

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Über den Autor | XVII |
| Vorwort | XIX |
| Tabellenverzeichnis | XXI |
| 1 Struktur der Kristalle | 1 |
| Periodische Anordnungen von Atomen | 2 |
| Gitter-Translationsvektoren | 4 |
| Basis und Kristallstruktur | 4 |
| Primitive Elementarzelle | 5 |
| Fundamentale Gitterarten | 7 |
| Zweidimensionale Gittertypen | 8 |
| Dreidimensionale Gittertypen | 9 |
| Indizierung von Kristallebenen | 13 |
| Einfache Kristallstrukturen | 15 |
| Natriumchloridstruktur | 15 |
| Cäsiumchloridstruktur | 17 |
| Hexagonal dichteste Kugelpackung (hcp) | 18 |
| Diamantstruktur | 20 |
| Zinkblendestruktur | 21 |
| Direkte Abbildung der atomaren Struktur | 22 |
| Nichtideale Kristallstrukturen | 22 |
| Zufällige Stapelung und Polytypie | 22 |
| Strukturdaten von Kristallen | 23 |
| Zusammenfassung | 23 |
| Aufgaben | 26 |
| 2 Beugung und reziprokes Gitter | 27 |
| Beugung von Wellen am Kristall | 28 |
| Bragg-Bedingung | 28 |
| Amplitude der gestreuten Welle | 31 |
| Fourier-Analyse | 31 |
| Reziproke Gittervektoren | 34 |
| Beugungsbedingungen | 35 |
| Laue-Gleichungen | 38 |

| | |
|--|----------------|
| Brillouin-Zonen | 39 |
| Reziprokes Gitter des einfach kubischen (sc)-Gitters | 41 |
| Reziprokes Gitter des kubisch raumzentrierten (bcc)-Gitters | 42 |
| Reziprokes Gitter des kubisch flächenzentrierten (fcc)-Gitters | 43 |
| Fourier-Analyse der Basis | 45 |
| Strukturfaktor des bcc-Gitters | 47 |
| Strukturfaktor des fcc-Gitters | 48 |
| Atomformfaktor | 49 |
| Zusammenfassung | 50 |
| Aufgaben | 51 |
| 3 Bindungsverhältnisse in Kristallen | 55 |
| Edelgaskristalle | 60 |
| Van-der-Waals-Wechselwirkung | 62 |
| Repulsive Wechselwirkung | 65 |
| Gitterkonstanten im Gleichgewicht | 67 |
| Bindungsenergie | 68 |
| Ionenkristalle | 69 |
| Elektrostatische Energie oder Madelung-Energie | 71 |
| Berechnung der Madelung-Konstanten | 73 |
| Kovalente Kristalle | 76 |
| Metalle | 78 |
| Wasserstoffbrückenbindung | 79 |
| Atomradien | 80 |
| Radien in Ionenkristallen | 82 |
| Beschreibung der elastischen Dehnung | 83 |
| Dilation | 85 |
| Spannungskomponenten | 86 |
| Elastische Konstanten der Nachgiebigkeit und Steifigkeit | 87 |
| Elastische Energiedichte | 87 |
| Steifigkeitskonstanten kubischer Kristalle | 88 |
| Kompressionsmodul und Kompressibilität | 90 |
| Elastische Wellen in kubischen Kristallen | 91 |
| Wellen in [100]-Richtung | 92 |
| Wellen in [110]-Richtung | 93 |
| Zusammenfassung | 95 |
| Aufgaben | 97 |
| 4 Phononen I: Gitterschwingungen | 101 |
| Schwingungen in Kristallen mit einatomiger Basis | 102 |
| Erste Brillouin-Zone | 105 |
| Gruppengeschwindigkeit | 106 |

