Teubner Studienbücher Physik

Johann Bienlein, Roland Wiesendanger

**Einführung in
die Struktur der Materie**

Johann Bienlein, Roland Wiesendanger

Einführung in die Struktur der Materie

**Kerne, Teilchen, Moleküle,
Festkörper**

B. G. Teubner Stuttgart · Leipzig · Wiesbaden

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

Prof. Dr. Johann Konrad Bienlein

Geboren 1930 in Bayreuth, Schule in Coburg, Studium und Promotion (1958) in Erlangen bei Prof. Dr. Fleischmann, dort auch Wissenschaftlicher Assistent und Habilitation.

Weitere wissenschaftliche Tätigkeiten am Oak Ridge National Laboratory/TN/USA und bei CERN/Genf, 1967 Berufung als Leitender Wissenschaftler zu DESY/Hamburg, 1971 Professor an der Universität Hamburg, Gastaufenthalte bei CERN/Genf, Stanford/CA/USA und der ETH-Zürich/Schweiz. 1998 Honorarprofessor am Henryk Niewodniczanski Institut für Kernphysik in Krakau/Polen

Prof. Dr. Roland Wiesendanger

Geboren 1961 in Basel, Schweiz. Physikstudium, Promotion und Habilitation in Experimenteller Physik an der Universität Basel. Seit 1993 Professor am Institut für Angewandte Physik und Zentrum für Mikrostrukturforschung der Universität Hamburg. Seit 1998 Leitung des Kompetenzzentrums Nanoanalytik. Zahlreiche Auszeichnungen: Gaede-Preis 1992, Max Auwärter-Preis 1992, Karl Heinz Beckurts-Preis 1999, Mitglied der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina 2000, Philip Morris-Preis 2003 u.a.

1. Auflage April 2003

Alle Rechte vorbehalten

© B. G. Teubner / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2003

Der B. G. Teubner Verlag 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 Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Umschlaggestaltung: Ulrike Weigel, www.CorporateDesignGroup.de

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Vorwort

Wohl in keinem Kurs des Curriculums der Physik sind die Lernziele so vielfältig wie in der *“Einführung in die Struktur der Materie”*. Viele physikalische Ergebnisse und Methoden müssen übersichtsmäßig behandelt werden. Die physikalischen Grundlagen sollen klar herausgestellt werden. Und schließlich soll ein Einblick in das experimentelle und theoretische Handwerkszeug vermittelt werden. Bei der Breite des Stoffs werden öfters qualitative Vorstellungen zur Erläuterung herangezogen – wie dies auch in der Forschung oft der erste Schritt ist. Aber auch die quantitative Beschreibung darf nicht vergessen werden – sie ist schließlich das Ziel der Physik.

Was wird vorausgesetzt? Neben Physik I und II (Mechanik, Elektrizitätslehre und Optik, Wärmelehre und statistische Physik) ist die Atomphysik einschliesslich der Grundlagen der Quantenmechanik (Physik III) eine unerläßliche Voraussetzung.

Die *Ziele* des Buchs sind:

1. Beschreibung der grundlegenden Phänomene der Struktur der Materie,
2. Einführung in die Meßmethoden (wirklich experimentieren lernt man allerdings nur im Praktikum und in der Diplomarbeit),
3. anschauliches Verständnis der Theorie (nicht der Rechentechniken),
4. Hinweise auf einige Anwendungen der Physik in anderen Gebieten.

Die Forschung ist vernetzt. Deshalb wird den Kapiteln der Kern- und Teilchenphysik zunächst ein Überblick an Hand der geschichtlichen Entwicklung vorangestellt. Dadurch wird die Vernetzung der Gebiete sowie von Experimenten, experimenteller Technik und theoretischen Ideen und Rechnungen klar. Der Weg der Forschung, der zu den wesentlichen Entdeckungen (oft auf Umwegen) geführt hat, wird deutlich. Danach kann der Stoff systematisch behandelt werden. Es wird möglich, im Text auf spätere Kapitel zu verweisen, wo ein Begriff, der vorher gebraucht wurde, ausführlich begründet wird. In den Kapiteln der Molekül- und Festkörperphysik erfolgt eine Beschränkung auf die wesentlichsten Grundlagen, die als Voraussetzung für weiterführende Spezialvorlesungen benötigt werden.

