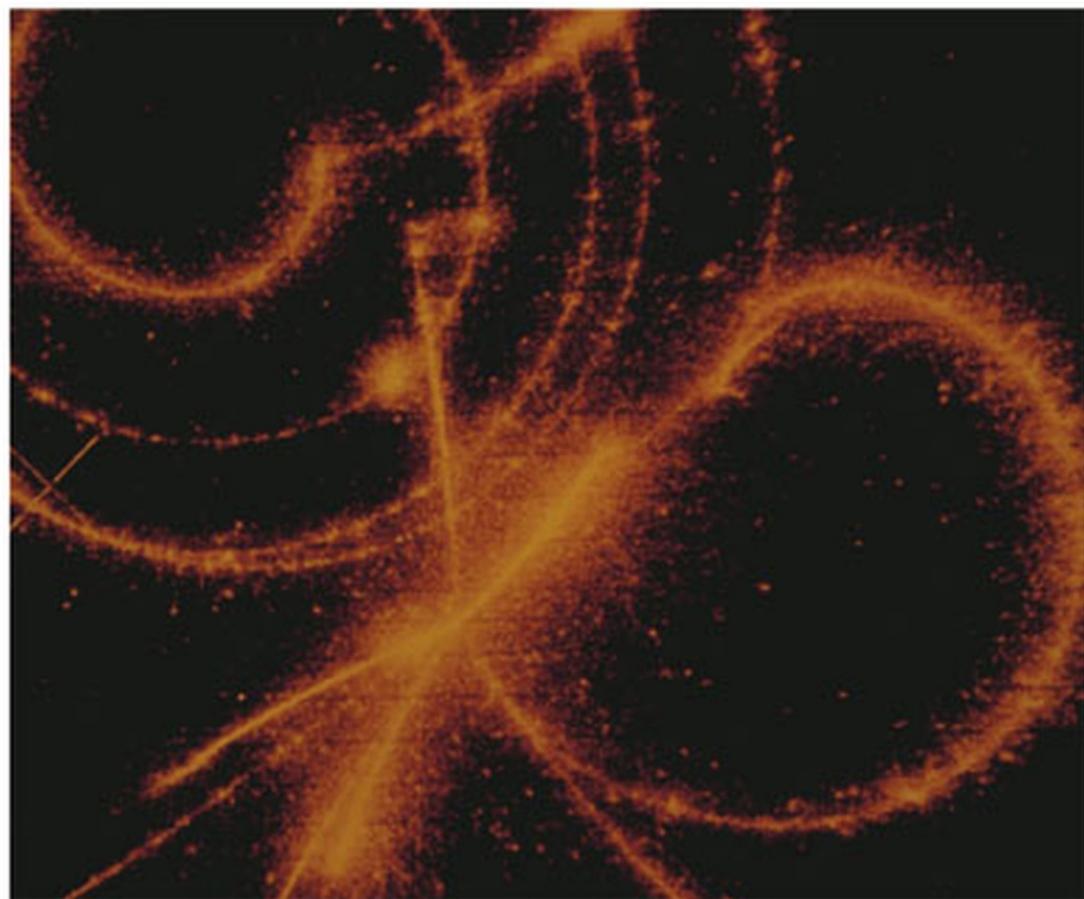


# Einführung in die Kern- und Elementarteilchenphysik





Hartmut Machner

**Einführung in die Kern- und  
Elementarteilchenphysik**



Hartmut Machner

# **Einführung in die Kern- und Elementarteilchenphysik**



**WILEY-  
VCH**

WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

**Autor**

*Prof. Dr. Hartmut Machner*  
Institut für Kernphysik  
Forschungszentrum Jülich  
h.machner@fz-juelich.de

**Umschlagbild**

Falschfarbenbild vom Zerfall eines positiv geladenen Pions, aufgenommen mit einer Strömungskammer.  
(Mit freundlicher Genehmigung des CERN)

Das vorliegende Werk wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autor und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.

**Bibliografische Information**

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

© 2005 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA,  
Weinheim

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden.

