

Werkstoffwissenschaft

*Herausgegeben von
Hartmut Worch, Wolfgang Pompe und Werner Schatt †*

10. vollständig überarbeitete Auflage



WILEY-
VCH

WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 10. Auflage V

1	Einleitung	1
2	Zustände des festen Körpers	5
2.1	Kristalliner Zustand	7
2.1.1	Raumgitter und Kristallsysteme	8
2.1.2	Bravais-Gitter und Kristallstruktur	9
2.1.3	Analytische Beschreibung des Raumgitters	12
2.1.4	Polkugel und stereographische Projektion	18
2.1.5	Bindung im Festkörper	21
2.1.5.1	Aufbau und Energieniveaus der Atomhülle	25
2.1.5.2	Ionenbindung	30
2.1.5.3	Kovalente Bindung (Atombindung)	32
2.1.5.4	Metallbindung	34
2.1.5.5	Nebervalenzbindung	35
2.1.5.6	Mischbindung	37
2.1.6	Koordination	38
2.1.7	Elementstrukturen	40
2.1.7.1	Krz Struktur (Wolfram-Typ)	40
2.1.7.2	Kfz Struktur (Kupfer-Typ)	42
2.1.7.3	Hexagonal dichteste Struktur (Magnesium-Typ)	43
2.1.8	Legierungsstrukturen	43
2.1.8.1	Austauschmischkristalle	44
2.1.8.2	Überstrukturen	45
2.1.8.3	Einlagerungsmischkristalle	46
2.1.8.4	Intermetallische Phasen	47
2.1.9	Ionenstrukturen	51
2.1.10	Molekülstrukturen	57
2.1.10.1	Atombindung in Polymeren	57
2.1.10.2	Zwischenmolekulare Wechselwirkungen in Polymeren	59
2.1.10.3	Aufbauprinzip und Infrastruktur von Makromolekülen	61

2.1.10.3.1	Konstitution von Makromolekülen	61
2.1.10.3.2	Konfiguration von Makromolekülen	64
2.1.10.3.3	Konformation von Makromolekülen	65
2.1.10.4	Kristallstruktur von Polymeren	68
2.1.10.5	Modifizierung von Polymeren	74
2.1.11	Realstruktur	79
2.1.11.1	Nulldimensionale Gitterstörungen	79
2.1.11.2	Eindimensionale Gitterstörungen	82
2.1.11.3	Zweidimensionale Gitterstörungen	92
2.1.11.3.1	Stapelfehler	92
2.1.11.3.2	Antiphasengrenzen	94
2.1.11.3.3	Grenzflächen	94
2.1.11.3.4	Grenzflächen in nanokristallinen Materialien	101
2.1.11.4	Dreidimensionale Gitterstörungen und Defektwechselwirkungen	104
2.2	Zustand unterkühlter Schmelzen und Glaszustand	107
2.2.1	Charakteristik des Zustandes unterkühlter Schmelzen und des Glaszustandes	107
2.2.2	Strukturmodelle silicatischer Gläser	108
2.2.3	Struktur amorpher Polymere	113
2.2.4	Strukturmodelle amorpher Metalle	115
	Literaturhinweise	116
3	Übergänge in den festen Zustand	119
3.1	Übergang vom flüssigen in den kristallinen Zustand	123
3.1.1	Keimbildung und -wachstum bei Metall- und Ionenkristallen	125
3.1.1.1	Erstarrung von Schmelzen	131
3.1.1.2	Kristallisation aus Lösungsmitteln	134
3.1.1.3	Kristallisation von unterkühlten Glasschmelzen (Entglasung)	139
3.1.2	Kristallisation von Polymeren	140
3.1.2.1	Einfluss der Molekülstruktur auf die Kristallisation	141
3.1.2.2	Keimbildung und Kristallwachstum	141
3.1.3	Abscheidung aus kolloidalen Lösungen	146
3.2	Übergang in den Zustand der unterkühlten Schmelze und in den Glaszustand	148
3.2.1	Änderung der Viskosität bei der amorphen Erstarrung	153
3.2.2	Phasentrennung im Zustand der unterkühlten Schmelze	155
3.2.3	Amorphe Erstarrung von Metallen und Legierungen	157
3.3	Übergang aus dem gasförmigen in den kristallinen Zustand	161
	Literaturhinweise	165
4	Phasenumwandlungen im festen Zustand	167
4.1	Umwandlungen mit Änderung der Struktur	171
4.1.1	Allotrope Umwandlungen des SiO ₂	171
4.1.2	Die γ - α -Umwandlung des Eisens	175
4.1.3	Martensitische Umwandlungen	176

