

# Inhaltsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| Vorwort . . . . .   | XI        |
| <b>1 Vorbemerkungen</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2 Bindung im Festkörper</b>                                    | <b>5</b>  |
| 2.1 Bindungstypen . . . . .                                       | 6         |
| 2.1.1 Bindungsenergie . . . . .                                   | 8         |
| 2.1.2 Abstoßung . . . . .   | 9         |
| 2.2 Van-der-Waals-Bindung . . . . .                               | 10        |
| 2.2.1 Van-der-Waals-Kräfte . . . . .                              | 10        |
| 2.2.2 Lennard-Jones-Potential . . . . .                           | 11        |
| 2.2.3 Bindungsenergie von Edelgaskristallen . . . . .             | 12        |
| 2.3 Ionenbindung . . . . .  | 14        |
| 2.3.1 Abschätzung und Messung der Bindungsenergie . . . . .       | 14        |
| 2.3.2 Bindungsenergie von Ionenkristallen . . . . .               | 16        |
| 2.4 Kovalente Bindung . . . . .                                   | 18        |
| 2.5 Metallische Bindung . . . . .                                 | 26        |
| 2.6 Wasserstoffbrückenbindung . . . . .                           | 30        |
| 2.7 Aufgaben . . . . .  | 31        |
| <b>3 Struktur der Festkörper</b>                                  | <b>33</b> |
| 3.1 Herstellung von Kristallen und amorphen Festkörpern . . . . . | 34        |
| 3.1.1 Einkristallherstellung . . . . .                            | 34        |
| 3.1.2 Legierungen . . . . .                                       | 36        |
| 3.1.3 Glasherstellung . . . . .                                   | 43        |
| 3.2 Ordnung und Unordnung . . . . .                               | 45        |
| 3.3 Struktur der Kristalle . . . . .                              | 48        |
| 3.3.1 Translationsgitter und Kristallsysteme . . . . .            | 48        |
| 3.3.2 Cluster und Quasikristalle . . . . .                        | 54        |
| 3.3.3 Notation und Einfluss der Basis . . . . .                   | 58        |
| 3.3.4 Einfache Kristallgitter . . . . .                           | 61        |
| 3.3.5 Wigner-Seitz-Zelle . . . . .                                | 66        |
| 3.3.6 Festkörperoberflächen . . . . .                             | 67        |
| 3.3.7 Kohlenstoff-Nanoröhren . . . . .                            | 69        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 3.4      | Struktur amorpher Festkörper . . . . .                  | 70         |
| 3.4.1    | Paarverteilungsfunktion . . . . .                       | 71         |
| 3.5      | Aufgaben . . . . .                                      | 74         |
| <b>4</b> | <b>Strukturbestimmung</b> . . . . .                     | <b>77</b>  |
| 4.1      | Allgemeine Bemerkungen zur Strukturbestimmung . . . . . | 78         |
| 4.2      | Elementare Streutheorie . . . . .                       | 81         |
| 4.2.1    | Streuamplitude . . . . .                                | 81         |
| 4.3      | Fourier-Entwicklung von Punktgittern . . . . .          | 83         |
| 4.3.1    | Reziprokes Gitter . . . . .                             | 84         |
| 4.3.2    | Brillouin-Zone . . . . .                                | 86         |
| 4.3.3    | Millersche Indizes . . . . .                            | 89         |
| 4.4      | Streuung an Kristallen . . . . .                        | 92         |
| 4.4.1    | Ewald-Kugel und Bragg-Bedingung . . . . .               | 94         |
| 4.4.2    | Strukturfaktor . . . . .                                | 96         |
| 4.4.3    | Atom-Strukturfaktor . . . . .                           | 100        |
| 4.4.4    | Streuung an Oberflächen oder dünnen Schichten . . . . . | 103        |
| 4.4.5    | Phasenproblem bei Streuexperimenten . . . . .           | 104        |
| 4.4.6    | Debye-Waller-Faktor . . . . .                           | 106        |
| 4.5      | Streuung an amorphen Substanzen . . . . .               | 107        |
| 4.6      | Experimentelle Methoden . . . . .                       | 113        |
| 4.6.1    | Messverfahren . . . . .                                 | 115        |
| 4.6.2    | Messungen an Oberflächen und dünnen Filmen . . . . .    | 119        |
| 4.7      | Aufgaben . . . . .                                      | 122        |
| <b>5</b> | <b>Strukturelle Defekte</b> . . . . .                   | <b>125</b> |
