

Inhaltsverzeichnis

1	Einordnung in allgemeine Zusammenhänge	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
2	Werkstoffgruppen und Werkstoffeigenschaften	17
2.1	Werkstoffgruppen	17
2.2	Werkstoffeigenschaften	20
3	Das Mikrogefüge und seine Merkmale	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
4	Gleichgewichte	45
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
5	Atomare Bindung und Struktur der Materie	77
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

6	Diffusion. Atomare Platzwechsel	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
7	Zustandsänderungen und Phasenumwandlungen	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
8	Vorgänge an Grenzflächen	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
9	Korrosion und Korrosionsschutz	177
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
10	Festigkeit – Verformung – Bruch	207
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
11	Elektrische Eigenschaften	275
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 Polarisaton	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
12	Magnetismus und Magnetwerkstoffe	297
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
13	Herstellungs- und verarbeitungstechnische Verfahren	323
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
14	Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung	421
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
15	Ausgewählte Werkstoffsysteme mit besonderer Bedeutung	
	für den Anwender	439
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
Anhang	479
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
Sachverzeichnis	491