

# Springer-Lehrbuch

---

**Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH**

Bogdan Povh Klaus Rith  
Christoph Scholz Frank Zetsche

---

# Teilchen und Kerne

Eine Einführung  
in die physikalischen Konzepte

Vierte, überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 144 Abbildungen, 12 Tabellen  
und 39 Übungsaufgaben mit Lösungen



Springer

**Professor Dr. Bogdan Povh**  
Max-Planck-Institut für Kernphysik  
Postfach 10 39 80, D-69029 Heidelberg

**Professor Dr. Klaus Rith**  
Physikalisches Institut der Universität Erlangen-Nürnberg  
Erwin-Rommel-Straße 1, D-91058 Erlangen

**Dr. Christoph Scholz**  
SAP AG  
Postfach 14 61, D-69185 Walldorf

**Dr. Frank Zetsche**  
II. Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg  
Luruper Chaussee 149, D-22761 Hamburg

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

**Teilchen und Kerne** : eine Einführung in die physikalischen Konzepte ; mit 12 Tabellen und 39 Übungsaufgaben mit Lösungen / Bogdan Povh ... - 4., überarb. und erw. Aufl. - Berlin ; Heidelberg ; New York ; Barcelona ; Budapest ; Hong Kong ; London ; Mailand ; Paris ; Santa Clara ; Singapur ; Tokio : Springer, 1997  
(Springer-Lehrbuch)

NE: Povh, Bogdan

ISBN 978-3-540-61737-2      ISBN 978-3-662-10281-7 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-662-10281-7

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk- sendung, 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 1993, 1994, 1995, 1997  
Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1997.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk be- rechtigt 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 jeder- mann benutzt werden dürften.

Satz: Reproduktionsfähige Vorlage der Autoren mit Springer T<sub>E</sub>X-Makros  
Einbandgestaltung: *design & production* GmbH, Heidelberg  
SPIN: 10551053      55/3144-543210 – Gedruckt auf säurefreiem Papier

# Vorwort zur vierten Auflage

Mit einem Kapitel über *Nukleare Thermodynamik* haben wir unserer Einführung in die Kern- und Teilchenphysik eine abrundende Ergänzung angefügt. Dieses Kapitel behandelt das Verhalten der Materie bei hohen Temperaturen, wie man sie teilweise im Labor bei Schwerionenkollisionen studieren kann und wie sie — wahrscheinlich in viel höherem Maße — in der Anfangsphase des Universums herrschten. Solche Materiezustände lassen sich mit thermodynamischen Größen beschreiben und deuten. Damit läßt sich der bedeutsame Brückenschlag zu aktuellen Forschungsgebieten wie Kosmologie und Astrophysik herstellen.

Weitere kleine Verbesserungen und Ergänzungen flossen in die Überarbeitung des Buches ein. Wir danken insbesondere J. Pochodzalla (Heidelberg) und H. A. Weidenmüller (Heidelberg) für ihre Anmerkungen zum neuen Kapitel sowie allen Studenten und Dozenten für ihre hilfreichen Kommentare. Nicht zuletzt sei dem Springer-Verlag für das Engagement gedankt, welches zur Ausgabe der vierten Auflage geführt hat.

Heidelberg, Juli 1996

*Die Autoren*

# Vorwort zur ersten Auflage

TEILCHEN UND KERNE basiert auf einer Kursvorlesung über Kern- und Teilchenphysik an der Universität Heidelberg für Studenten im 6. Semester und vermittelt das Grundwissen des Diplomphysikers auf diesem Gebiet.

Unsere Grundidee besteht darin, eine einheitliche Darstellung von Kern- und Teilchenphysik zu geben, weil sich gezeigt hat, daß die Experimente, die besonders geeignet sind, Substrukturen in Atomkernen und Nukleonen aufzudecken, konzeptionell ähnlich sind. Mit der fortschreitenden Entwicklung der experimentellen und theoretischen Methoden wurden in diesem Jahrhundert nach und nach Atome, Kerne, Nukleonen und schließlich Quarks analysiert. Die intuitive Annahme, daß unsere komplexe Welt aus einigen wenigen Bausteinen aufgebaut ist – eine Idee, die attraktiv erscheint, keineswegs aber selbstverständlich ist – scheint sich zu bestätigen. Mehr noch, auch die Wechselwirkungen zwischen diesen Bausteinen der Materie lassen sich im sogenannten „Standardmodell“ elegant formulieren und konzeptionell einfach verstehen.

Auf diesem Wissensstand über die Struktur der Materie angelangt, kann man nun darangehen, eine Synthese zu betreiben und zusammengesetzte Systeme aus elementaren aufzubauen. Auf dem Weg von den elementaren Bausteinen über die Nukleonen zu den Kernen lernen wir, daß die „fundamentalen“ Gesetze der Wechselwirkung zwischen den Grundbausteinen in den zusammengesetzten Systemen immer weniger zu erkennen sind, weil durch die Vielkörperwechselwirkung eine Komplexität entsteht, die in immer größerem Maße auch die Gesetzmäßigkeiten dieser Systeme bestimmt.