| 5.1      | Punktdefekte . . . . .                                  | 126        |
| 5.1.1    | Leerstellen . . . . .                                   | 127        |
| 5.1.2    | Farbzentren . . . . .                                   | 131        |
| 5.1.3    | Zwischengitteratome . . . . .                           | 134        |
| 5.1.4    | Fremdatome . . . . .                                    | 135        |
| 5.1.5    | Atomarer Transport . . . . .                            | 136        |
| 5.2      | Ausgedehnte Defekte . . . . .                           | 142        |
| 5.2.1    | Mechanische Festigkeit . . . . .                        | 142        |
| 5.2.2    | Versetzungen . . . . .                                  | 145        |
| 5.2.3    | Korngrenzen . . . . .                                   | 153        |
| 5.3      | Defekte in amorphen Materialien . . . . .               | 155        |
| 5.4      | Ordnungs-Unordnungs-Übergang . . . . .                  | 158        |
| 5.5      | Aufgaben . . . . .                                      | 161        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>6</b> | <b>Gitterdynamik</b>  | <b>163</b> |
| 6.1      | Elastische Eigenschaften . . . . .                                  | 164        |
| 6.1.1    | Mechanische Spannung und Verformung . . . . .                       | 164        |
| 6.1.2    | Elastische Konstanten . . . . .                                     | 167        |
| 6.1.3    | Schallwellen . . . . .  | 168        |
| 6.2      | Gitterschwingungen . . . . .  | 174        |
| 6.2.1    | Gitter mit einatomiger Basis . . . . .                              | 175        |
| 6.2.2    | Gitter mit mehratomiger Basis . . . . .                             | 180        |
| 6.2.3    | Bewegungsgleichung der Gitteratome . . . . .                        | 185        |
| 6.3      | Experimentelle Bestimmung von Dispersionskurven . . . . .           | 188        |
| 6.3.1    | Dynamische Streuung, Quantisierung der Gitterschwingungen . . . . . | 188        |
| 6.3.2    | Kohärente inelastische Neutronenstreuung . . . . .                  | 192        |
| 6.3.3    | Debye-Waller-Faktor . . . . .                                       | 195        |
| 6.3.4    | Experimentell ermittelte Dispersionskurven . . . . .                | 195        |
| 6.3.5    | Lichtstreuung . . . . .   | 199        |
| 6.4      | Spezifische Wärmekapazität . . . . .                                | 204        |
| 6.4.1    | Zustandsdichte der Phononen . . . . .                               | 205        |
| 6.4.2    | Spezifische Wärme in der Debye-Näherung . . . . .                   | 211        |
| 6.4.3    | Spezifische Wärme niederdimensionaler Systeme . . . . .             | 216        |
| 6.4.4    | Nullpunktsenergie, Zahl der angeregten Phononen . . . . .           | 217        |
| 6.5      | Schwingungen in amorphen Festkörpern . . . . .                      | 219        |
| 6.5.1    | Wärmekapazität von Gläsern bei sehr tiefen Temperaturen . . . . .   | 221        |
| 6.6      | Aufgaben . . . . .  | 226        |
| <b>7</b> | <b>Anharmonische Gittereigenschaften</b>                            | <b>229</b> |
| 7.1      | Zustandsgleichung und thermische Ausdehnung . . . . .               | 230        |
| 7.2      | Phonon-Phonon-Wechselwirkung . . . . .                              | 236        |
| 7.2.1    | Drei-Phononen-Prozess . . . . .                                     | 236        |
| 7.2.2    | Ultraschalldämpfung in Kristallen . . . . .                         | 237        |
| 7.2.3    | Spontaner Phononenzerfall . . . . .                                 | 242        |
| 7.2.4    | Ultraschalldämpfung in amorphen Festkörpern . . . . .               | 243        |
| 7.3      | Wärmetransport in dielektrischen Kristallen . . . . .               | 246        |
| 7.3.1    | Ballistische Ausbreitung von Phononen . . . . .                     | 247        |
| 7.3.2    | Wärmeleitung . . . . .  | 248        |
| 7.3.3    | Phonon-Phonon-Stöße . . . . .                                       | 250        |
| 7.3.4    | Streuung an Defekten . . . . .                                      | 253        |
| 7.3.5    | Wärmetransport in eindimensionalen Proben . . . . .                 | 255        |
| 7.4      | Wärmeleitfähigkeit amorpher Festkörper . . . . .                    | 258        |
| 7.5      | Aufgaben . . . . .  | 261        |

|  |            |
|--|------------|
| <b>8 Elektronen im Festkörper</b>  | <b>263</b> |
