

Periodensystem der Elemente

H₂ P6 ₃ /mmc 3,776 — 6,162																α-⁴He P6 ₃ /mmc 3,531 — 5,693																													
Li Im3m 3,510 — —	α-Be P6 ₃ /mmc 2,287 — 3,583											α-B R $\bar{3}$ m rhomb. 5,057 — —	C Fd3m 3,567 — —	α-N₂ P2 ₁ 3 5,644 — —	α-O₂ C2/m 5,403 3,429 5,086	α-F₂ C2/m — — —	Ne Fm3m 4,455 — —																												
α-Na P6 ₃ /mmc 3,767 — 6,154	Mg P6 ₃ /mmc 3,209 — 5,210	Element Raumgruppensymbol Gitterkonstante a Gitterkonstante b Gitterkonstante c										Al Fm3m 4,050 — —	Si Fd3m 5,431 — —	P Cmca 3,314 10,478 4,376	α-S₈ Fddd 10,465 12,866 24,486	Cl₂ Cmca 6,24 4,48 8,26	Ar Fm3m 5,311 — —																												
K Im3m 5,32 — —	α-Ca Fm3m 5,588 — —	α-Sc P6 ₃ /mmc 3,309 5,273	α-Ti P6 ₃ /mmc 2,951 4,684	V Im3m 3,024 — —	Cr Im3m 2,885 — —	α-Mn I $\bar{4}$ 3m 8,914 — —	α-Fe Im3m 2,866 — —	α-Co Fm3m 3,544 — —	Ni Fm3m 3,524 — —	Cu Fm3m 3,615 — —	Zn P6 ₃ /mmc 2,664 4,947	α-Ga Cmca 4,519 7,657 4,526	Ge Fd3m 5,658 — —	α-As R $\bar{3}$ m 4,132 — —	Se P3 ₁ /221 4,366 4,959	Br₂ Cmca 6,737 4,548 8,761	Kr Fm3m 5,721 — —																												
Rb Im3m 5,700 — —	α-Sr Fm3m 6,085 — —	α-Y P6 ₃ /mmc 3,647 5,731	α-Zr P6 ₃ /mmc 3,232 5,148	Nb Im3m 3,299 — —	Mo Im3m 3,147 — —	Tc P6 ₃ /mmc 2,743 4,400	Ru P6 ₃ /mmc 2,706 4,281	Rh Fm3m 3,804 — —	Pd Fm3m 3,891 — —	Ag Fm3m 4,086 — —	Cd P6 ₃ /mmc 2,979 5,619	In I4/mmm 3,253 4,946	α-Sn Fd3m 6,489 — —	Sb R $\bar{3}$ m 4,308 11,247	Te P3 ₁ /221 4,457 5,927	J₂ Cmca 7,265 4,786 9,791	Xe Fm3m 6,197 — —																												
Cs Im3m 6,14 — —	Ba Im3m 5,025 — —	α-La P6 ₃ /mmc 3,770 12,159	α-Hf P6 ₃ /mmc 3,195 5,051	Ta Im3m 3,303 — —	W Im3m 3,165 — —	Re P6 ₃ /mmc 2,761 4,458	Os P6 ₃ /mmc 2,735 4,319	Ir Fm3m 3,839 — —	Pt Fm3m 3,924 — —	Au Fm3m 4,078 — —	α-Hg R $\bar{3}$ m 2,993 — —	α-Tl P6 ₃ /mmc 3,456 5,525	Pb Fm3m 4,950 — —	Bi R $\bar{3}$ m 4,546 11,862	α-Po Pm3m 3,352 — —	At — — —	Rn — — —																												
Fr	Ra	Ac Fm3m 5,311 — —	<table border="1"> <tr> <td>α-Ce Fm3m 4,85 — —</td> <td>α-Pr P6₃/mmc 3,673 11,835</td> <td>α-Nd P6₃/mmc 3,658 11,799</td> <td>Pm — — —</td> <td>α-Sm R$\bar{3}$m 8,996 — —</td> <td>Eu Im3m 4,582 — —</td> <td>Gd P6₃/mmc 3,636 5,783</td> <td>α-Tb P6₃/mmc 3,601 5,694</td> <td>Dy P6₃/mmc 3,590 5,648</td> <td>α-Ho P6₃/mmc 3,577 5,616</td> <td>α-Er P6₃/mmc 3,559 5,587</td> <td>α-Tm P6₃/mmc 3,538 5,555</td> <td>α-Yb Fm3m 5,486 — —</td> <td>α-Lu P6₃/mmc 3,503 5,551</td> </tr> <tr> <td>α-Th Fm3m 5,084 — —</td> <td>Pa I4/mmm 3,932 3,238</td> <td>α-U Cmcm 2,848 5,858 4,946</td> <td>α-Np Pmcm 4,723 4,887 6,663</td> <td>α-Pu P2/m 6,183 4,822 10,963</td> <td>α-Am P6₃/mmc 3,468 — 11,240</td> <td>Cm P6₃/mmc 3,496 — 11,331</td> <td>Bk — — —</td> <td>Cf — — —</td> <td>Es — — —</td> <td>Fm — — —</td> <td>Md — — —</td> <td>No — — —</td> <td>Lw — — —</td> </tr> </table>															α-Ce Fm3m 4,85 — —	α-Pr P6 ₃ /mmc 3,673 11,835	α-Nd P6 ₃ /mmc 3,658 11,799	Pm — — —	α-Sm R $\bar{3}$ m 8,996 — —	Eu Im3m 4,582 — —	Gd P6 ₃ /mmc 3,636 5,783	α-Tb P6 ₃ /mmc 3,601 5,694	Dy P6 ₃ /mmc 3,590 5,648	α-Ho P6 ₃ /mmc 3,577 5,616	α-Er P6 ₃ /mmc 3,559 5,587	α-Tm P6 ₃ /mmc 3,538 5,555	α-Yb Fm3m 5,486 — —	α-Lu P6 ₃ /mmc 3,503 5,551	α-Th Fm3m 5,084 — —	Pa I4/mmm 3,932 3,238	α-U Cmcm 2,848 5,858 4,946	α-Np Pmcm 4,723 4,887 6,663	α-Pu P2/m 6,183 4,822 10,963	α-Am P6 ₃ /mmc 3,468 — 11,240	Cm P6 ₃ /mmc 3,496 — 11,331	Bk — — —	Cf — — —	Es — — —	Fm — — —	Md — — —	No — — —	Lw — — —
α-Ce Fm3m 4,85 — —	α-Pr P6 ₃ /mmc 3,673 11,835	α-Nd P6 ₃ /mmc 3,658 11,799	Pm — — —	α-Sm R $\bar{3}$ m 8,996 — —	Eu Im3m 4,582 — —	Gd P6 ₃ /mmc 3,636 5,783	α-Tb P6 ₃ /mmc 3,601 5,694	Dy P6 ₃ /mmc 3,590 5,648	α-Ho P6 ₃ /mmc 3,577 5,616	α-Er P6 ₃ /mmc 3,559 5,587	α-Tm P6 ₃ /mmc 3,538 5,555	α-Yb Fm3m 5,486 — —	α-Lu P6 ₃ /mmc 3,503 5,551																																
α-Th Fm3m 5,084 — —	Pa I4/mmm 3,932 3,238	α-U Cmcm 2,848 5,858 4,946	α-Np Pmcm 4,723 4,887 6,663	α-Pu P2/m 6,183 4,822 10,963	α-Am P6 ₃ /mmc 3,468 — 11,240	Cm P6 ₃ /mmc 3,496 — 11,331	Bk — — —	Cf — — —	Es — — —	Fm — — —	Md — — —	No — — —	Lw — — —																																

