

William D. Callister, Jr. and David G. Rethwisch

Materialwissenschaften und Werkstofftechnik

Eine Einführung

Übersetzungsherausgeber: Michael Scheffler



**WILEY-
VCH**

WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

Inhaltsverzeichnis

Vorwort XV

Danksagung XXI

Symbolverzeichnis XXIII

- 1 Einführung** 1
 - 1.1 Historische Aspekte 2
 - 1.2 Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 3
 - 1.3 Warum beschäftigen wir uns mit Materialwissenschaft und Werkstofftechnik? 4
 - 1.4 Klassifizierung von Werkstoffen 5
 - 1.5 Hochleistungswerkstoffe/innovative Werkstoffe 10
 - 1.6 Der Bedarf an neuen Werkstoffen 12
 - 1.7 Die Beziehung zwischen Herstellung, Struktur, Eigenschaften und Anwendung 13
 - Zusammenfassung 15
 - Literatur 16
 - Fragen und Aufgaben 16

- 2 Atombau und chemische Bindung** 17
 - 2.1 Einführung 18
 - 2.2 Grundlagen 18
 - 2.3 Elektronen im Atom 19
 - 2.4 Das Periodensystem der Elemente 24
 - 2.5 Bindungskräfte und Energie 25
 - 2.6 Hauptvalenzbindungen 27
 - 2.7 Nebervalenzbindungen, Van-der-Waals-Bindungen 31
 - 2.8 Moleküle 34
 - Zusammenfassung 34
 - Literatur 36
 - Fragen und Aufgaben 37

- 3 Die Struktur kristalliner Festkörper** 39
 - 3.1 Einführung 40
 - 3.2 Grundlagen 40
 - 3.3 Elementarzellen 41
 - 3.4 Kristallstrukturen von Metallen 42
 - 3.5 Berechnung der Dichte 45
 - 3.6 Polymorphie und Allotropie 46
 - 3.7 Kristallsysteme 46
 - 3.8 Punktkoordinaten 49
 - 3.9 Kristallografische Richtungen 51
 - 3.10 Kristallografische Ebenen 56

3.11	Lineare und planare Dichte	61
3.12	Dichtest gepackte Kristallstrukturen	62
3.13	Einkristalle	64
3.14	Polykristalline Werkstoffe	64
3.15	Anisotropie	64
3.16	Die Bestimmung von Kristallstrukturen mit Röntgenstrahlung	66
3.17	Nichtkristalline Festkörper	70
	Zusammenfassung	71
	Literatur	75
	Fragen und Aufgaben	75
4	Fehlstellen in Festkörpern	81
4.1	Einleitung	82
4.2	Leerstellen und Zwischengitteratome	82
4.3	Fremdatome in Feststoffen	84
4.4	Angabe der Zusammensetzung	85
4.5	Versetzungen – Liniendefekte	88
4.6	Flächendefekte	92
4.7	Volumendefekte	95
4.8	Atomschwingungen	95
4.9	Grundlagen der Mikroskopie	95
4.10	Mikroskopische Untersuchungsmethoden	97
4.11	Korngrößenbestimmung	101
	Zusammenfassung	102
	Literatur	105
	Fragen und Aufgaben	106
5	Diffusion	109
5.1	Einführung	110
5.2	Diffusionsmechanismen	111
5.3	Stationäre Diffusion	113
5.4	Nichtstationäre Diffusion	115
5.5	Faktoren, die den Diffusionsprozess beeinflussen	118
5.6	Diffusion in Halbleiterwerkstoffen	123
5.7	Andere Diffusionswege	127
	Zusammenfassung	127
	Literatur	129
	Fragen und Aufgaben	130
6	Mechanische Eigenschaften metallischer Werkstoffe	135
6.1	Einleitung	136
6.2	Spannung und Dehnung	137
6.3	Spannungs-Dehnungs-Verhalten	141
6.4	Anelastizität	143
6.5	Elastische Eigenschaften von Werkstoffen	144
6.6	Verhalten unter Zugbelastung	147
6.7	Wahre Spannung und wahre Dehnung	153
6.8	Elastische Erholung nach plastischer Verformung	155
6.9	Druck-, Scher- und Torsionsverformungen	156
6.10	Härte	156
6.11	Streuung von Werkstoffeigenschaften	162
6.12	Auslegungs- und Sicherheitsaspekte	164
	Zusammenfassung	166
	Literatur	170
	Fragen und Aufgaben	170

