

K.-H. Hellwege

# Einführung in die Festkörperphysik

Dritte, korrigierte Auflage

Mit 432 Abbildungen

Springer-Verlag  
Berlin Heidelberg New York  
London Paris Tokyo  
Hong Kong Barcelona  
Budapest

# Inhaltsverzeichnis

|          |  |     |                                      |
|----------|--|-----|--------------------------------------|
| 1.       | Übersicht . . . . .  | 1   | <b>A. Einleitung</b>                 |
| 2.       | Grundbegriffe und -tatsachen . . . . .                         | 2   |                                      |
| 3.       | Symmetrie . . . . .  | 3   | <b>B. Statik der Kristallgitter</b>  |
| 3.1.     | Anisotropie . . . . .  | 3   |                                      |
| 3.2.     | Punktsymmetriegruppen und Raumgruppen . . . . .                | 3   |                                      |
| 3.3.     | Begrenzungs- und Netzebenen . . . . .                          | 13  |                                      |
| 3.4.     | Das reziproke Gitter . . . . .                                 | 17  |                                      |
| 4.       | Strukturbestimmung mit Interferenzen . . . . .                 | 20  |                                      |
| 4.1.     | Röntgeninterferenzen . . . . .                                 | 20  |                                      |
| 4.2.     | Experimentelle Bestimmung von Gitterkonstanten . . . . .       | 24  |                                      |
| 4.3.     | Intensität der Reflexe und Feinbau der Zelle . . . . .         | 26  |                                      |
| 4.4.     | Elektronen- und Neutroneninterferenzen . . . . .               | 31  |                                      |
| 4.5.     | Ergebnisse von Röntgen-Strukturanalysen . . . . .              | 32  |                                      |
| 4.5.1.   | Isotypie . . . . .   | 33  |                                      |
| 4.5.2.   | Bauverbände . . . . .  | 34  |                                      |
| 4.5.3.   | Polymorphie . . . . .  | 38  |                                      |
| 4.5.4.   | Ionen- und Atomradien . . . . .                                | 39  |                                      |
| 5.       | Fehlordnung in Kristallen . . . . .                            | 43  |                                      |
| 5.1.     | Übersicht . . . . .  | 43  |                                      |
| 5.2.     | Strukturelle Fehlordnung . . . . .                             | 44  |                                      |
| 5.2.1.   | Punktdefekte . . . . .   | 44  |                                      |
| 5.2.2.   | Die Anomalie der plastischen Verformung . . . . .              | 47  |                                      |
| 5.2.3.   | Versetzungen . . . . .   | 48  |                                      |
| 5.2.3.1. | Stufenversetzungen . . . . .                                   | 48  |                                      |
| 5.2.3.2. | Schraubenversetzungen . . . . .                                | 50  |                                      |
| 5.2.3.3. | Systeme von Versetzungen . . . . .                             | 51  |                                      |
| 5.2.3.4. | Plastische Verformung von Metallen . . . . .                   | 52  |                                      |
| 5.2.4.   | Flächendefekte . . . . .                                       | 54  |                                      |
| 5.2.4.1. | Mosaik-Blockgrenzen in Einkristallen . . . . .                 | 54  |                                      |
| 5.2.4.2. | Korngrenzen in Vielkristallen . . . . .                        | 55  |                                      |
| 5.3.     | Chemische Fehlordnung . . . . .                                | 55  |                                      |
| 5.3.1.   | Übersicht . . . . .  | 55  |                                      |
| 5.3.2.   | F-Zentren in Alkalihalogenidkristallen . . . . .               | 55  |                                      |
| 6.       | Chemische Bindung in Kristallen . . . . .                      | 57  | <b>C. Dynamik der Kristallgitter</b> |
| 6.1.     | Bindungstypen . . . . .  | 57  |                                      |
| 6.2.     | Gitterenergie von Ionenkristallen . . . . .                    | 62  |                                      |
| 6.3.     | Oberflächenenergien von Ionenkristallen . . . . .              | 68  |                                      |
| 7.       | Die Elastizität von Kristallen . . . . .                       | 71  |                                      |
| 7.1.     | Phänomenologische Elastizitätstheorie der anisotropen Kontinua | 71  |                                      |
| 7.2.     | Experimentelle Bestimmung von elastischen Konstanten . . .     | 78  |                                      |
| 7.3.     | Elastizität und Gitterkräfte . . . . .                         | 79  |                                      |
| 8.       | Gitterschwingungen . . . . .                                   | 81  |                                      |
| 8.1.     | Eigenschwingungen einer unendlichen linearen Kette . . . . .   | 81  |                                      |
| 8.2.     | Abzählung der Eigenschwingungen einer linearen AB-Kette .      | 89  |                                      |
| 8.3.     | Eigenschwingungen eines Raumgitters . . . . .                  | 91  |                                      |
| 8.4.     | Quantelung der Gitterschwingungen, Phononen . . . . .          | 96  |                                      |
| 8.5.     | Nichtlineare Kräfte . . . . .                                  | 97  |                                      |
| 9.       | Experimentelle Bestimmung von Eigenschwingungen . . . . .      | 100 |                                      |
| 9.1.     | Ultrarotspektren von Kristallen . . . . .                      | 101 |                                      |

