

Konrad Kopitzki †, Peter Herzog

Einführung in die Festkörperphysik

4., überarbeitete Auflage

Mit 275 Abbildungen



B. G. Teubner Stuttgart · Leipzig · Wiesbaden

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme
Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist bei
der Deutschen Bibliothek erhältlich.

Prof. Dr. rer. nat. Konrad Kopitzki †

Geboren 1926 in Sterkrade. Studium an der Universität Bonn, Diplom und Promotion bei W. Riezler. Von 1952 bis 1958 Tätigkeit in einer Metallhütte. 1965 Habilitation an der Universität Bonn. Von 1965 bis 1969 Dozent an der Universität Kabul. Seit 1970 Professor am Institut für Strahlen- und Kernphysik der Universität Bonn. Gestorben am 30. Juni 1991.

Prof. Dr. rer. nat. Peter Herzog

Geboren 1942 in Prag. Studium der Physik an der Universität Bonn. Diplom und Promotion bei E. Bodenstedt. 1975 Postdoc am Clarendon Laboratory, Universität Oxford. 1981 Habilitation an der Universität Bonn. Seit 1987 Professor am Institut für Strahlen- und Kernphysik der Universität Bonn.

1. Auflage 1986
- 2., überarbeitete und erweiterte Auflage 1989
- 3., durchgesehene Auflage 1993
- 4., überarbeitete Auflage Juni 2002

Alle Rechte vorbehalten

© B. G. Teubner GmbH, Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden, 2002

Der Verlag Teubner ist ein Unternehmen der Fachverlagsgruppe BertelsmannSpringer.
www.teubner.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

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 Waren- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Umschlaggestaltung: Ulrike Weigel, www.CorporateDesignGroup.de

ISBN 978-3-519-33083-7 ISBN 978-3-322-91792-8 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-322-91792-8

Vorwort

Eine Vorlesung über Festkörperphysik gehört heute an allen Universitäten und Technischen Hochschulen zu den Pflichtveranstaltungen für Physikstudenten nach Abschluß des Vordiploms. Der Umfang des Stoffangebots ist hierbei allerdings sehr unterschiedlich und hängt im allgemeinen von den Forschungsschwerpunkten an der jeweiligen Hochschule ab. Dieses Buch ist insbesondere für solche Studenten vorgesehen, die eine Beschäftigung mit der Festkörperphysik zwar nicht zum Schwerpunkt ihrer physikalischen Ausbildung machen wollen, jedoch mit den grundlegenden Gesetzmäßigkeiten und Betrachtungsweisen in der Festkörperphysik vertraut werden möchten. Die behandelten Themen werden in einer straffen und möglichst exakten Darstellungsweise angeboten.

Zum Verständnis des Buches werden neben einem physikalischen Grundwissen, wie es von einem Physikstudenten bis zum Vordiplom erworben wird, elementare Kenntnisse in der Atomphysik und der Quantenmechanik benötigt. Ergebnisse aus der Thermodynamik und Statistik, die in diesem Buch benutzt werden, werden kurz im Anhang erläutert. In allen Gleichungen wird grundsätzlich das internationale Maßsystem (SI) verwendet. Bei Längenangaben im atomaren Bereich mochte der Verfasser allerdings auf die praktische Einheit Ångström nicht verzichten.

Für die kritische Durchsicht des Manuskripts und für viele wertvolle Hinweise danke ich recht herzlich meinen Institutskollegen Prof. Dr. P. Herzog und Dr. G. Mertler. Frau E. Becsky fertigte den größten Teil der Zeichnungen an, und Frau Chr. Weiss schrieb das Manuskript. Auch ihnen gilt mein Dank. Schließlich danke ich dem B. G. Teubner Verlag für die gute Zusammenarbeit.
Bonn, im Juli 1986

K. Kopitzki

Vorwort zur zweiten Auflage

Bei der vorliegenden zweiten Auflage des Buches wurde der Text der fünf Kapitel der ersten Auflage an mehreren Stellen ergänzt und erweitert. Dabei wurde dem Kapitel über die magnetischen Eigenschaften der Festkörper ein Abschnitt über Spingläser hinzugefügt. Außerdem wurden den einzelnen Kapiteln jeweils einige einfache Übungsaufgaben zugeordnet. Neu hinzugekommen sind Kapitel 6 über die Supraleitung und Kapitel 7 über Legierungen. Bei der Behandlung

der mikroskopischen Theorie der Supraleitung wird ausführlich auf die Wechselwirkung zweier Leitungselektronen eingegangen. Die dort vorgenommenen Überlegungen ergänzen die Ausführungen in Kapitel 4 zur dielektrischen Funktion eines Festkörpers, indem hier auch die Wellenzahlabhängigkeit dieser Funktion erörtert wird. Im Abschnitt 7.3 über metastabile Legierungen wird u. a. die Struktur metallischer Gläser diskutiert.