| | |
|--|------------|
| Langwelliger Grenzfall | 107 |
| Experimentelle Kraftkonstanten | 107 |
| Gitter mit zwei Atomen in der primitiven Basis | 108 |
| Quantisierung elastischer Wellen | 113 |
| Impuls der Phononen | 114 |
| Inelastische Streuung durch Phononen | 114 |
| Zusammenfassung | 116 |
| Aufgaben | 117 |
| 5 Phononen II: Thermische Eigenschaften | 121 |
| Gitterbeitrag zur Wärmekapazität | 122 |
| Planck-Verteilung | 122 |
| Abzählen der Eigenschwingungen | 124 |
| Zustandsdichte im Eindimensionalen | 124 |
| Zustandsdichte im Dreidimensionalen | 127 |
| Zustandsdichte im Debye-Modell | 128 |
| Debyesches T^3 -Gesetz | 130 |
| Einstein-Modell für die Zustandsdichte | 132 |
| Allgemeines Ergebnis für $D(\omega)$ | 134 |
| Anharmonische Wechselwirkungen in Kristallen | 137 |
| Wärmeausdehnung | 137 |
| Wärmeleitfähigkeit | 139 |
| Wärmewiderstand des Phononengases | 140 |
| Umklapp-Prozesse | 143 |
| Kristallfehler | 144 |
| Aufgaben | 146 |
| 6 Fermi-Gas freier Elektronen | 149 |
| Energieniveaus im Eindimensionalen | 151 |
| Einfluss der Temperatur auf die Fermi-Dirac-Verteilung | 153 |
| Freies Elektronengas im Dreidimensionalen | 154 |
| Wärmekapazität des Elektronengases | 158 |
| Experimente zur Wärmekapazität von Metallen | 163 |
| Schwere Fermionen | 165 |
| Elektrische Leitfähigkeit und Ohmsches Gesetz | 166 |
| Experimente zum elektrischen Widerstand von Metallen | 167 |
| Umklapp-Streuung | 170 |
| Bewegung in Magnetfeldern | 172 |
| Hall-Effekt | 173 |
| Thermische Leitfähigkeit von Metallen | 175 |
| Verhältnis von thermischer zu elektrischer Leitfähigkeit | 176 |
| Aufgaben | 177 |

| | |
|---|----------------|
| 7 Energiebänder | 181 |
| Modell des nahezu freien Elektrons | 183 |
| Ursprung der Energielücke | 185 |
| Größe der Energielücke | 187 |
| Bloch-Funktionen | 187 |
| Kronig-Penney-Modell | 188 |
| Wellengleichung eines Elektrons in einem periodischen Potential | 191 |
| Weiterer Beweis für das Blochsche Theorem | 194 |
| Quasiimpuls eines Elektrons | 194 |
| Lösung der Hauptgleichung | 195 |
| Kronig-Penney-Modell im reziproken Raum | 196 |
| Näherung des leeren Gitters | 198 |
| Näherungslösung nahe einer Zonengrenze | 199 |
| Anzahl der Niveaus in einem Band | 202 |
| Metalle und Isolatoren | 203 |
| Zusammenfassung | 204 |
| Aufgaben | 204 |
| 8 Halbleiterkristalle | 207 |
| Bandlücke | 210 |
| Bewegungsgleichungen | 212 |
| Ableitung der Gleichung $\hbar \mathbf{k} = \mathbf{F}$ | 214 |
| Löcher | 215 |
| Effektive Masse | 219 |
| Physikalische Interpretation der effektiven Masse | 220 |
| Effektive Massen in Halbleitern | 222 |
| Silizium und Germanium | 224 |
| Ladungsträgerkonzentration bei Eigenleitung | 228 |
| Beweglichkeit bei Eigenleitung | 231 |
| Störstellenleitung | 232 |
| Thermische Ionisierung von Donatoren und Akzeptoren | 237 |
| Thermoelektrische Effekte in Halbleitern | 238 |
| Halbmetalle | 239 |
| Übergitter | 240 |
| Bloch-Oszillator | 240 |
| Zener-Tunneln | 241 |
| Zusammenfassung | 241 |
| Aufgaben | 242 |