Printed in the Federal Republic of Germany  
Gedruckt auf säurefreiem Papier

**Druck** Strauss GmbH, Mörlenbach  
**Bindung** Litges & Dopf Buchbinderei GmbH,  
Heppenheim

**ISBN-10** 3-527-40528-3

**ISBN-13** 978-3-527-40528-2

Meiner lieben Frau Juliane  
und meinen Söhnen Moritz und Fabian gewidmet.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>XIII</b>
<b>1 Historische Anfänge</b>	<b>1</b>
1.1 Aufgaben . . . . .	4
<b>2 Experimentelle Methoden</b>	<b>7</b>
2.1 Beschleuniger . . . . .	7
2.1.1 Gleichspannungsbeschleuniger . . . . .	7
2.1.2 Linearbeschleuniger . . . . .	9
2.1.3 Kreisbeschleuniger . . . . .	11
2.2 Detektoren . . . . .	16
2.2.1 Wechselwirkung von Strahlung mit Materie . . . . .	17
2.2.2 Messung der Ionisation . . . . .	23
2.2.3 Positionsmessung . . . . .	25
2.2.4 Teilchenidentifizierung . . . . .	29
2.2.5 Zeitmessung . . . . .	32
2.2.6 Energiemessung . . . . .	34
2.2.7 Impulsmessung . . . . .	35
2.3 Aufgaben . . . . .	39
<b>3 Globale Eigenschaften von Kernen und Nukleonen</b>	<b>43</b>
3.1 Massen, Bindung . . . . .	43
3.2 Streuexperimente . . . . .	49
3.2.1 Die Methode . . . . .	49
3.2.2 Streuung an einer harten Kugel . . . . .	51
3.2.3 Begriffe und Einheiten . . . . .	52
3.3 Quantenmechanik der Streuung . . . . .	55
3.3.1 Die Born'sche Näherung . . . . .	58
3.3.2 Die Eikonal-Näherung . . . . .	58
3.3.3 Die Rutherford-Streuung . . . . .	59
3.4 Elastische Elektronenstreuung an Kernen . . . . .	61
3.4.1 Formfaktoren und Mott-Streuung . . . . .	61
3.4.2 Ladungsverteilung von Kernen . . . . .	64
3.5 Streuung leichter Ionen an Kernen . . . . .	68
3.5.1 Das Kastenpotential . . . . .	68
3.5.2 Materieverteilung . . . . .	69

3.6	Elektromagnetische Momente . . . . .	72
3.6.1	Magnetische Momente . . . . .	72
3.6.2	Elektrische Quadrupolmomente . . . . .	76
3.7	Ladungsverteilung der Nukleonen . . . . .	79
3.8	Partonen . . . . .	84
3.9	Partialwellenerlegung . . . . .	86
3.9.1	Wirkungsquerschnitte der elastischen Streuung . . . . .	86
3.9.2	Totaler Wirkungsquerschnitt . . . . .	88
3.10	$\alpha$ -Zerfall . . . . .	92
3.10.1	Gamow'sches Modell der Potentialdurchtunnelung . . . . .	92
3.10.2	Spektroskopische Faktoren . . . . .	98
3.10.3	Protonen-Radioaktivität . . . . .	100
3.10.4	Cluster-Radioaktivität . . . . .	100
3.11	Halbklassische Beschreibung . . . . .	101
3.12	Die Nukleon–Nukleon-Wechselwirkung . . . . .	104
3.12.1	Das Deuteron . . . . .	104
3.12.2	Nukleon–Nukleon-Streuung . . . . .	110
3.12.3	Feld-theoretische Beschreibung der Wechselwirkungen . . . . .	116
3.13	Aufgaben . . . . .	123
<b>4</b>	<b>Kernmodelle</b> . . . . .	<b>127</b>
4.1	Fermi-Gas-Modell . . . . .	127
4.2	Tröpfchenmodell . . . . .	130
4.3	Das Schalenmodell . . . . .	137
4.3.1	Sphärische Potentiale . . . . .	137
4.3.2	Spin–Bahn-Wechselwirkung . . . . .	143
4.3.3	Restwechselwirkung . . . . .	146
4.4	Deformierte Kerne . . . . .	153
4.5	Das optische Modell . . . . .	155
4.6	Einteilchen-Anregungen . . . . .	162
4.7	Kollektive Anregungen . . . . .	167
4.7.1	Vibrationen . . . . .	168
4.7.2	Rotierende Kerne . . . . .	170
4.7.3	Transurane und Spaltung . . . . .	177
4.8	Aufgaben . . . . .	181
<b>5</b>	<b>Ungebundene Systeme, Symmetrien</b> . . . . .	<b>185</b>
5.1	Resonanzen in Kernen . . . . .	185
5.2	Riesenresonanzen . . . . .	191
5.3	Erhaltungsgrößen . . . . .	194
5.3.1	Raum-Zeitliche Verschiebungen . . . . .	197
5.3.2	Rotation . . . . .	198
5.3.3	Halbzahlige Spins . . . . .	200
5.3.4	Die Parität $\mathcal{P}$ . . . . .	201
5.3.5	Die Zeitumkehr $\mathcal{T}$ . . . . .	203
5.3.6	Der Isospin . . . . .	207