7	Versetzungen und Verfestigungsmechanismen	177
7.1	Einleitung	178
7.2	Grundlagen	179
7.3	Eigenschaften von Versetzungen	181
7.4	Gleitsysteme	182
7.5	Gleiten in Einkristallen	184
7.6	Plastische Verformung von polykristallinen Werkstoffen	187
7.7	Verformung durch Zwillingsbildung	188
7.8	Verfestigung durch Verringerung der Korngröße	190
7.9	Mischkristallverfestigung	191
7.10	Kaltverfestigung	193
7.11	Erholung	196
7.12	Rekristallisation	196
7.13	Kornwachstum	200
	Zusammenfassung	202
	Literatur	206
	Fragen und Aufgaben	206
8	Werkstoffversagen	211
8.1	Einführung	212
8.2	Grundlagen	213
8.3	Duktiler Bruch	214
8.4	Sprödbbruch	216
8.5	Grundzüge der Bruchmechanik	218
8.6	Prüfung der Bruchzähigkeit	226
8.7	Zyklische Beanspruchung	231
8.8	Die Wöhler-(S-N-)Kurve	232
8.9	Risseinleitung und -ausbreitung	235
8.10	Ermüdungsbeständigkeit – Einflussfaktoren	237
8.11	Umgebungseinflüsse	240
8.12	Allgemeine Beschreibung des Kriechverhaltens	241
8.13	Auswirkungen von Spannung und Temperatur	242
8.14	Extrapolationsverfahren für Daten zur Beschreibung des Kriechverhaltens	244
8.15	Legierungen für den Einsatz bei hohen Temperaturen	245
	Zusammenfassung	246
	Literatur	250
	Fragen und Aufgaben	251
9	Phasendiagramme	257
9.1	Einleitung	258
9.2	Löslichkeitsgrenze	259
9.3	Phasen	260
9.4	Mikrostruktur	260
9.5	Phasengleichgewicht	260
9.6	Einkomponenten-Phasendiagramme	261
9.7	Binäre isomorphe Systeme	263
9.8	Interpretation von Phasendiagrammen	265
9.9	Entstehung der Mikrostruktur in isomorphen Legierungen	268
9.10	Mechanische Eigenschaften isomorpher Legierungen	272
9.11	Binäre eutektische Systeme	272
9.12	Entstehung der Mikrostruktur in eutektischen Legierungen	278
9.13	Gleichgewichtsdiagramme mit intermediären Phasen oder Verbindungen	284
9.14	Eutektoide und peritektische Reaktionen	286
9.15	Kongruente Phasenumwandlungen	288

9.16	Phasendiagramme für Keramiken, ternäre Phasendiagramme	289
9.17	Die Gibbs'sche Phasenregel	289
9.18	Das Eisen-Kohlenstoff-Phasendiagramm	291
9.19	Entstehung der Mikrostruktur von Stählen	294
9.20	Der Einfluss weiterer Legierungselemente	301
	Zusammenfassung	302
	Literatur	306
	Fragen und Aufgaben	306
10	Phasenübergänge: Bildung von Mikrostrukturen und die Änderung mechanischer Eigenschaften	313
10.1	Einführung	314
10.2	Grundlagen	314
10.3	Kinetik der Phasenumwandlungen	315
10.4	Metastabile Zustände – Gleichgewichtszustände	324
10.5	Isotherme Zeit-Temperatur-Umwandlungsdiagramme (ZTU-Diagramme)	325
10.6	ZTU-Diagramme für kontinuierliche Abkühlung	335
10.7	Mechanische Eigenschaften von Stählen	339
10.8	Anlassgefüge	343
10.9	Überblick über die Phasenumwandlungen und mechanischen Eigenschaften von unlegierten Stählen	346
	Zusammenfassung	349
	Literatur	353
	Fragen und Aufgaben	353
11	Verarbeitung und Verwendung von metallischen Werkstoffen	359
11.1	Einleitung	360
11.2	Eisenwerkstoffe	361
11.3	Nichteisenlegierungen	372
11.4	Formgebung durch Gießverfahren	381
11.5	Formgebung durch Umformverfahren	383
11.6	Weitere Fertigungsmethoden	385
11.7	Glühverfahren	387
11.8	Härten von Stählen	390
11.9	Ausscheidungshärtung	400
	Zusammenfassung	405
	Literatur	410
	Fragen und Aufgaben	411
12	Struktur und Eigenschaften von Keramiken	415
12.1	Einführung	1
12.2	Kristallstrukturen	2
12.3	Silikatkeramiken	425
12.4	Kohlenstoff	429
12.5	Fehlorderungen in Keramiken	432
12.6	Diffusion in ionischen Werkstoffen	436
12.7	Phasendiagramme keramischer Systeme	436
12.8	Sprödbbruch	440
12.9	Spannungs-Dehnungs-Verhalten	444
12.10	Mechanismus der plastischen Verformung	446
12.11	Sonstige mechanische Aspekte	448

