, Dendriten	138
7.4.4	Ausbildung der Kornstruktur. Einkristalle, Stängelkristalle, Polykristalle	141
7.4.5	Eutektische Erstarrung	144
7.4.6	Glasige Erstarrung	145
7.5	Diffusionsgesteuerte Umwandlung im festen Zustand	148
7.5.1	Schichtwachstum (ebener Fall)	148
7.5.2	Ausscheidung aus übersättigten Mischkristallen	149
7.5.3	Ausscheidung in aushärtbaren Aluminiumlegierungen	153
7.5.4	Ausscheidung von Ferrit aus Austenit in Stählen. Eutektoider Zerfall	155
7.5.5	Spinodale Entmischung	158
7.6	Diffusionslose Umwandlung im festen Zustand. Martensit	159
<b>8</b>	<b>Vorgänge an Grenzflächen</b>	163
8.1	Grenzflächenenergie	163
8.2	Adsorption	164
8.3	Wachstumsformen	165
8.4	Benetzung. Kapillarität	166
8.5	Sintern. Konsolidieren von Pulvern	167
8.5.1	Treibende Kraft	167

	8.5.2	Festphasensintern . . . . .	169
	8.5.3	Flüssigphasensintern . . . . .	170
	8.6	Kornwachstum . . . . .	171
	8.7	Ostwald-Reifung . . . . .	173
<b>9</b>		<b>Korrosion und Korrosionsschutz . . . . .</b>	<b>177</b>
	9.1	Beispiele für Werkstoffschädigung. Definition . . . . .	177
	9.2	Korrosion durch wässrige Lösungen . . . . .	178
	9.2.1	Elektrolyte . . . . .	178
	9.2.2	Elektroden . . . . .	179
	9.2.3	Elektrochemische Elemente . . . . .	181
	9.2.4	Lokalelemente . . . . .	185
	9.2.5	Säurekorrosion, Sauerstoffkorrosion. Rost . . . . .	186
	9.2.6	Passivität . . . . .	188
	9.3	Maßnahmen zum Korrosionsschutz . . . . .	189
	9.3.1	Vermeidung kondensierter Feuchtigkeit . . . . .	189
	9.3.2	Wasseraufbereitung und -entlüftung . . . . .	189
	9.3.3	Korrosionsbeständige Legierungen . . . . .	190
	9.3.4	Überzüge und Beschichtungen . . . . .	190
	9.3.5	Kathodischer Schutz . . . . .	191
	9.3.6	Alternative Werkstoffgruppen . . . . .	192
	9.4	Zusammenwirken von korrosiver und mechanischer Beanspruchung . . . . .	195
	9.5	Korrosion in Luft und Gasen bei hoher Temperatur . . . . .	197
	9.5.1	Grundmechanismen (Deckschichtbildung, Ionenreaktion) . . . . .	197
	9.5.2	Schutzmaßnahmen gegen Hochtemperaturkorrosion . . . . .	202
	9.6	Festkörperelektrolyte. Brennstoffzellen, Batterien . . . . .	204
<b>10</b>		<b>Festigkeit – Verformung – Bruch . . . . .</b>	<b>207</b>
	10.1	Definitionen und Maßeinheiten . . . . .	207
	10.2	Elastische Formänderung . . . . .	209
	10.3	Anelastisches Verhalten. Dämpfung . . . . .	214
	10.4	Duktiles und sprödes Verhalten als Grenzfälle . . . . .	215
	10.5	Zugversuch, Spannungs-Dehnungs-Kurve . . . . .	216
	10.6	Härteprüfung . . . . .	221
	10.7	Bruchvorgänge . . . . .	224
	10.7.1	Zäher (duktiler) Bruch. Gleitbruch . . . . .	224
	10.7.2	Spröder Bruch. Spaltbruch . . . . .	226
	10.7.3	Kerbschlagarbeit . . . . .	227
	10.7.4	Bruchmechanik. Ausbreitung langer Risse unterhalb Streckgrenze. Sicherheitsbauteile . . . . .	230
	10.8	Plastische Formänderung . . . . .	237
	10.8.1	Kristallplastizität. Versetzungen . . . . .	237