Flächenzentriertes kubisches Gitter: Fm3m, O_h⁵
 Raumzentriertes kubisches Gitter: Im3m, O_h⁸
 Hexagonal dichteste Kugelpackung: P6₃/mmc, D_{6h}⁴
 Rhomboedrisches Gitter: R $\bar{3}$ m, D_{3d}⁵
 Diamantgitter: Fd3m, O_h⁷
 Rechts- bzw. linksdrehendes Selengitter: P3₁21, D_{3d}⁵; P3₂21, D_{3d}⁵

Quelle: Landolt-Börnstein, Neue Serie, Band III, 6,
 Strukturdaten der Elemente und intermetallischer
 Phasen
 (Springer, Berlin, Heidelberg, New York 1971)

Springer-Lehrbuch



Harald Ibach Hans Lüth

FESTKÖRPER- PHYSIK

Einführung in die Grundlagen

Dritte Auflage
mit 230 Abbildungen und 16 Tabellen

Springer-Verlag
Berlin Heidelberg GmbH

Korrigierter Nachdruck 1993

ISBN 978-3-540-52193-8

ISBN 978-3-662-35366-0 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-662-35366-0

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Ibach, Harald:

Festkörperphysik: Einführung in die Grundlagen; mit 16 Tabellen/Harald Ibach; Hans Lüth.