- Zusammenfassung 450
- Literatur 453
- Fragen und Aufgaben 453

- 13 Herstellung, Verarbeitung und Verwendung von Keramiken und von Gläsern 559**
- 13.1 Einführung 460
- 13.2 Gläser 460
- 13.3 Glaskeramiken 461
- 13.4 Tonwerkstoffe 462
- 13.5 Feuerfestwerkstoffe 463
- 13.6 Schleifmittel 465
- 13.7 Zemente und Betone 465
- 13.8 Technische Keramiken (Hochleistungskeramiken) 466
- 13.9 Herstellung und Verarbeitung von Gläsern und Glaskeramiken 470
- 13.10 Herstellung und Verarbeitung von Tonprodukten 475
- 13.11 Pulverpressen 479
- 13.12 Foliengießen 481
- 13.13 Sonstiges 482
- Zusammenfassung 482
- Literatur 486
- Fragen und Aufgaben 486

- 14 Polymerstrukturen 489**
- 14.1 Einführung 490
- 14.2 Kohlenwasserstoffe 490
- 14.3 Polymermoleküle 493
- 14.4 Die Chemie der Polymermoleküle 493
- 14.5 Die Molmasse 497
- 14.6 Die Molekülform 499
- 14.7 Die Molekülstruktur 500
- 14.8 Die Molekülkonfiguration 502
- 14.9 Thermoplaste und Duroplaste 505
- 14.10 Copolymere 506
- 14.11 Kristallinität von Polymeren 507
- 14.12 Polymerkristalle 510
- 14.13 Fehlstellen in Polymeren 512
- 14.14 Diffusion in Polymeren 512
- Zusammenfassung 514
- Literatur 518
- Fragen und Aufgaben 518

- 15 Polymere:**
- Eigenschaften, Verarbeitung und Verwendung 523**
- 15.1 Einführung 524
- 15.2 Spannungs-Dehnungs-Verhalten 524
- 15.3 Makroskopische Deformation 526
- 15.4 Viskoelastische Deformation 527
- 15.5 Bruchverhalten von Polymeren 531
- 15.6 Weitere mechanische Eigenschaften 533
- 15.7 Deformation teilkristalliner Polymere 534
- 15.8 Faktoren, die die mechanischen Eigenschaften teilkristalliner Polymere beeinflussen 537
- 15.9 Deformation von Elastomeren 540
- 15.10 Kristallisation 543
- 15.11 Schmelzen 544
- 15.12 Der Glasübergang 544
- 15.13 Schmelz- und Glasübergangstemperatur 545

15.14	Schmelz- und Glasübergangstemperatur beeinflussende Faktoren	546
15.15	Plaste (Plastomere und Duromere)	548
15.16	Elaste (Elastomere)	551
15.17	Fasern	552
15.18	Sonstige Anwendungen	553
15.19	Besondere Polymerwerkstoffe	554
15.20	Polymerisation	558
15.21	Polymeradditive	561
15.22	Formgebungstechnologien für Polymere	562
15.23	Verarbeitung von Elastomeren	565
15.24	Herstellung von Fasern und Folien	565
	Zusammenfassung	567
	Literatur	572
	Fragen und Aufgaben	572
16	Verbundwerkstoffe	577
16.1	Einführung	578
16.2	Verbundwerkstoffe mit großen Partikeln (Teilchenverbunde)	580
16.3	Dispersionsverstärkte Komposite	584
16.4	Einfluss der Faserlänge	585
16.5	Einfluss der Orientierung und des Volumenanteils der Fasern	586
16.6	Fasern – Die Verstärkungsphase	594
16.7	Die Matrixphase	594
16.8	Verbundwerkstoffe mit Polymermatrix	595
16.9	Metallmatrix-Verbundwerkstoffe	600
16.10	Verbundwerkstoffe mit keramischer Matrix	601
16.11	Kohlenstoff-Kohlenstoff-Verbundwerkstoffe	603
16.12	Hybride Verbundwerkstoffe	604
16.13	Verarbeitung von faserverstärkten Verbundwerkstoffen	604
16.14	Schichtverbundwerkstoffe	607
16.15	Sandwich-Strukturen	607
	Zusammenfassung	610
	Literatur	613
	Fragen und Aufgaben	613
17	Korrosion und Degradation von Werkstoffen	619
17.1	Einführung	620
17.2	Elektrochemische Betrachtungen	621
17.3	Korrosionsgeschwindigkeiten	628
17.4	Vorhersage von Korrosionsraten	629
17.5	Passivierung	635
17.6	Umgebungseinflüsse	637
17.7	Formen der Korrosion	637
17.8	Korrosive Umgebungen	645
17.9	Korrosionsschutz	645
17.10	Oxidation	647
17.11	Quellen und Auflösen von Polymeren	651
17.12	Bindungsbruch	652
17.13	Verwitterung	654
	Zusammenfassung	654
	Literatur	658
	Fragen und Aufgaben	658
18	Elektrische Eigenschaften	663
18.1	Einführung	664
18.2	Das Ohm'sche Gesetz	664