- 4.1.4 Massivumwandlung 178
- 4.1.5 Umwandlungsbesonderheiten bei Polymeren 179
- 4.2 Umwandlungen mit Änderung der Konzentration 180
- 4.3 Umwandlungen mit Änderung der Konzentration und der Struktur 184
 - 4.3.1 Ausscheidungsumwandlung 184
 - 4.3.2 Eutektoider Zerfall 186
- 4.4 Ordnungsumwandlungen 188
- 4.5 Nichtkonventionelle Phasenbildung 191
 - 4.5.1 Metastabile Phasenbildung in dünnen Schichten 192
 - 4.5.2 Mechanisches Legieren von Pulvern 195
 - Literaturhinweise 198

- 5 Zustandsdiagramme 199**
 - 5.1 Thermodynamische Grundlagen 199
 - 5.2 Experimentelle Methoden zur Aufstellung von Zustandsdiagrammen 207
 - 5.3 Grundtypen der Zustandsdiagramme von Zweistoffsystemen 213
 - 5.3.1 Zustandsdiagramm eines Systems mit vollständiger Mischbarkeit der Komponenten im festen und flüssigen Zustand 213
 - 5.3.2 Zustandsdiagramm eines Systems mit vollständiger Mischbarkeit der Komponenten im flüssigen und vollständiger Unmischbarkeit im festen Zustand 215
 - 5.3.3 Zustandsdiagramm von Systemen mit vollständiger Mischbarkeit der Komponenten im flüssigen und teilweiser Mischbarkeit im festen Zustand 218
 - 5.3.4 Zustandsdiagramme von Systemen mit intermetallischen Phasen 221
 - 5.3.5 Weitere Umwandlungen im festen Zustand 222
 - 5.4 Einführung in Mehrstoffsysteme 223
 - 5.5 Realdiagramme 227
 - 5.5.1 Eisen-Kohlenstoff-Diagramm 227
 - 5.5.2 Zustandsdiagramm des Systems Kupfer-Zinn 231
 - 5.5.3 Zustandsdiagramm des Systems SiO_2 - α - Al_2O_3 233
 - 5.5.4 Zustandsdiagramme von Polymermischungen 234
 - 5.6 Ungleichgewichtsdiagramme 236
 - 5.6.1 Ausbildung von Ungleichgewichtsgefügen 236
 - 5.6.2 Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Diagramme 240
 - 5.6.3 Zeit-Temperatur-Auflösungs-Diagramme 243
 - 5.6.4 ZTR-Diagramme bei Kopplung von Umwandlungs- und Umformvorgängen 244
 - Literaturhinweise 248