3. Aufl., korr. Nachdr. – Berlin; Heidelberg; New York; London; Paris; Tokyo; Hong Kong; Barcelona;

Budapest: Springer, 1993

(Springer-Lehrbuch)

NE: Lüth, Hans:

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1981, 1988, 1990

Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1990.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Vorwort zur dritten Auflage

Entsprechend dem kurzen zeitlichen Abstand zur 2. Auflage ist die 3. Auflage im wesentlichen ein unveränderter Nachdruck. Allerdings haben wir zahlreichen Anregungen von Kollegen und Studenten folgend die Gelegenheit wahrgenommen, Druckfehler zu beseitigen und die Darstellung in einigen Punkten zu ändern. Die Glühemission aus Metallen wird jetzt so behandelt, daß unmittelbar eine Applikation auf die aktuellere Anwendung im Bereich von Halbleiterheterostrukturen möglich ist. Die direkte störungstheoretische Herleitung des Imaginärteils der Dielektrizitätskonstante erwies sich als problematisch und wurde durch eine störungstheoretische Behandlung der Dispersion ersetzt. Einem Vorschlag unseres Kollegen W. Mönch folgend wird der *pn*-Übergang nicht mehr nur bei $T=0$ sondern auch für den realistischeren Fall der Störstellenerzeugung behandelt.

Jülich, im Dezember 1989

H. Ibach · H. Lüth

Vorwort zur zweiten Auflage

Die erste Auflage unseres Lehrbuches hat bei Fachkollegen und Studenten eine überaus positive Resonanz gefunden. Insbesondere wurde die gleichrangige Behandlung theoretischer und experimenteller Aspekte der Festkörperphysik sowie die neuartige Darstellung wichtiger Experimente und aktueller Forschungsgebiete in der Form von Experimenttafeln gelobt. Neben spezifischer Kritik wurde vor allem der Wunsch nach Vervollständigung geäußert und das Fehlen der wichtigen Gebiete des Magnetismus und der Supraleitung bemängelt. Letztere Kritik wog um so schwerer, als es sich bei diesen beiden Gebieten um besonders aktuelle und wichtige Forschungsgebiete in der gegenwärtigen Festkörperphysik handelt. Die zweite Auflage wurde deshalb durch je ein Kapitel über Magnetismus und Supraleitung ergänzt. Wir haben uns bemüht, einfache Grundmodelle für die Vielteilchenwechselwirkung vorzustellen und zu diskutieren. Im Kapitel über Magnetismus wird die magnetische Kopplung sowohl lokalisierter Elektronen als auch delokalisierte Elektronen besprochen, und der Leser wird bis an moderne Dünnschichtexperimente herangeführt. In der Supraleitung wird vor allem die klassische Supraleitung im Rahmen einer einfachen Darstellung der BCS-Theorie behandelt. Den neuen Hochtemperatur-Supraleitern wird ebenfalls ein Abschnitt gewidmet. Allerdings ist die Entwicklung hier noch so im Fluß, daß wir uns auf eine Darlegung experimenteller Ergebnisse und einiger Grundgedanken beschränken mußten. Selbst hierbei ist zu erwarten, daß bis zur Veröffentlichung des Buches neue wichtige Resultate aus Experiment und Theorie vorliegen, auf die noch nicht eingegangen werden konnte. Das Kapitel über Halbleiter wurde gegenüber der ersten Auflage wesentlich erweitert und vor allem durch die Themen Halbleiter-Heterostrukturen, Übergitter, Epitaxie und Quanten-Hall-Effekt ergänzt.

Durch die umfangreichen Erweiterungen hat sich der Charakter des Buches dahingehend geändert, daß Gebiete aktueller Forschung eine deutlich stärkere Betonung erfahren haben. Darüber hinaus haben wir die Gelegenheit benutzt, Druckfehler und Unschönheiten der ersten Auflage zu beseitigen. Für die vielen Anregungen von Kollegen, die wir hierzu in den vergangenen Jahren erhielten, bedanken wir uns herzlich. Dank gilt insbesondere den Kollegen A. Stahl und W. Zinn, die durch einige Ratschläge und Bereitstellung von experimentellem Material zu den beiden neuen Kapiteln Supraleitung und Magnetismus beigetragen haben. Für die kritische Durchsicht von Teilen des Manuskriptes und der Druckfahnen bedanken wir uns bei Frau Dr. Angela Rizzi und den Herren W. Daum, Ch. Stuhlmann, und M. Wuttig. Die Zeichnungen haben Frau U. Marx-Birmans und Herr H. Mattke mit dankenswerter Geduld angefertigt. Das Manuskript schrieben die Sekretärinnen Frau D. Krüger, M. Jürss-Nysten und G. Offermann. Den Herren Dr. H. Lotsch und C.-D. Bachem vom Springer-Verlag danken wir für die erfreuliche Zusammenarbeit.

