

Konrad Kopitzki, Peter Herzog

# Einführung in die Festkörperphysik

6. Auflage



Teubner

*Teubner Studienbücher Physik*

Konrad Kopitzki, Peter Herzog

# **Einführung in die Festkörperphysik**

**Konrad Kopitzki, Peter Herzog**

# **Einführung in die Festkörperphysik**

6., überarbeitete Auflage  
Mit 275 Abbildungen



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der  
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über  
<<http://dnb.d-nb.de>> abrufbar.

**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. Ab 1970 Professor am Institut für Strahlen- und Kernphysik der Universität Bonn. 1991 verstorben.

**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 Helmholtz-Institut für Strahlen- und Kernphysik der Universität Bonn.

1. Auflage 1986

6., überarbeitete Auflage 2007

Alle Rechte vorbehalten

© B.G. Teubner GmbH Wiesbaden 2007

Lektorat: Ulrich Sandten / Kerstin Hoffmann

Der B. G. Teubner Verlag ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media.

[www.teubner.de](http://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 Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Umschlaggestaltung: Ulrike Weigel, [www.CorporateDesignGroup.de](http://www.CorporateDesignGroup.de)

Druck und buchbinderische Verarbeitung: Strauss Offsetdruck, Mörlenbach

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Printed in Germany

ISBN 978-3-8351-0144-9

# 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. Bescsky 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  $\text{\TeX}$  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

### **Vorwort zur fünften Auflage**

Nachdem die vierte Auflage eine freundliche Aufnahme im Studenten- und Kollegenkreis erfahren hat, erscheint die fünfte Auflage mit nur marginalen Korrekturen, für deren Vorschlag ich mich bei den Lesern bedanke.

Bonn, im Oktober 2004

P. Herzog

### **Vorwort zur sechsten Auflage**

Für die neue Auflage sind auch die Bilder elektronisch eingebunden worden, was das Erscheinungsbild des Buches geringfügig verändert hat. Im Text sind eine große Zahl Korrekturen sowie einige Ergänzungen vorgenommen worden, für deren Anregung ich mich bei den Lesern herzlich bedanke. Ausdrücklich möchte ich mich bei den Studenten Ali Awada, Braunschweig, und Leonard Burtscher, Würzburg, und den Kollegen Helmut Wipf, Darmstadt, sowie ganz besonders Michael Hietschold, Chemnitz, für ihre Hilfe bedanken. Herrn Dr. Michael Lang danke ich für seine Hilfe beim Einbinden der Bilder, Herrn Ronan Nedelec für die guten Ratschläge bei der Arbeit. Dem B.G. Teubner Verlag, vertreten durch Frau Kerstin Hoffmann und Herrn Ulrich Sandten, gilt mein Dank für die fruchtbare Zusammenarbeit.

Bonn, im Juni 2007

P. Herzog

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Der kristalline Zustand</b>	<b>13</b>
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 . . . . .	25
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 . . . . .	38
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 . . . . .	53
1.4.2	Fremdatome in Kristallen . . . . .	62
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 . . . . .	76

<b>2</b>	<b>Dynamik des Kristallgitters</b>	<b>78</b>
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 . . . . .	90
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
<b>3</b>	<b>Elektronen im Festkörper</b>	<b>111</b>
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 . . . . .	142
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 . . . . .	168
3.4.2	Störstellenleitung . . . . .	171
3.4.3	<i>p-n</i> -Übergang . . . . .	178
3.5	Experimentelle Methoden zur Untersuchung von Halbleitern . . . . .	182
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
<b>4</b>	<b>Dielektrische Eigenschaften der Festkörper</b>	<b>201</b>
4.1	Zusammenhang zwischen Dielektrizitätskonstante und Polarisierbarkeit . . . . .	202
4.1.1	Lokales elektrisches Feld . . . . .	203
4.1.2	Clausius-Mossottische Gleichung . . . . .	206
4.2	Elektrische Polarisation und optische Eigenschaften von Isolatoren . . . . .	207
4.2.1	Lorentzsches Oszillatormodell . . . . .	207
4.2.2	Eigenschwingungen von Ionenkristallen . . . . .	211
4.2.3	Optisches Verhalten von Ionenkristallen . . . . .	215
4.2.4	Polaritonen . . . . .	219
4.2.5	Orientierungspolarisation . . . . .	220
4.3	Optische Eigenschaften von Metallen und Halbleitern . . . . .	223
4.3.1	Plasmaschwingungen . . . . .	225
4.3.2	Interbandübergänge . . . . .	228
4.3.3	Exzitonen . . . . .	229
4.4	Ferroelektrizität . . . . .	231
4.4.1	Polarisationskatastrophe . . . . .	234
4.4.2	Antiferroelektrizität . . . . .	236
4.5	Experimentelle Methoden zur Bestimmung der dielektrischen Funktion . . . . .	237
4.5.1	Kramers-Kronig-Relationen . . . . .	237
4.5.2	Auswertung von optischen Reflexionsspektren . . . . .	239
4.5.3	Energieverlust schneller Elektronen in einem Festkörper . . . . .	240
4.6	Aufgaben zu Kapitel 4 . . . . .	243
<b>5</b>	<b>Magnetische Eigenschaften der Festkörper</b>	<b>244</b>
5.1	Para- und Diamagnetismus von Isolatoren . . . . .	245
5.1.1	Langevinscher Para- und Diamagnetismus . . . . .	246