| 8.1 Freies Elektronengas . . . . .   | 264        |
| 8.1.1 Zustandsdichte . . . . .   | 266        |
| 8.1.2 Fermi-Energie, Fermi-Kugel . . . . .                                       | 271        |
| 8.2 Spezifische Wärme . . . . .  | 275        |
| 8.3 Kollektive Phänomene im Elektronengas . . . . .                              | 279        |
| 8.3.1 Abgeschirmtes Coulomb-Potential . . . . .                                  | 279        |
| 8.3.2 Metall-Isolator-Übergang . . . . .   | 281        |
| 8.4 Elektronen im periodischen Potential . . . . .                               | 283        |
| 8.4.1 Bloch-Funktion . . . . .   | 284        |
| 8.4.2 Näherung für quasi-freie Elektronen . . . . .                              | 288        |
| 8.4.3 „Stark gebundene“ Elektronen . . . . .                                     | 295        |
| 8.5 Energiebänder . . . . .  | 302        |
| 8.5.1 Metalle und Isolatoren . . . . .   | 302        |
| 8.5.2 Brillouin-Zonen und Fermi-Flächen . . . . .                                | 304        |
| 8.5.3 Zustandsdichte . . . . .   | 308        |
| 8.5.4 „Zweidimensionale“ hexagonale Festkörper: Graphen und Nanoröhren . . . . . | 311        |
| 8.6 Aufgaben . . . . .   | 316        |
| <br>   |            |
| <b>9 Elektronische Transporteigenschaften</b>                                    | <b>319</b> |
| 9.1 Bewegungsgleichung und effektive Masse . . . . .                             | 320        |
| 9.1.1 Elektronen als Wellenpakete . . . . .                                      | 320        |
| 9.1.2 Ladungstransport in Bändern . . . . .                                      | 325        |
| 9.1.3 Elektronen und Löcher . . . . .  | 328        |
| 9.2 Ladungstransport . . . . .   | 330        |
| 9.2.1 Drude-Modell . . . . .   | 330        |
| 9.2.2 Sommerfeldsche Theorie . . . . .   | 331        |
| 9.2.3 Boltzmann-Gleichung . . . . .  | 332        |
| 9.2.4 Elektrischer Ladungstransport . . . . .                                    | 334        |
| 9.2.5 Elektronstreuung . . . . .   | 337        |
| 9.2.6 Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit . . . . .            | 341        |
| 9.2.7 Eindimensionale Leiter . . . . .   | 345        |
| 9.2.8 Quantenpunkte . . . . .  | 348        |
| 9.2.9 Luttinger-Flüssigkeit . . . . .  | 352        |
| 9.2.10 Thermische Leitfähigkeit . . . . .  | 355        |
| 9.2.11 Wiedemann-Franz-Gesetz . . . . .  | 357        |
| 9.2.12 Fermi-Funktion im stationären Gleichgewicht . . . . .                     | 358        |
| 9.3 Elektronen im Magnetfeld . . . . .   | 360        |
| 9.3.1 Zyklotronresonanz . . . . .  | 360        |
| 9.3.2 Landau-Niveaus . . . . .   | 365        |
| 9.3.3 Zustandsdichte im Magnetfeld . . . . .                                     | 370        |

---

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 9.3.4     | De-Haas-van-Alphén-Effekt . . . . .                                | 373        |
| 9.3.5     | Hall-Effekt . . . . .  | 375        |
| 9.3.6     | Quanten-Hall-Effekt . . . . .                                      | 378        |
| 9.3.7     | Quanten-Hall-Effekt in Graphen . . . . .                           | 385        |
| 9.4       | Aufgaben . . . . .   | 386        |
| <b>10</b> | <b>Halbleiter</b>  | <b>389</b> |
| 10.1      | Intrinsische kristalline Halbleiter . . . . .                      | 390        |
| 10.1.1    | Bandlücke und optische Absorption . . . . .                        | 390        |
| 10.1.2    | Effektive Masse von Elektronen und Löchern . . . . .               | 394        |
| 10.1.3    | Ladungsträgerdichte . . . . .                                      | 397        |
| 10.2      | Dotierte kristalline Halbleiter . . . . .                          | 402        |
| 10.2.1    | Dotierung . . . . .  | 402        |
| 10.2.2    | Ladungsträgerdichte und Fermi-Niveau . . . . .                     | 406        |
| 10.2.3    | Beweglichkeit und elektrische Leitfähigkeit . . . . .              | 413        |
| 10.3      | Amorphe Halbleiter . . . . .                                       | 416        |
| 10.3.1    | Elektrische Leitfähigkeit . . . . .                                | 418        |
| 10.3.2    | Defektzustände . . . . .   | 421        |
| 10.4      | Inhomogene Halbleiter . . . . .                                    | 426        |
| 10.4.1    | p-n-Übergang . . . . .   | 426        |
| 10.4.2    | Metall/Halbleiter-Kontakt . . . . .                                | 435        |