5.4	Eigenschaften der Feldteilchen . . . . .	209
5.4.1	Die Entdeckung des Pions . . . . .	209
5.4.2	Spin des geladenen Pions . . . . .	211
5.4.3	Isospin der Pionen . . . . .	212
5.4.4	Spin und Parität des Photons . . . . .	214
5.4.5	Schwellenproduktionen . . . . .	215
5.5	Empirische Erhaltungssätze . . . . .	218
5.5.1	Ladungserhaltung . . . . .	218
5.5.2	Folgerungen aus der Existenz und aus dem $\beta$ -Zerfall des Neutrons . . . . .	221
5.6	Das $\pi$ -Nukleon-System . . . . .	222
5.6.1	Die $\pi$ -Nukleon-Wechselwirkung . . . . .	222
5.6.2	Nukleonenresonanzen . . . . .	225
5.7	Resonanzen im $\pi$ - $\pi$ -System . . . . .	229
5.7.1	Zweipionen-Systeme . . . . .	229
5.7.2	Dreipionen-Systeme . . . . .	231
5.8	Die Strangeness . . . . .	234
5.9	$\eta$ -Zerfälle und die $C$ -Konjugation . . . . .	238
5.10	Aufgaben . . . . .	241
<b>6</b>	<b>Quarkonia und die starke Wechselwirkung</b> . . . . .	<b>247</b>
6.1	Multipletts leichter Quarks . . . . .	247
6.1.1	Anordnungen in Multipletts, Quarks . . . . .	247
6.1.2	Quarkmassen . . . . .	255
6.1.3	Farbe . . . . .	261
6.1.4	Quarklinien . . . . .	261
6.2	Schwere Quarks . . . . .	263
6.2.1	Die Entdeckung des Charms . . . . .	263
6.2.2	Die Entdeckungen des Bottom- und des Top-Quarks . . . . .	267
6.3	QCD, Jets und Gluonen . . . . .	270
6.3.1	Quark-Quark-Potential . . . . .	270
6.3.2	Die laufende Kopplungskonstante . . . . .	274
6.3.3	Das Saitenmodell . . . . .	277
6.3.4	Nichtresonante $q\bar{q}$ -Erzeugung . . . . .	279
6.3.5	Gluonenabstrahlung . . . . .	282
6.3.6	Die Gluon-Gluon-Wechselwirkung . . . . .	285
6.4	Struktur der Nukleonen . . . . .	287
6.4.1	Skaleninvarianz . . . . .	287
6.4.2	Das Quark-Parton-Modell . . . . .	293
6.4.3	Neutrinostreuung . . . . .	296
6.4.4	Skalenbrechung und Impulsverteilung der Gluonen . . . . .	297
6.5	Eichinvarianz . . . . .	299
6.5.1	Nicht-Abel'sche Eichtransformationen . . . . .	299
6.5.2	Spontane Brechung der globalen Symmetrie: Goldstone-Mode . . . . .	303
6.5.3	Spontane Brechung der lokalen Symmetrie: Higgs-Mode . . . . .	306
6.5.4	Higgs-Mechanismus und Isospin . . . . .	307