5.1.2	Salze der seltenen Erden und der 3d-Elemente . . . . .	250
5.2	Para- und Diamagnetismus von Metallen . . . . .	252
5.3	Ferromagnetismus . . . . .	255
5.3.1	Molekularfeldnäherung . . . . .	259
5.3.2	Spinwellentheorie . . . . .	266
5.3.3	Domänenstruktur . . . . .	271
5.4	Antiferromagnetismus . . . . .	276
5.5	Spingläser . . . . .	282
5.6	Aufgaben zu Kapitel 5 . . . . .	289
<b>6</b>	<b>Supraleitung</b>	<b>290</b>
6.1	Grundzüge der mikroskopischen Theorie der Supraleitung . .	293
6.1.1	Effektive Elektron-Elektron-Wechselwirkung . . . . .	294
6.1.2	Cooper-Paare . . . . .	302
6.1.3	Grundzustand und angeregte Zustände eines Supraleiters bei $T = 0$ K . . . . .	306
6.1.4	Supraleitende Zustände für $T > 0$ K . . . . .	313
6.1.5	Isotopieeffekt . . . . .	316
6.1.6	Halbleitermodell des Supraleiters . . . . .	317
6.1.7	Giaeversche Tunnelexperimente . . . . .	321
6.2	Elektrodynamik des supraleitenden Zustands . . . . .	327
6.2.1	Londonsche Gleichungen . . . . .	327
6.2.2	Dünne supraleitende Schicht im Magnetfeld . . . . .	332
6.2.3	Flußquantisierung . . . . .	334
6.3	Josephson-Effekte . . . . .	336
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 . . . . .	351
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 . . . . .	367
6.5.4	Supraleiter zweiter Art . . . . .	375
6.6	Hochtemperatur-Supraleiter . . . . .	384

6.7	Aufgaben zu Kapitel 6 . . . . .	389
<b>7</b>	<b>Legierungen</b>	<b>392</b>
7.1	Thermodynamik binärer Legierungen . . . . .	393
7.1.1	Ideale Lösungen . . . . .	400
7.1.2	Eutektische und peritektische Zustandsdiagramme . . . . .	403
7.1.3	Intermetallische Verbindungen . . . . .	408
7.1.4	Thermische Analyse . . . . .	413
7.1.5	Überstrukturen . . . . .	416
7.2	Kinetik der Phasenreaktionen . . . . .	420
7.2.1	Darken-Gleichungen . . . . .	424
7.2.2	Erstarrungsvorgänge . . . . .	429
7.2.3	Ausscheidungsvorgänge . . . . .	436
7.2.4	Martensitische Umwandlungen . . . . .	438
7.3	Metastabile Legierungen . . . . .	443
7.3.1	Struktur metallischer Gläser . . . . .	446
7.3.2	Beugungsdiagramme amorpher Substanzen . . . . .	450
7.3.3	Feinstrukturanalyse von Röntgenabsorptionskanten . . . . .	455
7.4	Aufgaben zu Kapitel 7 . . . . .	456
<b>A</b>	<b>Thermodynamische Gleichgewichtsbedingungen</b>	<b>457</b>
<b>B</b>	<b>Verteilungsfunktionen in der Boltzmann-, Bose- und Fermi-Statistik</b>	<b>459</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>469</b>
	<b>Sachverzeichnis</b>	<b>475</b>