- 18.3 Die elektrische Leitfähigkeit 665
- 18.4 Elektronen- und Ionenleitung 666
- 18.5 Die Bänderstruktur der Energieniveaus in Festkörpern 666
- 18.6 Leitungsvorgänge aus der Sicht des Bändermodells und der Atombindung 668
- 18.7 Elektronenmobilität 670
- 18.8 Der spezifische Widerstand von Metallen 671
- 18.9 Elektrische Eigenschaften von Legierungen für den industriellen Einsatz 674
- 18.10 Eigenhalbleitung 676
- 18.11 Störstellenhalbleitung 678
- 18.12 Temperaturabhängigkeit der Ladungsträgerdichte 682
- 18.13 Beeinflussung der Ladungsträgermobilität 684
- 18.14 Der Hall-Effekt 687
- 18.15 Halbleiterbauelemente 689
- 18.16 Leitungsvorgänge in ionischen Werkstoffen 696
- 18.17 Elektrische Eigenschaften von Polymeren 697
- 18.18 Die Kapazität 698
- 18.19 Feldvektoren und Polarisation 699
- 18.20 Arten der Polarisation 703
- 18.21 Die Frequenzabhängigkeit der Dielektrizitätszahl 704
- 18.22 Dielektrische Festigkeit 705
- 18.23 Dielektrische Werkstoffe 705
- 18.24 Ferroelektrizität 706
- 18.25 Piezoelektrizität 707
 - Zusammenfassung 708
 - Literatur 714
 - Fragen und Aufgaben 714

- 19 Thermische Eigenschaften 721**
 - 19.1 Einführung 722
 - 19.2 Wärmekapazität 722
 - 19.3 Thermische Ausdehnung 725
 - 19.4 Wärmeleitfähigkeit 728
 - 19.5 Thermische Spannungen 731
 - Zusammenfassung 733
 - Literatur 735
 - Fragen und Aufgaben 736

- 20 Magnetische Eigenschaften 739**
 - 20.1 Einführung 740
 - 20.2 Grundlagen des Magnetismus 740
 - 20.3 Diamagnetismus und Paramagnetismus 744
 - 20.4 Ferromagnetismus 746
 - 20.5 Antiferromagnetismus und Ferrimagnetismus 747
 - 20.6 Einfluss der Temperatur auf das magnetische Verhalten 750
 - 20.7 Domänen und Hysterese 751
 - 20.8 Magnetische Anisotropie 755
 - 20.9 Weichmagnetische Werkstoffe 756
 - 20.10 Hartmagnetische Werkstoffe 759
 - 20.11 Magnetspeicher 762
 - 20.12 Supraleitung 765
 - Zusammenfassung 768
 - Literatur 771
 - Fragen und Aufgaben 771

- 21 Optische Eigenschaften 775**
 - 21.1 Einführung 776
 - 21.2 Elektromagnetische Strahlung 776

21.3	Die Wechselwirkung von Licht mit Festkörpern	778
21.4	Wechselwirkungen mit Atomen und Elektronen	779
21.5	Brechung	781
21.6	Reflexion	783
21.7	Absorption	783
21.8	Transmission	786
21.9	Farbe	787
21.10	Opazität und Transluzenz von Isolatoren	788
21.11	Lumineszenz	789
21.12	Fotoleitung	792
21.13	Laser	792
21.14	Lichtwellenleiter in der Kommunikationstechnik	796
	Zusammenfassung	799
	Literatur	803
	Fragen und Aufgaben	803
22	Ökonomische, ökologische- und gesellschaftliche Aspekte von Materialwissenschaft und Werkstofftechnik	
22.1	Einführung	808
22.2	Bauteilauslegung	809
22.3	Werkstoffe	809
22.4	Herstellungsverfahren	809
22.5	Überlegungen zum Recycling in Materialwissenschaft und Werkstofftechnik	813
	Zusammenfassung	819
	Literatur	820
	Fragen und Aufgaben	820
	Anhang A	821
	Anhang B	823
	Anhang C	847
	Anhang D	851
	Glossar	853
	Lösungsteil	867
	Register	873