**D. Kristalle  
in äußeren Feldern.  
Makroskopische  
Beschreibung**

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 9.2.  | Unelastische Streuung von Neutronen und Röntgenphotonen . . . . . | 110 |
| 9.3.  | Brillouin- und Ramanstreuung . . . . .                            | 112 |
| 9.4.  | Elektronen-Schwingungsspektren . . . . .                          | 115 |
| 10.   | Das Schwingungssystem im thermischen Gleichgewicht . . . . .      | 116 |
| 10.1. | Statistische Grundlagen . . . . .                                 | 116 |
| 10.2. | Die Debyesche Theorie der Schwingungswärme . . . . .              | 117 |
| 10.3. | Vergleich mit der Planckschen Hohlraumstrahlung . . . . .         | 123 |
| 10.4. | Experimentelle Prüfung der Debyeschen Theorie . . . . .           | 124 |
| 10.5. | Vielkörperproblem und modifiziertes Einatom-Modell von Einstein   | 125 |

**E. Ionen  
in Kristalfeldern**

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 11.     | Kristalle im elektrischen Feld . . . . .                                   | 127 |
| 11.1.   | Grundlagen. Statische Dielektrizitätskonstante . . . . .                   | 127 |
| 11.2.   | Materie im elektrischen Wechselfeld. Kristalloptik . . . . .               | 130 |
| 11.3.   | Multipolstrahlung . . . . .  | 134 |
| 12.     | Kristalle im Temperaturfeld . . . . .                                      | 136 |
| 12.1.   | Thermische Ausdehnung . . . . .  | 136 |
| 12.2.   | Wärmeleitung . . . . .   | 136 |
| 13.     | Piezoelektrizität . . . . .  | 138 |
| 14.     | Qualitative Beschreibung eines Ions im Kristallgitter . . . . .            | 141 |
| 14.1.   | Fallunterscheidung und Modell . . . . .                                    | 141 |
| 14.2.   | Atome im homogenen Kondensatorfeld (Stark-Effekt) . . . . .                | 143 |
| 14.3.   | Ionen im inhomogenen elektrischen Kristallfeld . . . . .                   | 145 |
| 15.     | Termschema eines Ions im Kristallfeld . . . . .                            | 149 |
| 15.1.   | Das Kristallfeld . . . . .   | 149 |
| 15.2.   | Die Kristallfeldenergie 1. Näherung. Matrixelemente. Beispiel .            | 152 |
| 15.3.   | Kristallfeldzustände und Symmetrieeartung . . . . .                        | 158 |
| 15.4.   | Der Kramers'sche Satz: Zeitumkehr . . . . .                                | 164 |
| 16.     | Zeeman-Effekt von Ionen in Kristallen . . . . .                            | 169 |
| 16.1.   | Hamilton-Operator und Störungsrechnung . . . . .                           | 169 |
| 16.2.   | Beschreibung durch Spin-Hamilton-Operatoren . . . . .                      | 172 |
| 17.     | Ionen in schwingenden Kristallen: Elektron-Phonon-Wechselwirkung . . . . . | 175 |
| 17.1.   | Schwingungsstruktur der Elektronenterme . . . . .                          | 175 |
| 17.2.   | Strahlungslose Übergänge . . . . .   | 175 |
| 17.3.   | Phononen-Raman-Effekt . . . . .  | 176 |
| 17.4.   | Lebensdauer und Breite eines Elektronenterms . . . . .                     | 176 |
| 18.     | Spektren von Ionen in Kristallfeldern . . . . .                            | 178 |
| 18.1.   | Auswahlregeln für elektrische Dipolstrahlung . . . . .                     | 178 |
| 18.2.   | Auswahlregeln für magnetische Dipolstrahlung . . . . .                     | 180 |
| 18.3.   | Beispiele und Ergebnisse aus der Kristallspektroskopie . . . . .           | 181 |
| 18.3.1. | Vorbemerkung zur Analyse von Kristallspektren . . . . .                    | 181 |
| 18.3.2. | Spektren von Verbindungen der Seltenen Erden . . . . .                     | 182 |
| 18.3.3. | Spektren von Verbindungen mit offenen d-Schalen . . . . .                  | 191 |
| 18.4.   | Spektren und elektronische spezifische Wärme . . . . .                     | 193 |