---

10.8.2	Plastische Verformung von Kunststoffen . . . . .	241
10.9	Festigkeit und Verformung bei hoher Temperatur . . . . .	242
10.9.1	Erholung und Rekristallisation . . . . .	242
10.9.2	Kriechen und Zeitstandfestigkeit. Spannungsrelaxation . . . . .	244
10.10	Dynamische Beanspruchung. Werkstoffermüdung . . . . .	249
10.11	Viskoses Fließen. Viskoelastisches Verhalten . . . . .	253
10.11.1	Vorbemerkung und Beispiele . . . . .	253
10.11.2	Grundmechanismus. Viskositätsdefinition . . . . .	254
10.11.3	Viskoelastische Modelle . . . . .	257
10.12	Maßnahmen zur Optimierung der Steifigkeit . . . . .	261
10.12.1	Verbesserung der Steifigkeit durch Texturen . . . . .	261
10.12.2	Erhöhung der Steifigkeit durch Fasern. Verbundwerkstoffe . . . . .	262
10.13	Maßnahmen zur Steigerung des Widerstands gegen plastische Formänderung . . . . .	264
10.13.1	Erhöhung der Festigkeit durch Versetzungshindernisse. Versetzung-, Mischkristall- und Teilchenhärtung . . . . .	264
10.13.2	Erhöhung der Festigkeit durch Korngrenzen. Feinkornhärtung . . . . .	268
10.13.3	Erhöhung der Festigkeit durch Fasern. Verbundwerkstoffe . . . . .	269
10.14	Maßnahmen zur Steigerung der Warmfestigkeit . . . . .	271
10.15	Maßnahmen zur Steigerung der Duktilität . . . . .	272
<b>11</b>	<b>Elektrische Eigenschaften . . . . .</b>	<b>275</b>
11.1	Vorbemerkung über Werkstoffe der Elektrotechnik . . . . .	275
11.2	Stromtransport in metallischen Leitern . . . . .	276
11.2.1	Definitionen und Maßeinheiten . . . . .	276
11.2.2	Angaben zu wichtigen Metallen und Legierungen . . . . .	277
11.2.3	Temperaturabhängigkeit und Legierungseinflüsse . . . . .	278
11.2.4	Einflüsse durch elastische und plastische Verformung . . . . .	281
11.3	Supraleitung . . . . .	282
11.4	Nichtleiter, Isolierstoffe . . . . .	285
11.4.1	Technische Isolierstoffe . . . . .	285
11.4.2	Elektrische Polarisierung . . . . .	286
11.5	Halbleiter . . . . .	287
11.5.1	Definition, Kennzeichen, Werkstoffgruppen . . . . .	287
11.5.2	Leitungsmechanismus . . . . .	288
11.5.3	Dotierung, Bändermodell . . . . .	290
11.5.4	Ionenleiter . . . . .	295
<b>12</b>	<b>Magnetismus und Magnetwerkstoffe . . . . .</b>	<b>297</b>
12.1	Magnetische Felder, Definitionen . . . . .	297
12.2	Dia- und Paramagnetismus . . . . .	299
12.3	Ferromagnetismus . . . . .	302