- 6 Gefüge der Werkstoffe 249**
 - 6.1 Gefüge 250
 - 6.2 Oberfläche 254

- 6.3 Herstellung der Schlißfläche 259
- 6.4 Entwicklung des Gefüges 262
 - 6.4.1 Ätzen in Lösungen 263
 - 6.4.2 Gefügeentwicklung bei hohen Temperaturen 269
 - 6.4.3 Entwicklung des Gefüges durch Ionenätzen 271
- 6.5 Sichtbarmachen des Gefüges 272
 - 6.5.1 Lichtmikroskopische Gefügebetrachtung 272
 - 6.5.2 Gefügebetrachtung mithilfe des akustischen Reflexionsrastermikroskopes 275
 - 6.5.3 Elektronenmikroskopische Gefügebetrachtung 275
 - 6.5.4 Untersuchung mit der Elektronenstrahlmikrosonde (ESMA) 276
- 6.6 Quantitative Gefügeanalyse 278
 - 6.6.1 Flächenanalyse 279
 - 6.6.2 Linearanalyse 280
 - 6.6.3 Charakterisierung der Form und Orientierung der Gefügebestandteile 282
 - 6.6.4 Punktanalyse 284
- 6.7 Gefüge-Eigenschafts-Beziehungen 284
 - 6.7.1 Einphasige Gefüge 287
 - 6.7.2 Mehrphasige Gefüge 288
 - Literaturhinweise 295
- 7 Thermisch aktivierte Vorgänge 297**
 - 7.1 Diffusion 299
 - 7.1.1 Platzwechselmechanismen 301
 - 7.1.2 Diffusionsgesetze 306
 - 7.1.3 Bildung von Diffusionsschichten 310
 - 7.1.4 Diffusionsgesteuerte Vorgänge 312
 - 7.1.4.1 Diffusionskriechen 312
 - 7.1.4.2 Versetzungskriechen 313
 - 7.1.4.3 Sintern 315
 - 7.2 Kristallerholung und Rekristallisation 319
 - 7.2.1 Kristallerholung 319
 - 7.2.2 Rekristallisation 321
 - 7.2.3 Kornwachstum 326
 - 7.2.4 Rekristallisationstexturen 333
 - Literaturhinweise 333
- 8 Korrosion 335**
 - 8.1 Korrosion der Metalle in wässrigen Medien 341
 - 8.1.1 Grundlagen der elektrochemischen Korrosion 342
 - 8.1.1.1 Elektrochemische Spannungsreihe und Korrosionsvorgänge 345
 - 8.1.1.2 Geschwindigkeit elektrochemischer Reaktionen 349
 - 8.1.2 Gleichförmige Korrosion 351
 - 8.1.3 Passivität und Inhibition 355

- 8.1.4 Korrosionselemente 360
- 8.1.5 Lochkorrosion 364
- 8.1.6 Selektive und interkristalline Korrosion 367
- 8.1.7 Spannungsrisskorrosion 369
- 8.1.8 Schwingungsrisskorrosion 371
- 8.2 Korrosion anorganisch-nichtmetallischer Werkstoffe in wässrigen Medien 372
- 8.3 Korrosion von Polymeren in flüssigen Medien 375
- 8.3.1 Begrenzte und unbegrenzte Quellung 377
- 8.3.2 Schädigung durch chemische Reaktionen 379
- 8.3.3 Spannungsrisskorrosion von Polymeren 380
- 8.4 Korrosion in Schmelzen 381
- 8.4.1 Korrosion von Metallen in durch Ablagerungen gebildeten Schmelzen 382
- 8.4.2 Korrosion feuerfester Baustoffe in Schmelzen 384
- 8.5 Korrosion der Metalle in heißen Gasen 385
- 8.5.1 Oxidation (Zundern) von Eisen 386
- 8.5.2 Oxidation von Legierungen 389
- 8.5.3 Schädigung von Stahl durch Druckwasserstoff 390
- 8.5.4 Aufkohlung und Metal Dusting 390
- 8.6 Korrosion feuerfester Werkstoffe in heißen Gasen 391
- 8.7 Korrosionsschutz 392
- 8.7.1 Passiver Korrosionsschutz 393
- 8.7.2 Aktiver Korrosionsschutz 394
- Literaturhinweise 395