| 10.4.3    | Halbleiter-Heterostrukturen und Übergitter . . . . .               | 437        |
| 10.5      | Bauelemente . . . . .  | 442        |
| 10.5.1    | Bauelemente basierend auf dem p-n-Übergang . . . . .               | 442        |
| 10.5.2    | Transistoren . . . . .   | 445        |
| 10.5.3    | Halbleiterlaser . . . . .  | 449        |
| 10.6      | Aufgaben . . . . .   | 451        |
| <b>11</b> | <b>Supraleitung</b>  | <b>453</b> |
| 11.1      | Phänomenologische Beschreibung . . . . .                           | 454        |
| 11.1.1    | Meißner-Effekt und London-Gleichungen . . . . .                    | 456        |
| 11.1.2    | Kritisches Magnetfeld und thermodynamische Eigenschaften . . . . . | 462        |
| 11.2      | Mikroskopische Beschreibung . . . . .                              | 466        |
| 11.2.1    | Cooper-Paare . . . . .   | 466        |
| 11.2.2    | BCS-Grundzustand . . . . .   | 472        |
| 11.2.3    | BCS-Zustand bei endlicher Temperatur . . . . .                     | 477        |
| 11.2.4    | Nachweis der Energielücke . . . . .                                | 478        |
| 11.2.5    | Kritischer Strom und kritisches Magnetfeld . . . . .               | 483        |
| 11.3      | Makroskopische Wellenfunktion . . . . .                            | 486        |
| 11.3.1    | Flussquantisierung . . . . .                                       | 487        |
| 11.3.2    | Josephson-Effekt . . . . .   | 489        |

|  |            |
|--|------------|
| 11.4 Ginzburg-Landau-Theorie und Supraleiter 2. Art . . . . .              | 495        |
| 11.4.1 Ginzburg-Landau-Theorie . . . . .                                   | 495        |
| 11.4.2 Supraleiter 2. Art und Grenzflächenenergie . . . . .                | 498        |
| 11.4.3 Hochtemperatur-Supraleiter . . . . .                                | 503        |
| 11.5 Aufgaben . . . . .  | 509        |
| <b>12 Magnetismus</b>  | <b>511</b> |
| 12.1 Dia- und Paramagnetismus . . . . .                                    | 513        |
| 12.1.1 Diamagnetismus . . . . .  | 513        |
| 12.1.2 Paramagnetismus . . . . .   | 514        |
| 12.2 Ferromagnetismus . . . . .  | 523        |
| 12.2.1 Molekularfeldnäherung . . . . .                                     | 524        |
| 12.2.2 Austauschwechselwirkung zwischen lokalisierten Elektronen . . . . . | 527        |
| 12.2.3 Austauschwechselwirkung im freien Elektronengas . . . . .           | 531        |
| 12.2.4 Band-Ferromagnetismus . . . . .                                     | 532        |
| 12.2.5 Spinwellen . . . . .  | 536        |
| 12.2.6 Thermodynamik der Magnonen . . . . .                                | 538        |
| 12.2.7 Ferromagnetische Domänen . . . . .                                  | 540        |
| 12.3 Ferri- und Antiferromagnetismus . . . . .                             | 541        |
| 12.3.1 Ferrimagnetismus . . . . .  | 541        |
| 12.3.2 Antiferromagnetismus . . . . .                                      | 542        |
| 12.3.3 Riesen-Magnetowiderstand . . . . .                                  | 545        |
| 12.4 Spingläser . . . . .  | 549        |
| 12.5 Aufgaben . . . . .  | 553        |
| <b>13 Dielektrische und optische Eigenschaften</b>                         | <b>555</b> |
| 13.1 Dielektrische Funktion, optische Messungen . . . . .                  | 556        |
| 13.2 Lokales Feld, Clausius-Mossotti-Beziehung . . . . .                   | 559        |
| 13.3 Elektrische Polarisierung von Isolatoren . . . . .                    | 563        |
| 13.3.1 Elektronische Polarisierbarkeit . . . . .                           | 564        |
| 13.3.2 Ionenpolarisation . . . . .   | 567        |
| 13.3.3 Optische Phononen in Ionenkristallen . . . . .                      | 568        |
| 13.3.4 Erzwungene Schwingungen in Ionenkristallen . . . . .                | 571        |
| 13.3.5 Phonon-Polaritonen . . . . .  | 573        |
| 13.3.6 Orientierungspolarisation . . . . .                                 | 577        |
| 13.3.7 Ferroelektrizität . . . . .   | 586        |
| 13.3.8 Exzitonen . . . . .   | 591        |
| 13.4 Optische Eigenschaften freier Ladungsträger . . . . .                 | 594        |
| 13.4.1 Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in Metallen . . . . .        | 595        |
| 13.4.2 Longitudinale Schwingungen des Elektronengases: Plasmonen . . . . . | 599        |
| 13.5 Aufgaben . . . . .  | 603        |
| <b>Index</b>   | <b>605</b> |