Dieses Buch ist daher in zwei Teile unterteilt. Im ersten Teil beschäftigen wir uns mit der Reduktion der komplex aufgebauten Materie auf wenige Grundbausteine und Wechselwirkungen, im zweiten Teil mit dem Aufbau größerer Systeme aus ihren Grundbestandteilen.

Wo immer es möglich ist, verweisen wir auf Ähnlichkeiten in Atomen, Kernen und Hadronen, denn das Arbeiten mit Analogien hat sich nicht nur in der Forschung als außerordentlich fruchtbar erwiesen, sondern ist auch besonders geeignet, das Verständnis der zugrundeliegenden Physik zu fördern.

Wir legen Wert auf die Darstellung der Konzeption von Experimenten, verzichten aber weitgehend auf die Erläuterung technischer Details. Ein Anhang enthält in Stichworten eine kurze Beschreibung der Prinzipien von Beschleunigern und Detektoren. Die Übungsaufgaben haben in erster Linie den Zweck, dem Lernenden eine Vorstellung von den Größenordnungen der Phänomene in der Kern- und Teilchenphysik zu vermitteln.

Wir haben eine straffe Darstellung gewählt, aber darauf geachtet, daß alle wesentlichen Konzepte in einer verständlichen Weise dargestellt wurden. Bei der Auswahl des Lehrstoffes haben wir uns vor allem von pädagogischen Erwägungen leiten lassen. Daher schildern wir solche Experimente, die sich aus heutiger Sicht am einfachsten interpretieren lassen. Viele historisch bedeutsame Experimente, deren Ergebnisse heutzutage auf einfachere Weise erreicht werden können, haben wir bewußt weggelassen.

Unser Dank gilt besonders J. Hüfner (Heidelberg) und M. Rosina (Ljubljana) für ihre wertvollen Beiträge zum kernphysikalischen Teil des Buches. Für kritische Durchsicht und hilfreiche Kommentare zu einzelnen Kapiteln danken wir D. Dubbers (München), A. Fäßler (Tübingen), G. Garvey (Los Alamos), H. Koch (Bochum), K. Königsmann (Heidelberg), U. Lynen (GSI Darmstadt), G. Mairle (Mannheim), O. Nachtmann (Heidelberg), H. J. Pirner (Heidelberg) und B. Stech (Heidelberg). Viele Heidelberger Studenten, die in den Sommersemestern 1991 und 1992 die Vorlesung besuchten, haben uns durch ihre Kritik geholfen, Fehler zu beseitigen und wenig verständliche Passagen zu verbessern. Insbesondere wollen wir M. Beck, Ch. Büscher, S. Fabian, Th. Haller, A. Laser, A. Mücklich und E. Wittmann erwähnen.

Die Herstellung der großen Zahl der Abbildungen wurde nur möglich durch den unermüdlichen Einsatz der Damen des Fotolabors und des Zeichenbüros des Max-Planck-Instituts für Kernphysik. Wir danken V. Träumer, E. Stier, S. Schellander und E. Seitz für ihr Verständnis bei den vielen Änderungen und wiederholten Verbesserungen.

Dem Springer-Verlag danken wir für die gute Zusammenarbeit, insbesondere W. Beiglböck für seine Unterstützung und Beratung bei der Planung und Erstellung dieses Buches.

Heidelberg, April 1993

*Bogdan Povh*  
*Klaus Rith*  
*Christoph Scholz*  
*Frank Zetsche*

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Hors d'œuvre</b>	1
1.1 Grundbausteine der Materie	1
1.2 Die fundamentalen Wechselwirkungen	3
1.3 Symmetrien und Erhaltungssätze	5
1.4 Experimente	5
1.5 Einheiten	7

## I Analyse: Bausteine der Materie

<b>2. Globale Eigenschaften der Kerne</b>	11
2.1 Das Atom und seine Bausteine	11
2.2 Nuklide	13
2.3 Parametrisierung der Bindungsenergien	19
2.4 Ladungsunabhängigkeit der Kernkraft und Isospin	22
<b>3. Stabilität der Kerne</b>	25
3.1 $\beta$ -Zerfall	26
3.2 $\alpha$ -Zerfall	31
3.3 Kernspaltung	34
3.4 Zerfall angeregter Kernzustände	36
<b>4. Streuung</b>	41
4.1 Allgemeine Betrachtung von Streuprozessen	41
4.2 Wirkungsquerschnitt	44
4.3 Die „Goldene Regel“	48
4.4 Feynman-Diagramme	50
<b>5. Geometrische Gestalt der Kerne</b>	53
5.1 Kinematik der Elektronenstreuung	53
5.2 Der Rutherford-Wirkungsquerschnitt	55
5.3 Der Mott-Wirkungsquerschnitt	60
5.4 Formfaktoren der Kerne	61
5.5 Inelastische Kernanregungen	69