Jülich, im September 1988

H. Ibach · H. Lüth

Vorwort zur ersten Auflage

Ein neues Buch neben vielen vorhandenen, ausgezeichneten Lehrbüchern bedarf wohl der Rechtfertigung. Wir meinen, sie ist in der Entwicklung der Festkörperphysik als Wissensgebiet und Unterrichtsfach begründet. Die Festkörperphysik hat sich in den letzten Jahrzehnten zu einer eigenständigen Disziplin innerhalb der Physik entwickelt und ein nicht unerheblicher Teil der aktuellen physikalischen Forschung ist auf sie konzentriert. Gleichzeitig hat sich die Festkörperphysik ausgedehnt auf Bereiche, die vormals den Ingenieurwissenschaften, der Chemie oder empirischen Wissensgebieten vorbehalten waren. Als Folge dieser Entwicklung vermag heute weder der einzelne Dozent das Gesamtgebiet zu überschauen und in seiner Entwicklung zu verfolgen, noch ist die Festkörperphysik als solche dem Studenten vermittelbar. Wir haben geglaubt, daß in dieser Situation ein Lehrbuch, welches sich radikal auf wesentliche Elemente der Festkörperphysik beschränkt, nützlich sein könnte. Aufbauend auf dieser Grundlage können dann Spezialvorlesungen angeboten werden, die sich an den jeweiligen Forschungsschwerpunkten der einzelnen Hochschulen ausrichten. Ein weiterer Gesichtspunkt für die Gestaltung dieses Buches war die Beobachtung, daß Festkörperphysik aus technischen Gründen kaum als klassische Experimentalphysik-Vorlesung mit Demonstrationsexperimenten gelesen werden kann. Aus diesem Grunde und wegen der Eigentümlichkeit der Festkörperphysik, eine starke Verbindung von Theorie und Experiment herzustellen, ist eine strenge Trennung zwischen experimenteller und theoretischer Festkörperphysik unseres Erachtens nicht zweckmäßig.

Das vorliegende Buch basiert auf dem Stoff einer Vorlesung, die ein Semester vierstündig bzw. zwei Semester zweistündig gehalten wurde. Im Zentrum der Darstellung steht der periodische Festkörper in der Einteilchen-Näherung. Von daher ist es verständlich, daß so wichtige Gebiete wie z. B die Supraleitung nicht behandelt werden konnten. Das Buch versucht zwischen Experimentalphysik und theoretischer Physik eine Mittellinie einzuhalten. Dort wo theoretische Betrachtungen ohne allzu großen Aufwand möglich und hilfreich sind, haben wir uns nicht gescheut, stärkere Anforderungen an das Abstraktionsvermögen zu stellen. Wir haben ferner versucht, Begriffsbildungen, Modelle und Bezeichnungen, deren Kenntnis für das Verständnis gegenwärtiger Originalliteratur der theoretischen Festkörperphysik unumgänglich ist, mit in dieses Buch aufzunehmen. Wir haben uns andererseits bemüht, dort wo ein klassisches Bild möglich und vertretbar ist, in diesem Bilde zu arbeiten.

In der Reihenfolge der Darstellung folgt das Buch dem Schema: chemische Bindung, Struktur, Gittereigenschaften, elektronische Eigenschaften. Wir glauben, daß diese Reihenfolge aus didaktischen Gründen zweckmäßig ist, weil sie es ermöglicht, besonders schwierige festkörperphysikalische Begriffsbildungen zu einem späteren Zeitpunkt einzuführen, wenn wichtige Fundamente bereits an einfacheren Modellen bzw. Beispielen erarbeitet worden sind.