Recht herzlich danke ich wiederum meinen Kollegen Prof.Dr. P. Herzog und Dr. G. Mertler für die kritische Durchsicht des Manuskripts. Dem B.G. Teubner Verlag danke ich, daß er bei der Neuauflage bereitwillig sämtliche Änderungswünsche berücksichtigte.

Bonn, im August 1989

K. Kopitzki

Vorwort zur dritten Auflage

Nach dem viel zu frühen, im Juni 1991 plötzlich erfolgten Tod meines Kollegen Prof.Dr. Konrad Kopitzki, mit dem mich freundschaftliche Zusammenarbeit verband, habe ich die Betreuung seines Buches über Festkörperphysik übernommen. In der vorliegenden dritten Auflage wurden einige dem besseren Verständnis dienende Ergänzungen eingefügt sowie eine Reihe von kleinen Fehlern korrigiert.

Für kritische Diskussionen und Hinweise danke ich meinen Kollegen Prof.Dr. K. Maier, Bonn, und Prof.Dr. P. Seidel, Jena. Dem B.G. Teubner Verlag danke ich für die gute Zusammenarbeit.

Bonn, im Dezember 1992

P. Herzog

Vorwort zur vierten Auflage

Die vierte Auflage des bewährten Buches von Konrad Kopitzki erscheint nun in $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ gesetzt. Ich hoffe, daß sich bei dieser arbeitsaufwendigen Prozedur nicht zu viele Fehler eingeschlichen haben. Neben dem optisch veränderten Erscheinungsbild wurde der Text des Buches überarbeitet. Dabei wurden viele Korrekturen, Verbesserungen und Anpassungen an den heutigen Wissensstand vorgenommen. Dadurch hat sich der Umfang des Buches etwas erhöht.

Ich danke allen, die zur Fertigstellung dieser vierten Auflage beigetragen haben. Insbesondere gilt mein Dank den Kollegen Paul Seidel, Jena, Johann Kroha, Karl Maier und Bernard Metsch, Bonn, Günter Zech, Siegen und dem Studenten Carsten Volkmann, Ingolstadt. Sie alle haben durch Diskussionen, Kommentare und Verbesserungsvorschläge wichtige Beiträge zur neuen Auflage geleistet. Dem B.G. Teubner Verlag, insbesondere Herrn Dr. Peter Spuhler, danke ich für die gute Zusammenarbeit und die gezeigte Geduld.

Bonn, im März 2002

P. Herzog

Inhalt

1	Der kristalline Zustand	13
1.1	Struktur idealer Kristalle	14
1.1.1	Raumgitter	14
1.1.2	Kristallstrukturen	19
1.1.3	Millersche Indizes	21
1.1.4	Reziprokes Gitter	24
1.1.5	Erste Brillouin-Zone	26
1.2	Kristalle als natürliche Beugungsgitter	28
1.2.1	Lauesche Gleichungen	29
1.2.2	Braggsche Reflexionsbedingung	32
1.2.3	Strukturfaktor	34
1.2.4	Debye-Waller-Faktor	39
1.2.5	Beugung von Materiewellen	40
1.3	Bindungsarten im Kristall	42
1.3.1	Ionenbindung	42
1.3.2	Kovalente Bindung	50
1.3.3	Metallische Bindung	51
1.3.4	Van-der-Waals-Bindung	51
1.3.5	Bindung über Wasserstoffbrücken	52
1.4	Fehlorderungen im Kristall	53
1.4.1	Leerstellen und Zwischengitteratome	54
1.4.2	Fremdatome in Kristallen	63
1.4.3	Farbzentren	64
1.4.4	Versetzungen	65
1.4.5	Kleinwinkelkorngrenzen und Stapelfehler	73
1.5	Untersuchung von Kristallstrukturen mit Röntgenstrahlen	74
1.5.1	Laue-Verfahren	74
1.5.2	Drehkristallverfahren	75
1.5.3	Debye-Scherrer-Verfahren	77