| | |
|--|----------------|
| 9 Fermi-Flächen und Metalle | 245 |
| Reduziertes Zonenschema | 247 |
| Periodisches Zonenschema | 248 |
| Konstruktion von Fermi-Flächen | 250 |
| Quasifreie Elektronen | 252 |
| Elektronenbahnen, Lochbahnen und offene Bahnen | 254 |
| Berechnung von Energiebändern | 256 |
| Methode der starken Kopplung | 256 |
| Wigner-Seitz-Methode | 260 |
| Bindungsenergie | 262 |
| Pseudopotentialmethoden | 264 |
| Experimentelle Methoden zur Untersuchung von Fermi-Flächen | 267 |
| Bahnquantisierung in einem Magnetfeld | 268 |
| De-Haas-van-Alphén-Effekt | 270 |
| Magnetischer Zusammenbruch | 277 |
| Zusammenfassung | 278 |
| Aufgaben | 279 |
| 10 Supraleitung | 283 |
| Experimenteller Überblick | 284 |
| Auftreten der Supraleitung | 287 |
| Zerstörung der Supraleitung durch Magnetfelder | 287 |
| Meißner-Effekt | 288 |
| Wärmekapazität | 291 |
| Energilücke | 293 |
| Verhalten im Mikrowellen- und Infrarotbereich | 294 |
| Isotopeneffekt | 295 |
| Theoretischer Überblick | 296 |
| Thermodynamik des supraleitenden Phasenübergangs | 296 |
| London-Gleichung | 299 |
| Kohärenzlänge | 301 |
| BCS-Theorie der Supraleitung | 304 |
| BCS-Grundzustand | 305 |
| Flussquantisierung in einem supraleitenden Ring | 306 |
| Dauerströme | 309 |
| Supraleiter zweiter Art | 310 |
| Einteilchen-Tunneln | 315 |
| Josephson-Tunneln in Supraleitern | 316 |
| Hochtemperatur-Supraleiter | 322 |
| Zusammenfassung | 322 |
| Aufgaben | 323 |

| | |
|---|----------------|
| 11 Diamagnetismus und Paramagnetismus | 327 |
| Langevin-Gleichung des Diamagnetismus | 329 |
| Quantentheorie des Diamagnetismus mononuklearer Systeme | 331 |
| Paramagnetismus | 331 |
| Quantentheorie des Paramagnetismus | 332 |
| Ionen seltener Erden | 335 |
| Hundsche Regeln | 336 |
| Ionen der Eisengruppe | 338 |
| Kristallfeldaufspaltung | 338 |
| Auslöschung des Bahndrehimpulses | 339 |
| Spektroskopischer Aufspaltungsfaktor | 341 |
| Van Vleckscher temperaturunabhängiger Paramagnetismus | 342 |
| Kühlung durch adiabatische Entmagnetisierung | 343 |
| Kernentmagnetisierung | 346 |
| Paramagnetische Suszeptibilität der Leitungselektronen | 347 |
| Zusammenfassung | 349 |
| Aufgaben | 350 |
| 12 Ferromagnetismus und Antiferromagnetismus | 355 |
| Ferromagnetische Ordnung | 356 |
| Curie-Punkt und Austauschintegral | 356 |
| Temperaturabhängigkeit der Sättigungsmagnetisierung | 359 |
| Sättigungsmagnetisierung am absoluten Nullpunkt | 362 |
| Magnonen | 364 |
| Thermische Anregung von Magnonen | 368 |
| Magnetische Neutronenstreuung | 369 |
| Ferrimagnetische Ordnung | 371 |
| Curie-Temperatur und Suszeptibilität von Ferrimagneten | 373 |
| Antiferromagnetische Ordnung | 374 |
| Suszeptibilität unterhalb der Néel-Temperatur | 378 |
| Antiferromagnetische Magnonen | 379 |
| Ferromagnetische Domänen | 381 |
| Anisotropieenergie | 383 |
| Übergangsbereich zwischen Domänen | 384 |
| Ursprung der Domänen | 386 |
| Koerzitivfeldstärke und Hysterese | 387 |
| Eindomänenpartikel | 389 |
| Geomagnetismus und Biomagnetismus | 390 |
| Magnetkraft-Mikroskopie | 391 |
| Zusammenfassung | 392 |
| Aufgaben | 393 |