An wen wendet sich das Buch? Die Autoren denken in erster Linie an Physikstudenten vor oder kurz nach dem Vordiplom bzw. an Studenten im Bachelor-Studiengang, die sich einen Überblick über die verschiedenen Gebiete der Physik verschaffen wollen, bevor sie speziellere Vorlesungen zu den einzelnen Gebieten im Rahmen des Aufbaustudiums bzw. Master-Studiengangs hören. Diese spezielleren Vorlesungen werden sich wiederum an den Forschungsschwerpunkten der jeweiligen Hochschule ausrichten. Der Stoffumfang dieses Buchs orientiert sich an einer vierstündigen einsemestrigen Vorlesung mit zwei Übungsstunden pro Woche. Aber auch für Gymnasiallehrer und Physiker in der Industrie wird das vorliegende Buch als Nachschlagewerk nützlich sein.

Welches *Niveau* strebt das Buch an? Der Ausgangspunkt sind experimentelle Beobachtungen. Diese werden theoretisch beschrieben. Formeln verdeutlichen einen physikalischen Sachverhalt am besten. Oft können nur die physikalischen Vorstellungen, die zu Grunde liegen, erläutert werden. Dann wird die Formel angegeben und benutzt. Eine Ableitung von Formeln kann nur in wenigen Fällen erfolgen.

Hinweise für den Leser

1. *Lernziele:* Jedem Abschnitt wurde ein Kasten mit „*Lernzielen*“ vorangestellt. Darin wird der Inhalt des Abschnitts zusammengefaßt.

2. *Aufgaben:* Die Aufgaben haben unterschiedliche Schwierigkeitsgrade. Teilweise dienen sie dem quantitativen Verständnis der Formeln, teilweise soll die Auslegung von Experimenten überlegt werden. Wieder andere sind Denkaufgaben. Nach Möglichkeit wurde zu jedem wichtigen Themenfeld eine Aufgabe beigelegt.

Der Rahmen einer Vorlesung und eines Buchs ist beschränkt. Weiterführende Literatur ist angegeben. Ferner sind die genauen Zitate in einem gesonderten Literaturverzeichnis zu finden.

Dank: Johann Bienlein dankt zuerst seinem Doktorvater, Prof. Dr. Rudolf Fleischmann (Erlangen, 1903–2002), der das rechte Maß zwischen Anleitung und Freiheit der jungen Studenten einzuhalten wußte. Ferner gilt sein Dank Freunden und Kollegen auf den verschiedenen Etappen des Berufswegs. Hervorheben möchte er Prof. Dr. Horst Wegener (Erlangen) und Prof. Dr. Peter Stähelin (Hamburg). Nicht zu vergessen sind die Studenten, die im Gespräch Ideen und Formulierungen geschärft haben. Ein ganz besonderer Dank gilt seinem Kollgen Dr. Dieter Haidt für die kritische Durchsicht des Manuskripts und wertvollen Anregungen.

Roland Wiesendanger möchte mit diesem Buch seinem Physiklehrer Bernd Kretschmer danken, der es in hervorragender Weise verstanden hat, In-

teresse und Begeisterung für die Physik zu wecken. Höchster Dank gilt schließlich Prof. Dr. Gerd Binnig und Dr. Heinrich Rohrer, die mit Ihrer Erfindung des Rastertunnelmikroskops ein neues Zeitalter der Festkörperphysik begründet haben.

Das Buch hätte nicht erstellt werden können ohne die *tatkräftige Mithilfe* von Frau Angela Balbach und Frau Ursula Rehder sowie den Herren Dr. Mathias Getzlaff, Stefan Kuck, Boris Prinz und André Rothkirch. Dem Teubner-Verlag danken wir für die ausgezeichnete Zusammenarbeit.