2	Dynamik des Kristallgitters	78
2.1	Gitterschwingungen	79
2.1.1	Eigenschwingungen von Kristallgittern mit einatomiger Basis	79
2.1.2	Phononen	84
2.1.3	Eigenschwingungen von Kristallgittern mit zweiatomiger Basis	86
2.2	Spezifische Wärme von Kristallen	89
2.2.1	Zustandsdichte im Phononenspektrum	91
2.2.2	Debyesches Näherungsverfahren	92
2.3	Anharmonische Effekte	96
2.3.1	Thermische Ausdehnung	98
2.3.2	Wärmeleitung in Isolatoren	100
2.4	Phononenspektroskopie	102
2.4.1	Inelastische Neutronenstreuung	103
2.4.2	Raman-Streuung	106
2.5	Aufgaben zu Kapitel 1 und 2	109
3	Elektronen im Festkörper	111
3.1	Modell des freien Elektronengases	112
3.1.1	Spezifische Wärme von Metallen	113
3.1.2	Wärmeleitung in Metallen	116
3.1.3	Glühemission von Elektronen aus Metallen	117
3.1.4	Metallische Bindung	120
3.2	Bändertheorie des Festkörpers	121
3.2.1	Bloch-Funktion	122
3.2.2	Näherung für quasigebundene Elektronen	127
3.2.3	Näherung für quasifreie Elektronen	132
3.2.4	Metalle, Halbmetalle, Isolatoren und Halbleiter	137
3.2.5	Fermi-Flächen von Metallen	139
3.3	Kristallelektronen in äußeren Kraftfeldern	145
3.3.1	Effektive Masse eines Kristallelektrons	146
3.3.2	Bewegung eines Kristallelektrons in einem elektrischen Feld; Defektelektronen	148
3.3.3	Bewegung eines Kristallelektrons im magnetischen Feld; Zyklotronfrequenz	151
3.3.4	Elektrische Leitfähigkeit von Metallen	154
3.3.5	Elektrische Leitung in gekreuzten elektrischen und magnetischen Feldern; Hall-Effekt	164
3.4	Halbleiter	167

3.4.1	Eigenleitung	167
3.4.2	Störstellenleitung	171
3.4.3	<i>p-n</i> -Übergang	177
3.5	Experimentelle Methoden zur Untersuchung von Halbleitern .	181
3.5.1	Hall-Effekt bei Halbleitern	182
3.5.2	Zyklotron-Resonanz bei Halbleitern	185
3.6	Quanten-Hall-Effekt	189
3.7	Aufgaben zu Kapitel 3	199
4	Dielektrische Eigenschaften der Festkörper	200
4.1	Zusammenhang zwischen Dielektrizitätskonstante und Polarisierbarkeit	201
4.1.1	Lokales elektrisches Feld	202
4.1.2	Clausius-Mossottische Gleichung	205
4.2	Elektrische Polarisierung und optische Eigenschaften von Isolatoren	206
4.2.1	Lorentzsches Oszillatormodell	206
4.2.2	Eigenschwingungen von Ionenkristallen	210
4.2.3	Optisches Verhalten von Ionenkristallen	214
4.2.4	Polaritonen	218
4.2.5	Orientierungspolarisation	219
4.3	Optische Eigenschaften von Metallen und Halbleitern	222
4.3.1	Plasmaschwingungen	224
4.3.2	Interbandübergänge	227
4.3.3	Exzitonen	228
4.4	Ferroelektrizität	230
4.4.1	Polarisationskatastrophe	233
4.4.2	Antiferroelektrizität	235
4.5	Experimentelle Methoden zur Bestimmung der dielektrischen Funktion	236
4.5.1	Kramers-Kronig-Relationen	236
4.5.2	Auswertung von optischen Reflexionsspektren	238
4.5.3	Energieverlust schneller Elektronen in einem Festkörper . . .	240
4.6	Aufgaben zu Kapitel 4	242
5	Magnetische Eigenschaften der Festkörper	243
5.1	Para- und Diamagnetismus von Isolatoren	244
5.1.1	Langevinscher Para- und Diamagnetismus	245