Die verhältnismäßig straffe und auf das Wesentliche konzentrierte Darstellung wird ergänzt durch Experimenttafeln, in denen jeweils einige ausgewählte Experimente der Festkörperphysik dargestellt sind. Hier hat der Leser Gelegenheit, sein bisher erarbei-

tetes Wissen zu überprüfen bzw. Anregungen für sein weiteres Selbststudium zu empfangen.

Die Auswahl des Stoffes in den Kapiteln und in den Experimenttafeln erfolgte in dem Bemühen der Konzentration und andererseits im Hinblick darauf, das zu erfassen, was didaktisch gut darstellbar und zu verstehen ist. Daß Auswahl und Auswahlkriterien nicht frei von subjektiven Einflüssen sind und andere Autoren die Akzente anders gesetzt hätten, ist wohl unvermeidbar.

Das Buch wäre nicht entstanden ohne die Unterstützung durch Kollegen und Mitarbeiter. Auch ist viel Gedankengut unserer akademischen Lehrer G. Heiland und G. Leibfried eingeflossen. Für die Experimenttafeln haben insbesondere die Kollegen U. Bonse, G. Comsa, W. Hartmann, B. Lengeler, H. Raether, W. Richter, W. Sander, H. H. Stiller Bild- und Literaturmaterial ausgewählt und zur Verfügung gestellt. Für die kritische Durchsicht einzelner Abschnitte danken wir den Kollegen G. Comsa und W. Sander sowie Herrn R. Matz. Weiterer Dank gilt Frl. M. Mattern für ihre intensive Mitarbeit bei der Korrektur der letzten Manuskriptfassung.

Das Manuskript haben die Sekretärinnen Frau H. Dohmen, I. Kratzenberg, D. Krüger und G. Offermann geschrieben. Besonderer Dank gilt Frl. U. Marx, die alle Zeichnungen anfertigte und unseren vielfältigen Änderungswünschen große Geduld entgegenbrachte. Dem Springer-Verlag, insbesondere den Herren Dr. H. Lotsch und R. Michels, danken wir für die ausgezeichnete Zusammenarbeit.

Jülich, Aachen im November 1980

H. Ibach · H. Lüth

Inhaltsverzeichnis

1. Die chemische Bindung in Festkörpern

1.1	Das Periodensystem	1
1.2	Kovalente Bindung	3
1.3	Die Ionenbindung	7
1.4	Metallische Bindung	10
1.5	Die Wasserstoffbrückenbindung	13
1.6	Die Van der Waals-Bindung	13

2. Kristallstrukturen

2.1	Translationsgitter	15
2.2	Punktsymmetrien	18
2.3	Die 32 Kristallklassen (Punktgruppen)	19
2.4	Die Bedeutung der Symmetrie	21
2.5	Einfache Kristallstrukturen	23

3. Die Beugung an periodischen Strukturen

3.1	Die allgemeine Beugungstheorie	29
3.2	Periodische Strukturen und reziprokes Gitter	32
3.3	Die Streubedingung bei periodischen Strukturen	33
3.4	Die Braggsche Deutung der Beugungsbedingung	35
3.5	Die Brillouinschen Zonen	37
3.6	Der Strukturfaktor	39
3.7	Methoden der Strukturanalyse	41
	Tafel I: Beugungsexperimente mit verschiedenen Teilchen	44
	Tafel II: Röntgeninterferometer und Röntgentopographie	49

4. Dynamik von Kristallgittern

4.1	Das Potential	54
4.2	Die Bewegungsgleichungen	55
4.3	Die lineare zweiatomige Kette	56
4.4	Streuung an zeitlich veränderlichen Strukturen	60
4.5	Phononenspektroskopie	62
	Tafel III: Raman-Spektroskopie	64

5. Thermische Eigenschaften von Kristallgittern

5.1	Die Zustandsdichte	69
5.2	Thermische Energie eines harmonischen Oszillators	72
5.3	Die spezifische Wärme des Gitters	73
5.4	Anharmonische Effekte	75
5.5	Thermische Ausdehnung	76
5.6	Wärmeleitung durch Phononen.	79
	Tafel IV: Experimente bei tiefen Temperaturen	84

6. „Freie“ Elektronen im Festkörper

6.1	Das freie Elektronengas im Potentialkasten	88
6.2	Das Fermi-Gas bei $T=0$ K	91
6.3	Fermi-Statistik	92
6.4	Spezifische Wärme der Metallelektronen.	95
6.5	Elektrostatische Abschirmung in einem Fermi-Gas–Mott-Übergang	99
6.6	Glühemission aus Metallen	101