| | |
|--|----------------|
| 13 Magnetische Resonanz | 397 |
| Kernspinresonanz | 399 |
| Bewegungsgleichungen | 400 |
| Linienbreite | 406 |
| Linienverschmälerung durch Bewegung | 407 |
| Hyperfeinaufspaltung | 409 |
| Beispiele: Paramagnetische Punktdefekte | 412 |
| Knight-Shift | 414 |
| Kernquadrupolresonanz | 415 |
| Ferromagnetische Resonanz | 416 |
| Einfluss der Probengestalt | 416 |
| Spinwellen-Resonanz | 418 |
| Antiferromagnetische Resonanz | 420 |
| Paramagnetische Elektronenresonanz | 422 |
| Austauschverschmälerung | 422 |
| Nullfeldaufspaltung | 422 |
| Die Wirkungsweise des Masers | 423 |
| Drei-Niveau-Maser | 424 |
| Laser | 425 |
| Zusammenfassung | 427 |
| Aufgaben | 427 |
| 14 Plasmonen, Polaritonen und Polaronen | 431 |
| Dielektrische Funktion des Elektronengases | 432 |
| Plasmaoptik | 433 |
| Dispersionsrelation für elektromagnetische Wellen | 435 |
| Transversale optische Schwingungen in einem Plasma | 435 |
| Longitudinale Plasmaschwingungen | 437 |
| Plasmonen | 439 |
| Elektrostatistische Abschirmung | 441 |
| Mottscher Metall-Isolator-Übergang | 446 |
| Abschirmung und Phononen in Metallen | 448 |
| Polaritonen | 449 |
| LST-Beziehung | 453 |
| Elektron-Elektron-Wechselwirkung | 456 |
| Fermi-Flüssigkeit | 456 |
| Elektron-Phonon-Wechselwirkung: Polaronen | 459 |
| Peierls-Instabilität linearer Metalle | 461 |
| Zusammenfassung | 463 |
| Aufgaben | 464 |

| | |
|---|----------------|
| 15 Optische Prozesse und Exzitonen | 467 |
| Optische Reflexion | 469 |
| Kramers-Kronig-Relationen | 470 |
| Elektronische Interband-Übergänge | 474 |
| Exzitonen | 475 |
| Frenkel-Exzitonen | 477 |
| Schwach gebundene (Mott-Wannier) Exzitonen | 481 |
| Exzitonen-Kondensation zu Elektron-Loch-Tröpfchen (EHD) | 482 |
| Raman-Effekt in Kristallen | 484 |
| Elektronenspektroskopie mit Röntgenstrahlen | 488 |
| Energieverlust schneller Teilchen in einem Festkörper | 489 |
| Zusammenfassung | 491 |
| Aufgaben | 491 |
| 16 Dielektrische und ferroelektrische Festkörper | 495 |
| Maxwell-Gleichungen | 496 |
| Polarisation | 496 |
| Makroskopisches elektrisches Feld | 497 |
| Depolarisationsfeld, E_1 | 499 |
| Lokales elektrisches Feld am Ort eines Atoms | 501 |
| Lorentz-Feld, E_2 | 503 |
| Feld der Dipole innerhalb eines Hohlraums, E_3 | 504 |
| Dielektrizitätskonstante und Polarisierbarkeit | 505 |
| Elektronische Polarisierbarkeit | 506 |
| Strukturelle Phasenübergänge | 509 |
| Ferroelektrische Kristalle | 510 |
| Klassifizierung ferroelektrischer Kristalle | 511 |
| Verschiebungsübergänge | 513 |
| Weiche optische Phononen | 516 |
| Landau-Theorie des Phasenübergangs | 517 |
| Phasenübergang zweiter Ordnung | 518 |
| Phasenübergang erster Ordnung | 519 |
| Antiferroelektrizität | 521 |
| Ferroelektrische Domänen | 522 |
| Piezoelektrizität | 524 |
| Zusammenfassung | 525 |
| Aufgaben | 526 |
| 17 Oberflächen- und Grenzflächenphysik | 531 |
| Rekonstruktion und Relaxation | 532 |
| Kristallographie der Oberfläche | 533 |
| Elektronische Struktur der Oberfläche | 537 |

| | |
|--|------------|
| Austrittsarbeit | 537 |
| Thermische Elektronenemission | 538 |
| Oberflächenzustände | 539 |
| Tangentialer Oberflächentransport | 540 |
| Magnetischer Widerstand in einem zweidimensionalen Kanal | 541 |
| Integraler Quanten-Hall-Effekt (IQHE) | 543 |
| IQHE in realen Systemen | 545 |
| <i>p-n</i> -Übergänge | 548 |
| Gleichrichtung | 549 |
| Solarzellen und Photodetektoren | 551 |
| Schottky-Barrieren | 551 |
| Heterostrukturen | 552 |
| <i>p-N</i> -Heteroübergänge | 553 |
| Halbleiterlaser | 555 |
| Leuchtdioden | 557 |
| Aufgaben | 558 |
| 18 Nanostrukturen | 561 |
| Abbildungstechniken für Nanostrukturen | 565 |
| Elektronenmikroskopie | 566 |
| Optische Mikroskopie | 567 |
| Rastertunnel-Mikroskop | 569 |
| Rasterkraft-Mikroskop | 572 |
| Elektronische Struktur von 1D-Systemen | 574 |
| Eindimensionale (1D) Subbänder | 574 |
| Spektroskopie von van-Hove-Singularitäten | 576 |
| 1D Metalle – Coulomb Wechselwirkungen und Gitterkopplungen | 576 |
| Elektrischer Transport in 1D | 580 |
| Leitfähigkeitsquantisierung und Landauer-Formel | 580 |
| Zwei Barrieren in Serie – Resonantes Tunneln | 583 |
| Inkohärente Addition und Ohmsches Gesetz | 586 |
| Lokalisierung | 587 |
| Spannungssonden und der Büttiker-Landauer-Formalismus | 588 |
| Elektronische Struktur von 0D-Systemen | 593 |
| Quantisierte Energieniveaus | 593 |
| Halbleiter-Nanokristalle | 594 |
| Metallische Quantenpunkte | 596 |
| Diskrete Ladungszustände | 598 |
| Elektrischer Transport in 0D | 601 |
| Coulomb-Oszillationen | 601 |
| Spin, Mott-Isolator und Kondo-Effekt | 604 |