5.1.2	Salze der seltenen Erden und der 3d-Elemente	249
5.2	Para- und Diamagnetismus von Metallen	251
5.3	Ferromagnetismus	254
5.3.1	Molekularfeldnäherung	258
5.3.2	Spinwellentheorie	265
5.3.3	Domänenstruktur	270
5.4	Antiferromagnetismus	275
5.5	Spingläser	281
5.6	Aufgaben zu Kapitel 5	288
6	Supraleitung	289
6.1	Grundzüge der mikroskopischen Theorie der Supraleitung . .	292
6.1.1	Effektive Elektron-Elektron-Wechselwirkung	293
6.1.2	Cooper-Paare	301
6.1.3	Grundzustand und angeregte Zustände eines Supraleiters bei $T = 0$ K	305
6.1.4	Supraleitende Zustände für $T > 0$ K	312
6.1.5	Isotopieeffekt	315
6.1.6	Halbleitermodell des Supraleiters	316
6.1.7	Giaeverische Tunnelexperimente	320
6.2	Elektrodynamik des supraleitenden Zustands	326
6.2.1	Londonsche Gleichungen	326
6.2.2	Dünne supraleitende Schicht im Magnetfeld	332
6.2.3	Flußquantisierung	333
6.3	Josephson-Effekte	335
6.3.1	Josephson-Gleichungen	336
6.3.2	Josephson-Kontakt im Magnetfeld	339
6.3.3	Josephson-Kontakt im Feld von Mikrowellenstrahlung	346
6.4	Thermodynamik des supraleitenden Zustands	350
6.4.1	Freie Enthalpie des supraleitenden Zustands	352
6.4.2	Entropie und spezifische Wärme	354
6.5	Phänomenologische Theorie von Ginzburg und Landau	357
6.5.1	Ginzburg-Landau-Gleichungen	358
6.5.2	Phasengrenzenergie	363
6.5.3	Supraleiter erster Art	368
6.5.4	Supraleiter zweiter Art	375
6.6	Hochtemperatur-Supraleiter	385

6.7	Aufgaben zu Kapitel 6	390
7	Legierungen	393
7.1	Thermodynamik binärer Legierungen	394
7.1.1	Ideale Lösungen	401
7.1.2	Eutektische und peritektische Zustandsdiagramme	404
7.1.3	Intermetallische Verbindungen	409
7.1.4	Thermische Analyse	414
7.1.5	Überstrukturen	417
7.2	Kinetik der Phasenreaktionen	421
7.2.1	Darken-Gleichungen	425
7.2.2	Erstarrungsvorgänge	430
7.2.3	Ausscheidungsvorgänge	437
7.2.4	Martensitische Umwandlungen	439
7.3	Metastabile Legierungen	444
7.3.1	Struktur metallischer Gläser	447
7.3.2	Beugungsdiagramme amorpher Substanzen	451
7.3.3	Feinstrukturanalyse von Röntgenabsorptionskanten	456
7.4	Aufgaben zu Kapitel 7	457
A	Thermodynamische Gleichgewichtsbedingungen	458
B	Verteilungsfunktionen in der Boltzmann-, Bose- und Fermi- Statistik	460
	Literaturverzeichnis	470
	Sachverzeichnis	476

Symbolverzeichnis

a, b, c	Gitterkonstanten
$\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3$	Primitive Translationen des Kristallgitters
A	Austauschkonstante
\vec{A}	Vektorpotential der magnetischen Flußdichte
\vec{b}	Burgers-Vektor
$\vec{b}_1, \vec{b}_2, \vec{b}_3$	Primitive Translationen des reziproken Gitters
\vec{B}	Magnetische Flußdichte, magnetische Induktion ($\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}$) (Siehe auch Fußnote S.151.)
bcc	kubisch raumzentriert
c	Lichtgeschwindigkeit ($2,997925 \cdot 10^8 \text{ms}^{-1}$); spezifische Wärme
C	Curie-Konstante; Molwärme
d_{hkl}	Abstand zweier Netzebenen mit den Millerschen Indizes (hkl)
D	Diffusionskoeffizient
D_{hkl}	Debye-Waller-Faktor
\vec{D}	Elektrische Flußdichte ($\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}$)
e	Elementarladung ($1,60219 \cdot 10^{-19} \text{C}$)
E	Teilchenenergie
E_a, E_d	Ionisationsenergie der Akzeptoren bzw. Donatoren
E_g	Energielücke zwischen Leitungs- und Valenzband
E_F	Fermi-Energie
E_s	Energieparameter eines Zweistoffsystems
\vec{E}	Elektrische Feldstärke
f	Atomarer Streufaktor
f_0	Fermi-Funktion
F	Freie Energie
F_{hkl}	Strukturfaktor
fcc	kubisch flächenzentriert
g	Landé-Faktor; molare freie Enthalpie
\vec{g}	Vektor des reziproken Gitters ($\vec{g} = h\vec{b}_1 + k\vec{b}_2 + l\vec{b}_3$)
G	Freie Enthalpie
\vec{G}	Translationsvektor des reziproken Gitters ($\vec{G} = h_1\vec{b}_1 + h_2\vec{b}_2 + h_3\vec{b}_3$)