Schließlich möchten wir unseren Familien danken:

Frau Melanie Bienlein-Röllin und den Kindern Barbara, Regula und Martin, sowie Frau Silvia Wiesendanger und den Kindern Pascal und Dominik. Ihre große Geduld und stetige Ermunterung haben dieses Buch erst ermöglicht.

Hamburg, im November 2002

Johann Bienlein

Roland Wiesendanger

Inhalt

1	Grundlagen der Struktur der Materie	1
1.1	Was heißt "Struktur der Materie"?	1
1.2	Grundlagen der Quantenmechanik	3
1.2.1	Welle-Teilchen Dualismus	3
1.2.2	Die Schrödinger-Gleichung	6
1.2.3	Bahndrehimpuls und Spin	8
1.2.4	Das Pauli-Prinzip	10
1.2.5	Aufgaben	10
1.3	Beispiele für Anwendungen der Quantenmechanik	11
1.3.1	Der Tunneleffekt	11
1.3.2	Gebundener Zustand (Teilchen im Potential)	12
1.3.3	Aufgaben	15
1.4	Störungsrechnung	16
1.4.1	Aufgaben	17
1.5	Das Dipolmatrixelement	18
1.5.1	Aufgaben	19
1.6	Streuprozesse	20
1.6.1	Grundbegriffe	20
1.6.2	Streuung und Reaktionen von Teilchen	22
1.6.3	Die Rutherford'sche Streuformel	23
1.6.4	Quantenmechanische Beschreibung der Streuung	26
1.6.5	Aufgaben	27
1.7	Kinematik	28
1.7.1	Überblick	28
1.7.2	Relativistische Koordinatentransformation	28
1.7.3	Transformation vom Labor- ins Schwerpunktsystem	30
1.7.4	Relativistisch invariante Größen	32
1.7.5	Kinematischer Fit an Meßergebnisse	33
1.7.6	Aufgaben	34

1.8	Ausblick auf die Struktur der Materie	35
2	Konzepte und Instrumente der Kern- und Teilchenphysik	36
2.1	Konzepte der Kernphysik	36
2.1.1	Von der Entdeckung der Radioaktivität bis zum Neutron .	37
2.1.2	Aufklärung der Kernstruktur und der Kernreaktionen . . .	38
2.2	Konzepte der Teilchenphysik	43
2.2.1	Die Vorläufer und ihre Resultate	44
2.2.2	Teilchenphysik der Hadronen	47
2.2.3	Teilchenphysik der Quarks (seit 1974)	50
2.3	Experimentelle Hilfsmittel: Teilchenbeschleuniger	54
2.3.1	Warum Teilchenbeschleuniger?	54
2.3.2	Prinzip der Teilchenbeschleuniger	55
2.3.3	Aufbau der wichtigsten Beschleunigerarten	56
2.3.4	Beschleunigerphysik	60
2.3.5	Speicherringe	63
2.3.6	Beispiel eines Beschleunigerkomplexes	66
2.3.7	Aufgaben	69
2.4	Experimentelle Hilfsmittel: Teilchendetektoren	70
2.4.1	Prinzip des Teilchennachweises	70
2.4.2	Ionisation der Materie	71
2.4.3	Teilchennachweis	78
2.4.4	Statistik	83
2.4.5	Große Detektoren	86
2.4.6	Datenerfassung und -verarbeitung	89
2.4.7	Strahlengefährdung und Strahlenschutz	92
2.4.8	Aufgaben	102
3	Kernphysik	104
3.1	Radioaktivität	104
3.1.1	Aufgaben	106
3.2	Kerne und Kernbausteine	107
3.2.1	Die Entdeckung des Atomkerns	107
3.2.2	Isotopie	108
3.2.3	Die Kernbausteine	109
3.2.4	Aufgaben	109
3.3	Systematik des Grundzustandes der Kerne	110
3.3.1	Die Nuklidkarte	110
3.3.2	Massendefekt und Bindungsenergie	112