| | |
|---|------------|
| Cooper-Paare in supraleitenden Quantenpunkten | 606 |
| Schwingungseigenschaften und thermische Eigenschaften | 607 |
| Quantisierte Schwingungszustände | 607 |
| Transversale Schwingungen | 609 |
| Wärmekapazität und Wärmetransport | 611 |
| Zusammenfassung | 613 |
| Aufgaben | 613 |
| 19 Nichtkristalline Festkörper | 617 |
| Beugungsdiagramme | 618 |
| Einatomige amorphe Substanzen | 619 |
| Radiale Verteilungsfunktion | 620 |
| Struktur von Quarzglas (α -SiO ₂) | 621 |
| Gläser | 624 |
| Viskosität und Sprung-(Hopping-)Rate | 625 |
| Amorphe Ferromagnetika | 627 |
| Amorphe Halbleiter | 628 |
| Niederenergetische Anregungen in amorphen Festkörpern | 630 |
| Berechnung der Wärmekapazität | 630 |
| Wärmeleitfähigkeit | 632 |
| Glasfaseroptik | 633 |
| Rayleigh-Streuung | 634 |
| Aufgabe | 635 |
| 20 Punktdefekte | 637 |
| Leerstellen im Gitter | 638 |
| Diffusion | 642 |
| Metalle | 645 |
| Farbzentren | 646 |
| F-Zentren | 646 |
| Weitere Farbzentren | 647 |
| Aufgaben | 650 |
| 21 Versetzungen | 651 |
| Schubfestigkeit von Einkristallen | 652 |
| Gleiten | 654 |
| Versetzungen | 655 |
| Burgers-Vektoren | 658 |
| Spannungsfelder von Versetzungen | 659 |
| Kleinwinkelkorngrenzen | 661 |
| Versetzungsichten | 664 |
| Versetzungsvervielfachung und Gleiten | 665 |

| | |
|---|------------|
| Festigkeit von Legierungen | 667 |
| Versetzungen und Kristallwachstum | 669 |
| Whisker | 670 |
| Härte von Stoffen | 672 |
| Aufgaben | 673 |
| 22 Legierungen | 675 |
| Allgemeine Betrachtungen | 676 |
| Substitutions-Mischkristalle, Hume-Rothery-Regeln | 679 |
| Ordnung-Unordnungs-Übergang | 682 |
| Elementare Theorie der Ordnung | 684 |
| Phasendiagramme | 687 |
| Legierungen der Übergangsmetalle | 689 |
| Kondo-Effekt | 692 |
| Aufgaben | 694 |
| Anhang | 695 |
| A: Temperaturabhängigkeit der Bragg-Reflexe | 696 |
| B: Die Ewaldsche Berechnung der Gittersummen | 699 |
| C: Quantisierung elastischer Wellen: Phononen | 704 |
| D: Fermi-Dirac-Verteilungsfunktion | 709 |
| E: Ableitung der $d\mathbf{k}/dt$ -Gleichung | 712 |
| F: Boltzmannsche Transportgleichung | 714 |
| G: Vektorpotential, Feldimpuls und Eichtransformationen | 719 |
| H: Cooper-Paare | 725 |
| I: Ginzburg-Landau-Gleichung | 727 |
| J: Elektron-Phonon-Stöße | 732 |
| Index | 736 |