# 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 ( $\vec{g} = h\vec{b}_1 + k\vec{b}_2 + \ell\vec{b}_3$ )
$G$	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 $2\pi$ ( $1,05459 \cdot 10^{-34}$ 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
$L$	Avogadro'sche 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. Ionenzahldichte
$N$	Gesamtteilchenzahl
$N_V$	Teilchenzahldichte
$p$	Druck; Lochzahldichte; Effektive Magnetonenzahl; 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
$\alpha$	Feinstrukturkonstante ( $7,29735 \cdot 10^{-3}$ ); Madlung-Konstante; Polarisierbarkeit
$\gamma$	Molekularfeld-Konstante
$\delta$	Phasengrenzenergie-Parameter
$2\Delta$	Energielücke zwischen Grundzustand und angeregten Zuständen eines Supraleiters
$\epsilon$	Dielektrizitätskonstante ( $\epsilon = 1 + \chi$ )
$\epsilon_0$	Elektrische Feldkonstante ( $8,85419 \cdot 10^{-12} \text{AsV}^{-1} \text{m}^{-1}$ )
$\vartheta$	Glanzwinkel bei der Braggschen Reflexion
$\Theta$	Paramagnetische Curie-Temperatur; Paramagnetische Néel-Temperatur
$\Theta_D$	Debye-Temperatur
$\kappa$	Absorptionskoeffizient; Ginzburg-Landau-Parameter
$\lambda$	Londonsche Eindringtiefe; Wärmeleitfähigkeit; Wellenlänge
$\Lambda$	Freie Weglänge
$\mu$	Chemisches Potential; Permeabilität ( $\mu = 1 + \chi$ )
$\mu_B$	Bohrsches Magneton ( $9,2741 \cdot 10^{-24} \text{JT}^{-1}$ )
$\mu_0$	Magnetische Feldkonstante ( $1,256637 \cdot 10^{-6} \text{VsA}^{-1} \text{m}^{-1}$ )
$\nu$	Frequenz
$\xi$	Ginzburg-Landau-Kohärenzlänge
$\rho$	Spezifischer elektrischer Widerstand
$\sigma$	Elektrische Leitfähigkeit
$\tau$	Relaxationszeit
$\Phi$	Magnetischer Fluß
$\Phi_0$	Magnetisches Flußquant ( $2,0678 \cdot 10^{-15} \text{Tesla m}^2$ )
$\chi$	Elektrische Suszeptibilität; Magnetische Suszeptibilität
$\psi$	Eigenfunktion der Schrödinger Gleichung
$\omega$	Kreisfrequenz
$\omega_c$	Zyklotronfrequenz
$\omega_D$	Debyesche Grenzfrequenz

# 1 Der kristalline Zustand

In der Festkörperphysik untersucht man die physikalischen Phänomene, die mit dem festen Aggregatzustand verknüpft sind, und versucht, sie atomistisch zu erklären. Hierbei unterscheidet man zwischen kristallinem und amorphem Zustand. Eine kristalline Substanz ist dadurch gekennzeichnet, daß ihre Bausteine räumlich periodisch angeordnet sind. Eine amorphe Substanz weist im Nahbereich zwar auch eine gewisse Ordnung auf, es fehlt bei ihr aber die räumliche Periodizität über viele Atomabstände. Zu den amorphen Substanzen gehören z.B. Gläser, Keramiken und verschiedene Kunststoffe. In jüngerer Zeit haben die sog. metallischen Gläser besondere Beachtung gefunden. Man erhält sie durch eine rasche Abkühlung der entsprechenden metallischen Schmelze. Metallische Gläser haben oft bemerkenswerte physikalische Eigenschaften, die auch für technische Anwendungen ausgenützt werden können. Zu diesen Eigenschaften gehören z.B. eine große Dehnbarkeit und Bruchfestigkeit, eine von der Temperatur unabhängige elektrische Leitfähigkeit, eine hohe magnetische Permeabilität, eine kleine Koerzitivkraft und eine ungewöhnlich große Korrosionsfestigkeit. In dieser einführenden Darstellung der Festkörperphysik werden wir allerdings auf den amorphen Zustand nur kurz in Abschn.7.3 eingehen und uns im übrigen auf den kristallinen Zustand beschränken. Hierbei werden wir unsere Überlegungen gewöhnlich auf Einkristalle beziehen, obwohl viele Festkörper, vor allem Metalle, normalerweise im polykristallinen Zustand vorliegen. Ein Polykristall setzt sich aus einer großen Anzahl kleiner Einkristalle, den sog. *Kristalliten* zusammen, die unterschiedlich orientiert aneinander stoßen. Verschiedene technisch bedeutsame Materialeigenschaften werden gerade durch diese Mikrostruktur, die man in der Metallkunde als Gefüge bezeichnet, beeinflusst. In der Festkörperphysik interessiert man sich aber mehr für die durch die Kristallstruktur bedingten Eigenschaften. Diese lassen sich besser an Einkristallen untersuchen.

In Abschn.1.1 werden die grundlegenden Begriffe, die wir zur Beschreibung einer Kristallstruktur benötigen, zusammengestellt. Außerdem werden einige wichtige Kristallstrukturen besprochen. Mit der Beugung von Röntgenstrahlen, Elektronen und Neutronen am Kristallgitter befassen wir uns in Abschn.1.2. In Abschn.1.3 werden die einzelnen Bindungsarten der Atome