7. Elektronische Bänder in Festkörpern

7.1	Allgemeine Symmetrieeigenschaften	105
7.2	Näherung des quasifreien Elektrons	109
7.3	Näherung vom „stark gebundenen“ Elektron her	113
7.4	Beispiele von Bandstrukturen	118
7.5	Zustandsdichten	122
	Tafel V: Photoemissionsspektroskopie	125

8. Magnetismus

8.1	Dia- und Paramagnetismus	127
8.2	Austauschwechselwirkung	132
8.3	Austauschwechselwirkung zwischen freien Elektronen	134
8.4	Das Bandmodell für den Ferromagnetismus	137
8.5	Das Temperaturverhalten eines Ferromagneten im Bandmodell	140
8.6	Ferromagnetische Kopplung bei lokalisierten Elektronen	143
8.7	Antiferromagnetismus	145
8.8	Spinwellen	148
	Tafel VI: Magnetostatische Spinwellen	153
	Tafel VII: Oberflächenmagnetismus	157

9. Bewegung von Ladungsträgern und Transportphänomene

9.1	Bewegung von Ladungsträgern in Bändern – die effektive Masse	161
9.2	Ströme in Bändern und Defektelektronen	165

9.3	Streuung von Elektronen in Bändern	167
9.4	Boltzmann-Gleichung und Relaxationszeit	170
9.5	Die elektrische Leitfähigkeit von Metallen	174
9.6	Thermoelektrische Effekte	180
9.7	Das Wiedemann-Franz-Gesetz	183
	Tafel VIII: Quantenoszillationen und die Topologie von Fermi-Flächen .	185

10. Supraleitung

10.1	Einige Grundphänomene der Supraleitung	189
10.2	Phänomenologische Beschreibung durch London-Gleichungen	193
10.3	Instabilität des „Fermi-Sees“ und Cooper-Paare	195
10.4	Der BCS-Grundzustand	200
10.5	Konsequenzen der BCS-Theorie und Vergleich mit experimentellen Befunden	207
10.6	Suprastrom und kritischer Strom	210
10.7	Kohärenz des BCS-Grundzustandes und Meissner-Ochsenfeld Effekt . .	214
10.8	Quantisierung des magnetischen Flusses	218
10.9	Supraleiter 2. Art	220
10.10	Neuartige „Hochtemperatur“-Supraleiter	226
	Tafel IX: Einelektronen-Tunneln an Supraleitern	231
	Tafel X: Cooper-Paar Tunneln – Josephson-Effekte	238

11. Dielektrische Eigenschaften der Materie

11.1	Die dielektrische Funktion	243
11.2	Absorption elektromagnetischer Strahlung	246
	Tafel XI: Spektroskopie mit Photonen und Elektronen	249
11.3	Die dielektrische Funktion für harmonische Oszillatoren	251
11.4	Longitudinale und transversale Eigenschwingungen	253
11.5	Oberflächenwellen eines Dielektrikums	256
11.6	Das Reflexionsvermögen des dielektrischen Halbraums	258
	Tafel XII: Infrarot-Spektroskopie	259
	Tafel XIII: Die Methode der frustrierten Totalreflexion	261
11.7	Das lokale Feld	262
11.8	Polarisationskatastrophe und Ferroelektrika	264
11.9	Das freie Elektronengas	265
11.10	Interband-Übergänge	268
11.11	Exzitonen	274
11.12	Dielektrische Energieverluste von Elektronen	275

12. Halbleiter

12.1	Daten einiger wichtiger Halbleiter	279
12.2	Ladungsträgerdichte im intrinsischen Halbleiter	283
12.3	Dotierung von Halbleitern	286

12.4	Ladungsträgerdichte in dotierten Halbleitern	289
12.5	Leitfähigkeit von Halbleitern	293
	Tafel XIV: Hall-Effekt	298
	Tafel XV: Zyklotron-Resonanz bei Halbleitern	300
12.6	Der p - n Übergang	302
12.7	Halbleiterheterostrukturen und Übergitter	314
	Tafel XVI: Shubnikov-de Haas Oszillationen und Quanten-Hall-Effekt	324
	Tafel XVII: Halbleiterepitaxie	328
	Literaturverzeichnis zur Ergänzung und Vertiefung	333
	Sachverzeichnis	341
	Periodensystem der Elemente (Vordere Einbandrückseite)	
	Konstanten und Äquivalentwerte (Hintere Einbandrückseite)	