3.3.3	Erklärung der Bindungsenergie im Tröpfchenmodell	113
3.3.4	Stabile und instabile Kerne	114
3.3.5	Der Kernspin	115
3.3.6	Die magnetischen Momente der Kerne	116
3.3.7	Kernradien	118
3.3.8	Aufgaben	120
3.4	Kernkräfte	121
3.4.1	Die Kernkraft als neues Phänomen	121
3.4.2	Das Deuteron	122
3.4.3	Nukleon-Nukleon-Streuung	125
3.4.4	Mesonentheorie der Kernkräfte	127
3.4.5	Aufgaben	128
3.5	Kernreaktionen	129
3.5.1	Begriffe und Definitionen	129
3.5.2	Erhaltungssätze	130
3.5.3	Messung von Kernreaktionen	131
3.5.4	Theoretische Beschreibung von Kernreaktionen	132
3.5.5	Mechanismus von Kernreaktionen	135
3.5.6	Aufgaben	139
3.6	Kernspektroskopie und Kernmodelle	140
3.6.1	Experimente zur Kernspektroskopie	140
3.6.2	Grundlagen der Kernstruktur	144
3.6.3	Das Schalenmodell	145
3.6.4	Das Kollektivmodell	150
3.6.5	Das statistische Modell	151
3.6.6	Kernmaterie	152
3.6.7	Aufgaben	153
3.7	Neutronenphysik	155
3.7.1	Neutronenquellen	155
3.7.2	Abbremsung von Neutronen	157
3.7.3	Kernreaktionen von Neutronen	158
3.7.4	Kernspaltung	159
3.7.5	Neutronendosimetrie und -abschirmung	161
3.7.6	Quantenzustände der Neutronen im Gravitationsfeld	162
3.7.7	Aufgaben	164
3.8	Betazerfall	167
3.8.1	Was ist der Betazerfall?	167
3.8.2	Die Messung des Elektronenspektrums	168
3.8.3	Das Neutrino	170

3.8.4	Die Fermi-Theorie des Betazerfalls	170
3.8.5	Positronenemission, Elektroneneinfang, Rückstoßexperimente	173
3.8.6	Kern- β -Zerfälle	173
3.8.7	Was ist Paritätsverletzung?	175
3.8.8	Messung der Elektronenpolarisation	176
3.8.9	Die Form der Wechselwirkung des β -Zerfalls	178
3.8.10	Das Goldhaber-Experiment	178
3.8.11	Aufgaben	180
3.9	Neue Trends der Kernphysik	181
3.9.1	Kerne mit seltsamen Bausteinen ⁸	181
3.9.2	Schwerionenphysik	182
3.9.3	Transurane und die "Insel der Stabilität"	183
3.9.4	Streuung hochenergetischer Elektronen an Kernen	186
3.9.5	Aufgaben	190
3.10	Beispiele für Anwendungen der Kernphysik	191
3.10.1	Meßtechnik	192
3.10.2	Anwendungen in der Medizin	194
3.10.3	Kernreaktoren	199
3.10.4	Aufgaben	209
4	Teilchenphysik	211
4.1	Quantenelektrodynamik	211
4.1.1	Was ist Quantenelektrodynamik?	212
4.1.2	Antiteilchen	213
4.1.3	Feynman-Graphen	216
4.1.4	Einige QED Prozesse	220
4.1.5	Positronium	224
4.1.6	Renormierung der QED	225
4.1.7	Gültigkeitsgrenzen der QED	227
4.1.8	Aufgaben	228
4.2	Hadronische Reaktionen	230
4.2.1	Die Entdeckung des Pions	230
4.2.2	Die Entdeckung seltsamer Teilchen	232
4.2.3	Die Entdeckung der Antiprotonen ($\bar{p}$)	233
4.2.4	Der Spin der Hadronen	234
4.2.5	Erhaltungssätze bei Teilchenreaktionen	235
4.2.6	Die invariante Masse instabiler Teilchen	237
4.2.7	Wirkungsquerschnitte bei hohen Energien	239
4.2.8	Aufgaben	245