**F. Magnetismus  
von Kristallen**

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 19.     | Maßsysteme. Grundlagen . . . . .                 | 195 |
| 19.1.   | Maßsysteme . . . . .                             | 195 |
| 19.2.   | Grundgrößen und Definitionen . . . . .           | 195 |
| 19.3.   | Modellmäßige Einteilung der Substanzen . . . . . | 198 |
| 20.     | Diamagnetismus von Isolatoren . . . . .          | 200 |
| 21.     | Paramagnetismus von Ionenkristallen . . . . .    | 202 |
| 21.1.   | Statistische Grundlagen . . . . .                | 202 |
| 21.2.   | Paramagnetismus freier Atome . . . . .           | 204 |
| 21.3.   | Magnetische Ionen im Kristallfeld . . . . .      | 207 |
| 21.3.1. | Ionen mit offener 3d-Schale . . . . .            | 207 |
| 21.3.2. | Ionen mit offener 4f-Schale . . . . .            | 210 |

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 22.     | Kopplung magnetischer Momente untereinander und mit den Gitterschwingungen . . . . .        | 215 |
| 22.1.   | Magnetische Dipol-Dipol-Wechselwirkung . . . . .  | 215 |
| 22.2.   | Elektrische Multipol-Wechselwirkung . . . . .   | 220 |
| 22.3.   | Austauschwechselwirkung . . . . .   | 221 |
| 22.3.1. | Direkter Austausch . . . . .  | 221 |
| 22.3.2. | Indirekter Austausch . . . . .  | 224 |
| 22.4.   | Molekularfeld und Anisotropiefeld . . . . .   | 225 |
| 23.     | Paramagnetische Relaxation . . . . .  | 227 |
| 23.1.   | Makroskopische Beschreibung . . . . .   | 227 |
| 23.2.   | Verschiedene Relaxationsarten . . . . .   | 232 |
| 23.3.   | Spin-Gitter-Relaxation . . . . .  | 232 |
| 23.4.   | Spin-Spin-Relaxation . . . . .  | 239 |
| 23.5.   | Kreuzrelaxation . . . . .   | 242 |
| 23.6.   | Magnetische Kühlung . . . . .   | 244 |
| 24.     | Ferromagnetismus . . . . .  | 248 |
| 24.1.   | Grundtatsachen und Modell . . . . .   | 248 |
| 24.2.   | Die Molekularfeldnäherung . . . . .   | 251 |
| 24.3.   | Ferromagnetische Spinwellen . . . . .   | 258 |
| 24.3.1. | Die lineare Spinkette mit isotropem Austausch . . . . .                                     | 258 |
| 24.3.2. | Spinwellen im Raumgitter . . . . .  | 265 |
| 24.3.3. | Magnonen im thermischen Gleichgewicht . . . . .   | 265 |
| 24.3.4. | Experimenteller Nachweis von Spinwellen . . . . .   | 268 |
| 24.4.   | Anisotropie und Domänenstruktur . . . . .   | 275 |