<b>6. Elastische Streuung am Nukleon</b> . . . . .	71
6.1 Formfaktoren des Nukleons . . . . .	71
6.2 Quasielastische Streuung . . . . .	76
6.3 Ladungsradius von Pionen und Kaonen . . . . .	79
<b>7. Tiefinelastische Streuung</b> . . . . .	81
7.1 Angeregte Nukleonzustände . . . . .	81
7.2 Strukturfunktionen . . . . .	83
7.3 Das Partonmodell . . . . .	87
7.4 Interpretation der Strukturfunktionen im Partonmodell . . . . .	89
<b>8. Quarks, Gluonen und starke Wechselwirkung</b> . . . . .	93
8.1 Quarkstruktur der Nukleonen . . . . .	93
8.2 Quarks in Hadronen . . . . .	98
8.3 Quark-Gluon-Wechselwirkung . . . . .	99
8.4 Skalenbrechung der Strukturfunktionen . . . . .	103
<b>9. Teilchenerzeugung in <math>e^+e^-</math>-Kollisionen</b> . . . . .	109
9.1 Erzeugung von Leptonpaaren . . . . .	110
9.2 Resonanzen . . . . .	115
9.3 Nichtresonante Erzeugung von Hadronen . . . . .	119
9.4 Gluonenabstrahlung . . . . .	121
<b>10. Phänomenologie der schwachen Wechselwirkung</b> . . . . .	123
10.1 Leptonfamilien . . . . .	123
10.2 Typen der schwachen Wechselwirkung . . . . .	126
10.3 Kopplungsstärke des geladenen Stromes . . . . .	129
10.4 Quarkfamilien . . . . .	133
10.5 Paritätsverletzung . . . . .	136
10.6 Tiefinelastische Neutrinostreuung . . . . .	139
<b>11. Austauschbosonen der schwachen Wechselwirkung</b> . . . . .	143
11.1 Reelle W- und Z-Bosonen . . . . .	143
11.2 Die elektroschwache Vereinheitlichung . . . . .	148
<b>12. Das Standardmodell</b> . . . . .	157
 <b>II Synthese: Zusammengesetzte Systeme</b>	
<b>13. Quarkonia</b> . . . . .	163
13.1 Wasserstoffatom und Positronium als Analog . . . . .	163
13.2 Charmonium . . . . .	166
13.3 Quark-Antiquark-Potential . . . . .	169
13.4 Farbmagnetische Wechselwirkung . . . . .	172
13.5 Bottonium und Toponium . . . . .	174

13.6 Zerfallskanäle schwerer Quarkonia . . . . .	175
13.7 Test der QCD aus der Zerfallsbreite . . . . .	178
<b>14. Mesonen aus leichten Quarks . . . . .</b>	<b>181</b>
14.1 Mesonmultipletts . . . . .	181
14.2 Massen der Mesonen . . . . .	185
14.3 Zerfallskanäle . . . . .	187
14.4 Zerfall des neutralen Kaons . . . . .	189
<b>15. Baryonen . . . . .</b>	<b>193</b>
15.1 Erzeugung und Nachweis von Baryonen . . . . .	193
15.2 Baryonmultipletts . . . . .	199
15.3 Massen der Baryonen . . . . .	203
15.4 Magnetische Momente . . . . .	204
15.5 Semileptonische Zerfälle der Baryonen . . . . .	209
15.6 Wie gut ist das Konstituentenquark-Konzept? . . . . .	217
<b>16. Kernkraft . . . . .</b>	<b>219</b>
16.1 Nukleon-Nukleon-Streuung . . . . .	220
16.2 Das Deuteron . . . . .	224
16.3 Charakter der Kernkraft . . . . .	228
<b>17. Aufbau der Kerne . . . . .</b>	<b>235</b>
17.1 Das Fermigasmodell . . . . .	235
17.2 Hyperkerne . . . . .	240
17.3 Das Schalenmodell . . . . .	244
17.4 Deformierte Kerne . . . . .	252
17.5 Spektroskopie mittels Kernreaktionen . . . . .	256
17.6 $\beta$ -Zerfall des Kerns . . . . .	262
<b>18. Kollektive Kernanregungen . . . . .</b>	<b>271</b>
18.1 Elektromagnetische Übergänge . . . . .	272
18.2 Dipolschwingungen . . . . .	275
18.3 Formschwingungen . . . . .	283
18.4 Rotationszustände . . . . .	287
<b>19. Nukleare Thermodynamik . . . . .</b>	<b>297</b>
19.1 Thermodynamische Beschreibung der Kerne . . . . .	298
19.2 Compoundkern und Quantenchaos . . . . .	301
19.3 Die Phasen der Kernmaterie . . . . .	303
19.4 Teilchenphysik und Thermodynamik im frühen Universum . . . . .	308
19.5 Sternentwicklung und Elementsynthese . . . . .	315
<b>20. Vielkörpersysteme der starken Wechselwirkung . . . . .</b>	<b>323</b>

<b>A. Anhang</b> . . . . .	327
A.1 Beschleuniger . . . . .	327
A.2 Detektoren . . . . .	334
A.3 Kopplung von Drehimpulsen . . . . .	344
A.4 Naturkonstanten . . . . .	346
<b>Übungsaufgaben</b> . . . . .	347
<b>Lösungen der Übungsaufgaben</b> . . . . .	357
<b>Literaturverzeichnis</b> . . . . .	375
<b>Sachwortverzeichnis</b> . . . . .	381