

# Inhaltsverzeichnis

**Vorwort** XV

**Danksagung** XXI

**Symbolverzeichnis** XXIII

|          |   |    |
|----------|---|----|
| <b>1</b> | <b>Einführung</b>   | 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 |
| <b>2</b> | <b>Atombau und chemische Bindung</b>                                      | 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,<br>Van-der-Waals-Bindungen                          | 31 |
| 2.8      | Moleküle  | 34 |
|          | Zusammenfassung   | 34 |
|          | Literatur   | 36 |
|          | Fragen und Aufgaben   | 37 |
| <b>3</b> | <b>Die Struktur kristalliner Festkörper</b>                               | 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 |

*Materialwissenschaften und Werkstofftechnik*, 1. Auflage, William D. Callister  
© 2013 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Published 2013 by Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 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         |
| <b>4</b> | <b>Fehlstellen in Festkörpern</b>                          | <b>81</b>  |
| 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        |
| <b>5</b> | <b>Diffusion</b>   | <b>109</b> |
| 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        |
| <b>6</b> | <b>Mechanische Eigenschaften metallischer Werkstoffe</b>   | <b>135</b> |
| 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        |

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| <b>7</b> | <b>Versetzungen und Verfestigungsmechanismen</b>                           | 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 |
| <b>8</b> | <b>Werkstoffversagen</b>   | 211 |
| 8.1      | Einführung   | 212 |
| 8.2      | Grundlagen   | 213 |
| 8.3      | Duktiler Bruch   | 214 |
| 8.4      | Sprödbruch   | 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<br>zur Beschreibung des Kriechverhaltens | 244 |
| 8.15     | Legierungen für den Einsatz bei hohen<br>Temperaturen                      | 245 |
|          | Zusammenfassung  | 246 |
|          | Literatur  | 250 |
|          | Fragen und Aufgaben  | 251 |
| <b>9</b> | <b>Phasendiagramme</b>   | 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     | Eutektoidre 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<br>Zusammenfassung                                     | 301        |
|           | Literatur   | 306        |
|           | Fragen und Aufgaben   | 306        |
| <b>10</b> | <b>Phasenübergänge: Bildung von Mikrostrukturen und die Änderung mechanischer Eigenschaften</b> | <b>313</b> |
| 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        |
| <b>11</b> | <b>Verarbeitung und Verwendung von metallischen Werkstoffen</b>                                 | <b>359</b> |
| 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        |
| <b>12</b> | <b>Struktur und Eigenschaften von Keramiken</b>   | <b>415</b> |
| 12.1      | Einführung  | 1          |
| 12.2      | Kristallstrukturen  | 2          |
| 12.3      | Silikatkeramiken  | 425        |
| 12.4      | Kohlenstoff   | 429        |
| 12.5      | Fehlordnungen in Keramiken  | 432        |
| 12.6      | Diffusion in ionischen Werkstoffen  | 436        |
| 12.7      | Phasendiagramme keramischer Systeme   | 436        |
| 12.8      | Sprödbruch  | 440        |
| 12.9      | Spannungs-Dehnungs-Verhalten  | 444        |
| 12.10     | Mechanismus der plastischen Verformung  | 446        |
| 12.11     | Sonstige mechanische Aspekte  | 448        |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 13    | <b>Herstellung, Verarbeitung und Verwendung von Keramiken und von Gläsern</b>       | 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    | <b>Polymerstrukturen</b>  | 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    | <b>Polymere:</b>  |     |
|       | <b>Eigenschaften, Verarbeitung und Verwendung</b>                                   | 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 |
| <b>16</b> | <b>Verbundwerkstoffe</b>                                     | 577 |
| 16.1      | Einführung   | 578 |
| 16.2      | Verbundwerkstoffe mit großen Partikeln<br>(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 |
| <b>17</b> | <b>Korrosion und Degradation von Werkstoffen</b>             | 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      | Korrasive 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 |
| <b>18</b> | <b>Elektrische Eigenschaften</b>                             | 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        |
| <b>19</b> | <b>Thermische Eigenschaften</b>   | <b>721</b> |
| 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        |
| <b>20</b> | <b>Magnetische Eigenschaften</b>  | <b>739</b> |
| 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        |
| <b>21</b> | <b>Optische Eigenschaften</b>   | <b>775</b> |
| 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 |
| <b>22</b> | <b>Ökonomische, ökologische- und gesellschaftliche Aspekte von Materialwissenschaft und Werkstofftechnik</b> |     |
| 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 |
|           | <b>Anhang A</b>  | 821 |
|           | <b>Anhang B</b>  | 823 |
|           | <b>Anhang C</b>  | 847 |
|           | <b>Anhang D</b>  | 851 |
|           | <b>Glossar</b>   | 853 |
|           | <b>Lösungsteil</b>   | 867 |
|           | <b>Register</b>  | 873 |