4.3	Hadronenspektroskopie und Quarks	247
4.3.1	Multipletts von Hadronen	247
4.3.2	Die Quarks	250
4.3.3	Aufbau der Hadronen aus Quarks	251
4.3.4	Hadronische Zerfälle der Resonanzen	253
4.3.5	Suche nach freien Quarks	254
4.3.6	Aufgaben	254
4.4	Lepton-induzierte Reaktionen	256
4.4.1	Überblick	256
4.4.2	Tief-inelastische Elektronstreuung	257
4.4.3	Entdeckung der Partonen	263
4.4.4	Aufgaben	264
4.5	Quantenchromodynamik	267
4.5.1	Experimentelle Grundlagen der QCD	268
4.5.2	Theorie der QCD	268
4.5.3	Experimentelle Bestätigung der QCD	271
4.5.4	Das Hadronenspektrum im Lichte der QCD	276
4.5.5	Die Struktur der Nukleonen	277
4.5.6	Das Quark-Gluon-Plasma	282
4.6	Schwere Quarks und Hadronen	290
4.6.1	Entdeckung der Charme- und Bottom-Quarks	290
4.6.2	Quarkonia	296
4.6.3	Hadronen mit Charme- und Bottom-Flavor	301
4.6.4	Aufgaben	302
4.7	Schwache Wechselwirkung und CP-Verletzung	304
4.7.1	Überblick	305
4.7.2	Der μ -Zerfall	306
4.7.3	Die π -Zerfälle	307
4.7.4	Zerfälle seltsamer Teilchen	308
4.7.5	Das τ -Lepton	309
4.7.6	Die Neutrino-Experimente	311
4.7.7	Zerfälle der Charme- und Bottom-Hadronen	317
4.7.8	Die CKM-Matrix	319
4.7.9	K^0 -Zerfälle und CP-Verletzung	321
4.7.10	Aufgaben	328
4.8	Elektroschwache Wechselwirkung	331
4.8.1	Divergenz der Fermi-Theorie	331
4.8.2	Die Entdeckung der neutralen schwachen Wechselwirkung	333
4.8.3	Vereinheitlichung zur elektroschwachen Wechselwirkung	334

4.8.4	Experimentelle Bestätigung der elektroschwachen Theorie	337
4.8.5	Messungen mit Z^0 -Zerfällen	341
4.8.6	Der Higgs-Mechanismus	342
4.8.7	Entdeckung des Top-Quarks	343
4.8.8	Neutrino-Oszillationen	346
4.8.9	Aufgaben	349
4.9	Standardmodell und Ausblick	351
4.9.1	Zusammenfassung: Teilchen und Wechselwirkungen	352
4.9.2	Eichtheorien	353
4.9.3	Fragen an das Standardmodell	354
4.9.4	Vorschläge für eine Erweiterung der Standardmodells	355
4.9.5	Grundfrage der Teilchenphysik	356
4.9.6	Aufgaben	357
4.10	Der Wissenschaftsbetrieb der Teilchenphysik	358
4.11	Kosmische Strahlung	360
4.11.1	Die Entdeckung der kosmischen Strahlung	360
4.11.2	Die kosmische Strahlung auf Meereshöhe	361
4.11.3	Die primäre kosmische Strahlung	363
4.11.4	Astroteilchenphysik	368
4.11.5	Aufgaben	372
4.12	Astrophysik: Neutrinos von der Sonne	374
4.12.1	Woher bezieht die Sonne die Energie?	374
4.12.2	Grundbegriffe der Astrophysik	375
4.12.3	Energie-Erzeugung durch Kernfusion	379
4.12.4	Neutrino-Emission bei der solaren Kernfusion	381
4.12.5	Beobachtung der solaren Neutrinos	383
4.12.6	Messung der ν -Oszillationen und des totalen ν -Flusses durch SNO	388
4.12.7	Eine Lehre für die Wissenschaftler	391
4.12.8	Aufgaben	391
5	Molekülphysik	392
5.1	Einführung	392
5.2	Die einfachsten Moleküle: H_2^+ und H_2	394
5.2.1	H_2^+ - Molekülion	394
5.2.2	Das H_2 - Molekül	399
5.3	Verschiedene Näherungsverfahren	399
5.3.1	Molekülorbital-Näherung	399