| 24.4.1. | Ferromagnetische Anisotropie . . . . .  | 275 |
| 24.4.2. | Domänenstruktur . . . . .   | 280 |
| 25.     | Antiferromagnetismus . . . . .  | 284 |
| 25.1.   | Kollinear-antiferromagnetische Strukturen mit zwei Untergittern . . . . .                   | 284 |
| 25.1.1. | Beispiele . . . . .   | 284 |
| 25.1.2. | Molekularfeldnäherung . . . . .   | 286 |
| 26.     | Kompliziertere magnetische Strukturen. Ferrimagnetismus . . . . .                           | 295 |
| 26.1.   | Antiferromagnetismus mit verkanteten Spins . . . . .  | 295 |
| 26.2.   | Modulierte Strukturen in Selten-Erd-Metallen . . . . .                                      | 296 |
| 26.3.   | Ferrimagnetische Strukturen . . . . .   | 297 |
| 26.3.1. | Ferrite. Molekularfeldnäherung . . . . .  | 298 |
| 26.3.2. | Granate . . . . .   | 302 |
| 26.3.3. | Selten-Erd-Perowskite . . . . .   | 304 |
| 27.     | Ferrimagnetische und antiferromagnetische Spinwellen . . . . .                              | 306 |
| 27.1.   | Die lineare AB-Spinkette . . . . .  | 306 |
| 27.2.   | Spinwellen im Raumgitter . . . . .  | 312 |
| 28.     | Grundlagen . . . . .  | 317 |
| 28.1.   | Maßsysteme . . . . .  | 317 |
| 28.2.   | Grundgrößen und Definitionen . . . . .  | 317 |
| 28.3.   | Dipolares, inneres und lokales elektrisches Feld . . . . .                                  | 318 |
| 29.     | Dipolmomente und elektrische Polarisierbarkeiten. Dispersion . . . . .                      | 319 |
| 29.1.   | Übersicht . . . . .   | 319 |
| 29.2.   | Orientierungspolarisation . . . . .   | 321 |
| 29.2.1. | Statische Elektrisierung und Polarisierbarkeit . . . . .                                    | 321 |
| 29.2.2. | Orientierungs-Relaxation . . . . .  | 325 |
| 29.3.   | Ionen- und Elektronenpolarisation . . . . .   | 325 |
| 29.3.1. | Das Lorentz'sche Modell . . . . .   | 325 |
| 29.3.2. | Elektronische Spektren . . . . .  | 327 |
| 29.3.3. | Schwingungsspektren . . . . .   | 328 |
| 29.4.   | Die Gesamtpolarisation . . . . .  | 329 |
| 30.     | Kopplung zwischen Lichtwellen und ultrarotaktiven Schwingungen in Ionenkristallen . . . . . | 330 |
| 30.1.   | Freie Schwingungen: Lyddane-Sachs-Teller-Theorem . . . . .                                  | 330 |
| 30.2.   | Erzwungene Schwingungen und anomale Dispersion. Polaritonen                                 | 334 |