- 9 Mechanische Erscheinungen 397**
- 9.1 Reversible Verformung 398
- 9.1.1 Linearelastische Verformung 399
- 9.1.2 Energie- und entropieelastische Verformung 401
- 9.1.3 Anelastische Verformung 402
- 9.1.4 Pseudoelastische Verformung 403
- 9.2 Plastische Verformung 404
- 9.2.1 Geometrie der plastischen Verformung von Einkristallen 405
- 9.2.2 Mechanismus der plastischen Verformung 408
- 9.2.2.1 Theoretische Festigkeit 408
- 9.2.2.2 Entstehen und Wechselwirkung von Versetzungen 410
- 9.2.2.3 Wechselwirkung zwischen Versetzungen und Fremdatomen 412
- 9.2.2.4 Wechselwirkung zwischen Versetzungen und Teilchen 414
- 9.2.3 Plastische Verformung polykristalliner Werkstoffe (Vielkristallplastizität) 418
- 9.2.3.1 Spannungs-Dehnungs-Diagramm 418
- 9.2.3.2 Orientierungseinfluss 419
- 9.2.3.3 Korngrenzeneinfluss 420
- 9.2.3.4 Streckgrenzenerscheinung 422

9.2.3.5	Verformungsgefüge und Textur	424
9.2.4	Plastische Wechselverformung	425
9.2.5	Besondere Erscheinungen der Plastizität	427
9.2.5.1	Superplastizität	427
9.2.5.2	Umwandlungsplastizität	429
9.3	Viskose und viskoelastische Verformung	430
9.4	Kriechen	433
9.5	Bruch	435
9.5.1	Makroskopische und mikroskopische Bruchmerkmale	436
9.5.2	Rissbildung	437
9.5.3	Rissausbreitung	441
9.5.4	Bruchmechanik	444
9.5.4.1	Linearelastische Bruchmechanik	444
9.5.4.2	Fließbruchmechanik	447
9.6	Eigenspannungen	449
9.7	Festigkeitssteigerung und Schadenstoleranz	452
9.7.1	Kombinierte Mechanismen zur Festigkeitssteigerung metallischer Werkstoffe	452
9.7.2	Festigkeitssteigerung durch Druckeigenspannungen in der Randschicht	454
9.7.3	Festigkeitssteigerung durch Verstrecken und Vernetzen	455
9.7.4	Festigkeitssteigerung durch Faserverstärkung	457
9.7.5	Steigerung von Festigkeit und Bruchzähigkeit durch Energiedissipation	462
9.8	Härte und Verschleiß	464
	Literaturhinweise	467
10	Physikalische Erscheinungen	469
10.1	Elektrische Leitfähigkeit	469
10.1.1	Elektrische Leitfähigkeit in Metallen	481
10.1.2	Elektrische Leitfähigkeit in Halbleitern	486
10.1.2.1	Eigenhalbleitung	487
10.1.2.2	Störstellenhalbleitung	487
10.1.2.3	Sperrschichthalbleitung	490
10.2	Supraleitung	492
10.2.1	Supraleitung in Metallen und intermetallischen Verbindungen	492
10.2.2	Supraleitende Oxidkeramiken mit hoher Sprungtemperatur	498
10.2.3	Supraleitung in Boriden, Carbiden und Nitriden	502
10.2.4	Supraleitung in Eisenverbindungen	503
10.3	Thermoelektrizität	504
10.4	Wärmeleitfähigkeit	507
10.5	Dielektrizität	510
10.6	Magnetismus	515
10.6.1	Erscheinungsformen des Magnetismus	515
10.6.2	Technische Magnetisierung	520

10.6.3	Weichmagnetisches Verhalten	525
10.6.4	Hartmagnetisches Verhalten	529
10.6.5	Ferrimagnetisches Verhalten	531
10.7	Thermische Ausdehnung	533
10.8	Temperaturunabhängiges elastisches Verhalten	539
10.9	Dämpfung	541
10.10	Wechselwirkung zwischen Strahlung und Festkörpern	545
10.10.1	Wechselwirkung mit energiearmer Strahlung	547
10.10.2	Wechselwirkung mit energiereicher Strahlung	551
10.10.2.1	Elastische Streuung von ionisierenden Strahlen	552
10.10.2.2	Veränderungen in Festkörpern durch Strahlung	556
	Literaturhinweise	562
	Register	565