12.3.1	Physikalische Ursachen des Ferromagnetismus . . . . .	302
12.3.2	Antiferro- und Ferrimagnetismus . . . . .	306
12.3.3	Magnetostriktion . . . . .	307
12.3.4	Magnetisierungskurve. Hysterese . . . . .	308
12.3.5	Ummagnetisierungsverluste . . . . .	311
12.4	Technische Magnetwerkstoffe . . . . .	315
12.4.1	Allgemeine Einteilung . . . . .	315
12.4.2	Weichmagnetische Werkstoffe . . . . .	316
12.4.3	Hartmagnetische Werkstoffe . . . . .	318
<b>13</b>	<b>Herstellungs- und verarbeitungstechnische Verfahren . . . . .</b>	<b>323</b>
13.1	Vom Rohstoff zum Werkstoff . . . . .	323
13.1.1	Aufbereitung der Erze und Reduktion zu Metallen . . . . .	323
13.1.2	Stahlherstellung. Reinheitssteigerung der Metalle . . . . .	331
13.1.3	Herstellung keramischer Werkstoffe . . . . .	339
13.1.4	Herstellung von Glas . . . . .	340
13.2	Vom Werkstoff zum Werkstück (Formgebung) . . . . .	342
13.2.1	Fertigungsverfahren im Überblick . . . . .	342
13.2.2	Urformen zu Vorprodukten durch Gießen . . . . .	342
13.2.3	Urformen zu Endprodukten durch Gießen . . . . .	345
13.2.4	Urformen durch Pulvermetallurgie . . . . .	354
13.2.5	Umformen . . . . .	360
13.2.6	Formgebung von Keramik . . . . .	371
13.2.7	Formgebung von Glas . . . . .	373
13.2.8	Formgebung von Kunststoffen allgemein . . . . .	375
13.2.9	Formgebung von Kunststoffen mit Faserverstärkung . . . . .	384
13.2.10	Spanen und Abtragen . . . . .	387
13.2.11	Additive Fertigung . . . . .	392
13.3	Verbinden von Werkstücken . . . . .	395
13.3.1	Schweißen . . . . .	396
13.3.2	Löten . . . . .	403
13.3.3	Kleben . . . . .	404
13.4	Beschichten von Werkstücken . . . . .	405
13.5	Stoffeigenschaft ändern . . . . .	415
13.5.1	Verbesserung der Volumeneigenschaften von Werkstücken . . . . .	416
13.5.2	Verbesserung der Randschichteigenschaften von Werkstücken . . . . .	418
<b>14</b>	<b>Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung . . . . .</b>	<b>421</b>
14.1	Definition. Zuverlässigkeit und Sicherheit . . . . .	421
14.2	Flüssigkeitseindringverfahren . . . . .	423
14.3	Magnetpulververfahren . . . . .	424
14.4	Wirbelstromverfahren . . . . .	425

---

14.5	Durchleuchtung mit Röntgen- und Gammastrahlen . . . . .	427
14.6	Ultraschallprüfung . . . . .	431
14.7	Schallemissionsanalyse . . . . .	434
14.8	Optische Holographie . . . . .	436
<b>15</b>	<b>Ausgewählte Werkstoffsysteme mit besonderer Bedeutung</b>	
	<b>für den Anwender . . . . .</b>	<b>439</b>
15.1	Stähle . . . . .	439
15.1.1	Baustahl – nicht zur Wärmebehandlung bestimmt . . . . .	447
15.1.2	Baustahl – zur Wärmebehandlung bestimmt . . . . .	449
15.1.3	Nichtrostende Stähle . . . . .	451
15.1.4	Warmfeste Stähle . . . . .	452
15.1.5	Werkzeugstähle . . . . .	453
15.2	Gusseisen . . . . .	454
15.3	Aluminium und Aluminiumlegierungen . . . . .	457
15.3.1	Aluminium-Knetlegierungen . . . . .	459
15.3.2	Aluminium-Gusslegierungen . . . . .	460
15.4	Magnesium und Magnesiumlegierungen . . . . .	461
15.5	Titan und Titanlegierungen . . . . .	463
15.6	Nickel und Nickellegierungen . . . . .	466
15.7	Kupfer und Kupferlegierungen . . . . .	470
15.8	Keramische Werkstoffe und Gläser . . . . .	472
15.9	Kunststoffe . . . . .	474
15.9.1	Thermoplastische Standardkunststoffe . . . . .	475
15.9.2	Faserverstärkte Kunststoffe . . . . .	475
15.9.3	Kunststoffschäume . . . . .	477
<b>Anhang</b>	<b>. . . . .</b>	<b>479</b>
A.1	Weiterführende und ergänzende Lehr- und Handbücher . . . . .	479
A.1.1	Allgemeine Übersichten . . . . .	479
A.1.2	Einzelne Werkstoffe und Werkstoffgruppen . . . . .	480
A.1.3	Einzelne Sachgebiete . . . . .	481
A.2	Wichtige Werkstoffkenngrößen metallischer Elemente . . . . .	482
A.3	Kurzbezeichnungen für Werkstoffe . . . . .	486
A.3.1	Werkstoffnummern . . . . .	486
A.3.2	Kurznamen für Stähle . . . . .	486
A.3.3	Kurznamen für Gusseisen . . . . .	488
A.3.4	Kurznamen für Nichteisenmetalle . . . . .	488
<b>Sachverzeichnis</b>	<b>. . . . .</b>	<b>491</b>