Inhalt	XV
5.3.2	Heitler-London-Näherung 401
5.3.3	Vergleich zwischen Molekülorbital-Näherung und Heitler-London-Näherung 404
5.3.4	Näherung der Valenzbindung 405
5.4	Hybridisierung 406
5.5	Arten der chemischen Bindung 409
5.5.1	Kovalente Bindung 410
5.5.2	Ionische Bindung 411
5.5.3	Metallische Bindung 411
5.5.4	Wasserstoffbrücken-Bindung 411
5.5.5	Van-der-Waals-Bindung 411
5.6	Empirische Wechselwirkungspotentiale 413
5.7	Molekulare Anregungen 415
5.7.1	Elektronische Anregung 415
5.7.2	Vibrations-/ Schwingungsanregung 416
5.7.3	Rotationsbewegung 418
5.7.4	Molekülspektrum 420
5.7.5	Aufgaben 423
6	Festkörperphysik 425
6.1	Einführung 425
6.2	Chemische Bindung in Festkörpern 428
6.3	Festkörperstruktur 432
6.3.1	Beschreibung von Kristallstrukturen (Kristallographie) . . 432
6.3.2	Aufgaben 442
6.3.3	Experimentelle Bestimmung von Kristallstrukturen . . . 443
6.3.4	Aufgaben 460
6.4	Einteilung der Festkörperphysik 462
6.5	Gitterdynamik 464
6.5.1	Gitterschwingungen in einer eindimensionalen periodischen Struktur 467
6.5.2	Gitterschwingungen in einer dreidimensionalen periodischen Struktur 471
6.5.3	Wechselwirkungsfreies Phononengas 474
6.5.4	Phononenzustandsdichte 477
6.5.5	Experimentelle Bestimmung der Phononendispersion und der Phononenzustandsdichte 481
6.5.6	Spinwellen 485

6.5.7	Aufgaben	486
6.6	Makrosk. Festkörpereigenschaften im thermodyn. Gleichgewicht	487
6.6.1	Einteilung	488
6.6.2	Thermische Eigenschaften des Kristallgitters	489
6.6.3	Aufgaben	493
6.7	Makrosk. Festkörpereigenschaften außerhalb des thermodyn. Gleichgew.	494
6.7.1	Einteilung	494
6.7.2	Wärmeleitung des Kristallgitters	494
6.8	Wechselwirkungsfreies Elektronengas	496
6.8.1	Grundzustand des Elektronengases für $T = 0$	499
6.8.2	Elektronengas bei endlicher Temperatur ($T > 0$)	501
6.8.3	Thermische Eigenschaften des Elektronengases	503
6.8.4	Elektrische Transporteigenschaften des Elektronengases	505
6.8.5	Magnetische Eigenschaften des Elektronengases	507
6.8.6	Aufgaben	511
6.9	Elektronen im periodischen Potential	513
6.9.1	Blochtheorem	514
6.9.2	Bandstruktur	515
6.9.3	Elektronenzustandsdichte	518
6.9.4	Halbleiter	522
6.9.5	Aufgaben	525
6.10	Supraleitung	527
7	Weiterführende Literatur	533
	Literaturverzeichnis	535
A	Einheiten, Konstanten und Formeln	538
A.1	Einheiten	538
A.2	Wichtige Konstanten und Umrechnungsfaktoren	539
A.3	Präfixe für Vielfache und Teile von Einheiten	540
A.4	Abkürzungen	540
	Sachverzeichnis	546