\hbar	Plancksches Wirkungsquantum geteilt durch 2π ($1,05459 \cdot 10^{-34}$ Js)
\vec{H}	Magnetische Feldstärke
hcp	hexagonal dichteste Kugelpackung
j	Diffusionsstromdichte; Elektrische Stromdichte; Wärmestromdichte
J	Gesamtdrehimpulsquantenzahl; Radiale Verteilungsfunktion
$k; \vec{k}$	Wellenzahl; Wellenzahlvektor
k_B	Boltzmann-Konstante ($1,380662 \cdot 10^{-23}$ JK $^{-1}$)
K	Absorptionskante; Anisotropie-Konstante
L	Avogadrosche Zahl ($6,022045 \cdot 10^{23}$ mol $^{-1}$); Bahndrehimpulsquantenzahl
m	Ruhemasse des Elektrons ($9,109534 \cdot 10^{-31}$ kg)
m_e^*, m_p^*	Effektive Masse eines Kristallelektrons bzw. Lochs
m_c	Zyklotronmasse eines Kristallelektrons
M	Masse eines Gitteratoms; Masse eines Festkörpers
\vec{M}	Magnetisierung ($\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$)
n	Elektronenzahldichte; Brechungsindex; Ordnung eines gebeugten Strahls; Hauptquantenzahl; Stoffmenge
n_e	Elektronen- bzw. Ionenahldichte
N	Gesamtteilchenzahl
N_V	Teilchenzahldichte
p	Druck; Lochzahldichte; Effektive Magnetonenanzahl; Teilchenimpuls
\vec{p}	Elektrisches Dipolmoment
\vec{P}	Elektrische Polarisierung ($\vec{D} = \epsilon_0\vec{E} + \vec{P}$)
\vec{q}	Wellenzahlvektor von Phononen
\vec{r}	Ortsvektor
R	Reflexionsvermögen
R_H	Hall-Konstante
\vec{R}	Translationsvektor des Kristallgitters ($\vec{R} = n_1\vec{a}_1 + n_2\vec{a}_2 + n_3\vec{a}_3$)
\vec{s}_0, \vec{s}	Einheitsvektor in Richtung eines einfallenden bzw. gestreuten Strahls
S	Entropie; Spinquantenzahl
\vec{S}	Spinvektor
t	Zeit
T	Absolute Temperatur
T_C	Ferromagnetische Curie-Temperatur
T_f	Spinglastemperatur
T_F	Fermi-Temperatur
T_N	Antiferromagnetische Néel-Temperatur
\vec{u}	Auslenkung eines Gitteratoms aus der Gleichgewichtslage
U	Innere Energie eines Systems; Potentielle Energie eines Kristallelektrons
V	Kristallvolumen; Wechselwirkungspotential
W	Am System geleistete Arbeit
x_A, x_B	Stoffmengengehalt der A- bzw. B-Komponente in einem Zweistoffsystem

Z	Zustandsdichte; Ordnungszahl
α	Feinstrukturkonstante ($7,29735 \cdot 10^{-3}$); Madelung-Konstante; Polarisierbarkeit
γ	Molekularfeld-Konstante
δ	Phasengrenzenergie-Parameter
2Δ	Energielücke zwischen Grundzustand und angeregten Zuständen eines Supraleiters
ϵ	Dielektrizitätskonstante ($\epsilon = 1 + \chi$)
ϵ_0	Elektrische Feldkonstante ($8,85419 \cdot 10^{-12} \text{AsV}^{-1} \text{m}^{-1}$)
ϑ	Glanzwinkel bei der Bragg'schen Reflexion
Θ	Paramagnetische Curie-Temperatur; Paramagnetische Néel-Temperatur
Θ_D	Debye-Temperatur
κ	Absorptionskoeffizient; Ginzburg-Landau-Parameter
λ	Londonsche Eindringtiefe; Wärmeleitfähigkeit; Wellenlänge
Λ	Freie Weglänge
μ	Chemisches Potential; Permeabilität ($\mu = 1 + \chi$)
μ_B	Bohrsches Magneton ($9,2741 \cdot 10^{-24} \text{JT}^{-1}$)
μ_0	Magnetische Feldkonstante ($1,256637 \cdot 10^{-6} \text{VsA}^{-1} \text{m}^{-1}$)
ν	Frequenz
ξ	Ginzburg-Landau-Kohärenzlänge
ρ	Spezifischer elektrischer Widerstand
σ	Elektrische Leitfähigkeit
τ	Relaxationszeit
Φ	Magnetischer Fluß
Φ_0	Magnetisches Flußquant ($2,0678 \cdot 10^{-15} \text{Tesla m}^2$)
χ	Elektrische Suszeptibilität; Magnetische Suszeptibilität
ψ	Eigenfunktion der Schrödinger Gleichung
ω	Kreisfrequenz
ω_c	Zyklotronfrequenz
ω_D	Debyesche Grenzfrequenz