**H. Leitungselektronen:  
Metalle**

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| 31.       | Spontanpolarisation . . . . .   | 340 |
| 31.1.     | Symmetrie und spontane elektrische Polarisation . . . . .                         | 340 |
| 31.2.     | Ferroelektrizität . . . . .   | 341 |
| 31.2.1.   | Phänomenologische Beschreibung . . . . .  | 341 |
| 31.2.2.   | Experimentelle Ergebnisse . . . . .   | 342 |
| 31.2.3.   | Mikrophysikalisches Modell . . . . .  | 346 |
| 31.3.     | Antiferroelektrizität . . . . .   | 350 |
| 40.       | Das Modell: Übersicht . . . . .   | 353 |
| 41.       | Einelektronenzustände I . . . . .   | 355 |
| 41.1.     | Ein Kristallelektron im eindimensionalen Gitter . . . . .                         | 355 |
| 41.1.1.   | Translationssymmetrie und Bloch-Zustände . . . . .                                | 355 |
| 41.1.2.   | Energieschema und Zustandsdichte eines freien Elektrons . . . . .                 | 357 |
| 41.1.3.   | Das reduzierte Energieschema . . . . .  | 358 |
| 41.2.     | Ein Kristallelektron im dreidimensionalen Gitter . . . . .                        | 361 |
| 41.2.1.   | Translationssymmetrie und Bloch-Zustände a . . . . .                              | 361 |
| 41.2.2.   | Der Grenzfall des freien Elektrons . . . . .                                      | 363 |
| 41.2.3.   | Das reduzierte Energieschema . . . . .  | 364 |
| 42.       | Das Fermi-Sommerfeld-Gas freier Elektronen . . . . .                              | 369 |
| 42.1.     | Das Modell . . . . .  | 369 |
| 42.2.     | Die Fermi-Fläche . . . . .  | 370 |
| 42.3.     | Die thermische Energie . . . . .  | 372 |
| 42.4.     | Die magnetischen Eigenschaften . . . . .  | 375 |
| 42.4.1.   | Paulischer Spinmagnetismus . . . . .  | 375 |
| 42.4.2.   | Elektronenspinresonanz . . . . .  | 378 |
| 42.4.3.   | Zyklotronresonanz . . . . .   | 378 |
| 42.4.4.   | Landausches Niveauschema . . . . .  | 379 |
| 42.4.5.   | Der Bahnmagnetismus . . . . .   | 382 |
| 43.       | Das Kristallelektronengas im Gitterpotential . . . . .                            | 387 |
| 43.1.     | Einelektronenzustände II . . . . .  | 387 |
| 43.1.1.   | Zeitumkehr . . . . .  | 387 |
| 43.1.2.   | Translationssymmetrie b . . . . .   | 388 |
| 43.2.     | Energiebänder im eindimensionalen Gitter . . . . .                                | 389 |
| 43.3.     | Energiebänder im dreidimensionalen Gitter . . . . .                               | 393 |
| 43.3.1.   | Fermiflächen . . . . .  | 393 |
| 43.3.2.   | Struktur der Energiebänder . . . . .  | 398 |
| 43.3.3.   | Isolatoren, Halbleiter, Metalle, Schmelzen . . . . .                              | 400 |
| 43.4.     | Das Teilchenbild der Kristallelektronen: Effektivmassen-Dynamik . . . . .         | 403 |
| 43.4.1.   | Dynamik eines Kristallelektrons . . . . .   | 404 |
| 43.4.2.   | Ein Kristallelektron im elektrischen Feld . . . . .                               | 407 |
| 43.4.3.   | Ein Kristallelektron im magnetischen Feld . . . . .                               | 409 |
| 43.4.4.   | Experimentelle Bestimmung der Fermifläche von Metallen . . . . .                  | 413 |
| 43.4.4.1. | Elektromagnetische Zyklotronresonanz und de Haas-van Alphen-Effekt . . . . .      | 414 |
| 43.4.4.2. | Dämpfung von Ultraschall im Magnetfeld . . . . .                                  | 417 |
| 43.4.5.   | Elektronen oder/und Löcher . . . . .  | 419 |
| 43.5.     | Optische Eigenschaften und spektroskopische Bestimmung der Bandstruktur . . . . . | 422 |
| 43.5.1.   | Übersicht . . . . .   | 422 |
| 43.5.2.   | Interbandübergänge . . . . .  | 423 |
| 43.6.     | Grenzflächenprobleme . . . . .  | 427 |
| 43.6.1.   | Die Austrittsarbeit . . . . .   | 427 |
| 43.6.2.   | Kontakt- und Thermospannung . . . . .   | 431 |
| 44.       | Streuung von Leitungselektronen: die elektrische Leitung . . . . .                | 434 |
| 44.1.     | Streuprozesse . . . . .   | 434 |
| 44.1.1.   | Streuung an Phononen . . . . .  | 434 |
| 44.1.2.   | Streuung an Gitterfehlern . . . . .   | 434 |
| 44.1.3.   | Elektron-Elektron-Streuung . . . . .  | 435 |
| 44.2.     | Die elektrische Leitfähigkeit von Metallen . . . . .                              | 435 |

|   |     |
|---|-----|
| 44.2.1. Der Relaxationsmechanismus . . . . .                                | 435 |
| 44.2.2. Das Ohmsche Gesetz im Gleichfeld . . . . .                          | 437 |
| 44.2.3. Leitfähigkeit im Wechselfeld . . . . .                              | 443 |
| 44.2.3.1. Leitfähigkeit, Skineffekt . . . . .                               | 443 |
| 44.2.3.2. Dielektrizitätskonstante der Leitungselektronen . . . . .         | 446 |
| 44.2.4. Plasmawellen . . . . .  | 449 |
| 44.2.5. Leitung in gekreuzten Feldern: galvanomagnetische Effekte . . . . . | 451 |
| 44.2.5.1. Hall-Effekt . . . . .   | 452 |
| 44.2.5.2. Magnetische Widerstandsänderung . . . . .                         | 455 |
| 44.2.5.3. Quanten-Hall-Effekt (Nachtrag) . . . . .                          | 609 |

## I. Leitungselektronen: Halbleiter

|   |     |
|---|-----|
| 45. Homogene Halbleiter . . . . .                                   | 457 |
| 45.1. Übersicht und Grundbegriffe . . . . .                         | 457 |
| 45.2. Trägerkonzentrationen und elektrische Leitfähigkeit . . . . . | 462 |
| 45.2.1. Elektronenverteilung im thermischen Gleichgewicht . . . . . | 462 |
| 45.2.2. Die elektrische Leitfähigkeit . . . . .                     | 467 |
| 45.3. Galvanomagnetische Effekte . . . . .                          | 470 |
| 45.3.1. Hall-Effekt und Beweglichkeiten . . . . .                   | 470 |
| 45.3.2. Magnetische Widerstandsänderung . . . . .                   | 473 |
| 45.4. Zyklotronresonanz und effektive Massen . . . . .              | 474 |
| 45.5. Optische Eigenschaften . . . . .                              | 477 |
| 45.5.1. Absorption durch freie Ladungsträger . . . . .              | 477 |
| 45.5.2. Interbandübergänge . . . . .                                | 478 |
| 45.5.3. Störstellenabsorption . . . . .                             | 480 |
| 46. Inhomogene Halbleiter . . . . .                                 | 481 |
| 46.1. Diffusion und Rekombination von Ladungsträgern . . . . .      | 481 |
| 46.2. Der p-n-Übergang . . . . .                                    | 483 |
| 46.3. Der p-n-Gleichrichter . . . . .                               | 486 |

## J. Gebundene Zustände in Kristallen

|   |     |
|---|-----|
| 47. Einelektronenzustände in der LCAO-Näherung . . . . .                        | 489 |
| 48. Exzitonen . . . . .   | 495 |
| 48.1. Frenkel-Exzitonen . . . . .   | 497 |
| 48.2. Mott-Wannier-Exzitonen . . . . .  | 499 |
| 48.3. $\mathbf{k}$ -Abhängigkeit, Strahlung und Zerfall von Exzitonen . . . . . | 502 |
| 48.4. Resonanzkopplung innerhalb einer Gitterzelle . . . . .                    | 503 |
| 48.5. Exzitonenspektren . . . . .   | 505 |
| 49. Polaronen . . . . .   | 509 |

## K. Supraleitung

|  |     |
|--|-----|
| 50. Makroskopische Phänomene . . . . .                                 | 513 |
| 50.1. Die elektrische Leitung im Gleichfeld . . . . .                  | 513 |
| 50.2. Die Magnetisierung . . . . .                                     | 516 |
| 50.3. Zwischenzustand und Magnetisierungskurve . . . . .               | 518 |
| 50.4. Thermodynamische Eigenschaften . . . . .                         | 521 |
| 50.5. Die London'schen Feldgleichungen . . . . .                       | 526 |
| 50.6. Flußquantelung . . . . .   | 529 |
| 51. Grundlagen und Ergebnisse der BCS-Theorie . . . . .                | 532 |
| 51.1. Die Cooper-Paare . . . . .                                       | 532 |
| 51.2. Der Grundzustand eines Supraleiters bei $T = 0$ K . . . . .      | 534 |
| 51.3. Die Energielücke eines Supraleiters bei $T = 0$ K . . . . .      | 536 |
| 51.4. Die Energielücke eines Supraleiters bei $T > 0$ K . . . . .      | 539 |
| 52. BCS-Theorie und makroskopische Phänomene . . . . .                 | 541 |
| 52.1. Elektrische Leitfähigkeit und das kritische Magnetfeld . . . . . | 541 |
| 52.2. Die thermodynamischen Eigenschaften . . . . .                    | 542 |
| 52.3. Nachweis der Cooper-Paare und des Bindungsmechanismus . . . . .  | 543 |
| 52.4. Experimentelle Bestimmung der Energielücke . . . . .             | 543 |
| 52.4.1. Spezifische Wärme und Übergangstemperatur . . . . .            | 543 |
| 52.4.2. Optische und Ultraschall-Absorption . . . . .                  | 543 |
| 52.4.3. Tunnelübergänge von Einzelelektronen . . . . .                 | 545 |

---

|   |     |
|---|-----|
| 52.5. Josephson-Effekte . . . . .   | 550 |
| 52.5.1. Experimenteller Befund . . . . .  | 550 |
| 52.5.2. Theoretische Begründung . . . . .   | 552 |
| 52.6. Deutung des Meißner-Ochsenfeld-Effektes . . . . .   | 553 |
| 53. Grenzflächenprobleme . . . . .  | 555 |
| 53.1. Kohärenzlängen . . . . .  | 555 |
| 53.2. Die Phasengrenzenergie . . . . .  | 556 |
| 53.3. Supraleiter 2. Art . . . . .  | 558 |
| <b>L. Anregungen und Energietransport</b>   |     |
| 54. Anregungen . . . . .  | 563 |
| 55. Wärmeleitung . . . . .  | 565 |
| 55.1. Grundbegriffe und -tatsachen . . . . .  | 565 |
| 55.2. Wärmewiderstand durch Phononenstreuung . . . . .  | 566 |
| 55.2.1. Übersicht . . . . .   | 566 |
| 55.2.2. Phonon-Phonon- und Oberflächenstreuung . . . . .  | 568 |
| 55.2.3. Streuung an Gitterfehlern . . . . .   | 571 |
| 55.2.4. Amorphe und teilkristalline Stoffe . . . . .  | 573 |
| 55.3. Wärmeleitung in magnetischen Kristallen . . . . .   | 576 |
| 55.4. Wärmeleitung in Metallen . . . . .  | 577 |
| 55.4.1. Wärmeleitung im normalleitenden Zustand . . . . .                                       | 577 |
| 55.4.2. Wärmeleitung im supraleitenden Zustand . . . . .  | 579 |
| Bildtafeln . . . . .  | 581 |
| <b>Anhang</b>   |     |
| A: Maßsysteme . . . . .   | 599 |
| B: Konstanten der Atomphysik . . . . .  | 603 |
| C: Ersatzeinheiten für atomare Energien, Umrechnungstabelle . . . . .                           | 604 |
| D: Ebene elektromagnetische Wellen in Materie, nach der klassischen Kontinuumstheorie . . . . . | 606 |
| <b>Nachtrag</b>   |     |
| 44.2.5.3. Quanten-Hall-Effekt . . . . .   | 609 |
| Literatur . . . . .   | 613 |
| Sachverzeichnis . . . . .   | 621 |