6.6	Chirale Störungstheorie . . . . .	308
6.6.1	Chiraler Grenzfall . . . . .	308
6.6.2	Partiell erhaltener axialer Strom . . . . .	310
6.6.3	$\pi\pi$ -Streuung . . . . .	311
6.6.4	Offene Probleme . . . . .	313
6.7	Streuung von Hadronen bei hohen Energien . . . . .	316
6.8	Aufgaben . . . . .	320
<b>7</b>	<b>Die elektroschwache Wechselwirkung</b>	<b>325</b>
7.1	Leptonen . . . . .	325
7.1.1	Eigenschaften geladener Leptonen . . . . .	325
7.1.2	Die Neutrino-Hypothese . . . . .	330
7.2	Der nukleare $\beta$ -Zerfall, Fermi's Theorie . . . . .	332
7.3	Verletzung der Paritätserhaltung, Helizität der Leptonen . . . . .	338
7.3.1	Das Wu-Experiment . . . . .	339
7.3.2	Der Zerfall des $\Lambda$ -Hyperons . . . . .	341
7.3.3	Die Helizität der Leptonen . . . . .	343
7.4	Die $V - A$ -Wechselwirkung . . . . .	345
7.5	Test der $V - A$ -Theorie . . . . .	348
7.6	Der neutrale, schwache Strom . . . . .	352
7.7	Die Feldbosonen der schwachen Wechselwirkung . . . . .	354
7.8	Schwache Zerfälle von Teilchen mit Strangeness . . . . .	358
7.9	Verallgemeinerung auf sechs Quarks . . . . .	359
7.10	Die Vereinheitlichung der elektrischen und der schwachen Wechselwirkung . . . . .	362
7.11	Oszillationen, $\mathcal{CP}$ -Verletzung . . . . .	366
7.11.1	Das Zweizustandsproblem . . . . .	366
7.11.2	Die neutralen Kaonen . . . . .	369
7.11.3	Oszillation und Regeneration . . . . .	371
7.11.4	Verletzung der $\mathcal{CP}$ - und der $\mathcal{T}$ -Invarianz . . . . .	373
7.11.5	$\mathcal{CP}$ -Verletzung im Standardmodell . . . . .	381
7.12	Neutrinos . . . . .	386
7.12.1	Drei Leptonenfamilien . . . . .	387
7.12.2	Sonnenneutrinos . . . . .	389
7.12.3	Atmosphärische Neutrinos . . . . .	393
7.12.4	Neutrinooszillationen . . . . .	395
7.13	Aufgaben . . . . .	402
<b>8</b>	<b>Kerne in exotischen Zuständen</b>	<b>407</b>
8.1	Hyperkerne . . . . .	407
8.2	Mesonische Atome . . . . .	411
8.3	Schwerionenphysik bei mittleren Energien . . . . .	414
8.3.1	Heiße Kerne . . . . .	414
8.3.2	Weitere Thermometer . . . . .	418
8.3.3	Thermalisierung . . . . .	419
8.3.4	Die Zustandsgleichung . . . . .	423

8.4	Suche nach dem Quark-Gluon-Plasma . . . . .	425
8.5	Nukleares Brennen, Neutronensterne . . . . .	428
8.6	Aufgaben . . . . .	433

## Anhang

<b>A</b>	<b>Fourier-Transformationen</b>	<b>437</b>
<b>B</b>	<b>Die Raum-Zeit</b>	<b>439</b>
B.1	Vierervektoren . . . . .	439
B.2	Lorentz-Transformationen . . . . .	440
B.3	Kovariante Formulierung der Elektrodynamik . . . . .	441
<b>C</b>	<b>Kinematik und Phasenraum</b>	<b>443</b>
C.1	Kinematik . . . . .	443
C.2	Zweikörper-Kinematik . . . . .	446
C.3	Dreikörper-Kinematik . . . . .	449
C.4	Methode der fehlenden Masse . . . . .	455
C.5	Rapidität . . . . .	455
<b>D</b>	<b>Addition von Drehimpulsen</b>	<b>457</b>
<b>E</b>	<b>Die Dirac-Gleichung</b>	<b>459</b>
E.1	Wellengleichungen . . . . .	459
E.2	Lösungen der Dirac-Gleichung . . . . .	463
<b>F</b>	<b>Matrixelemente aus Feynman-Graphen</b>	<b>465</b>
F.1	Regeln der QED . . . . .	465
F.2	Regeln der QCD . . . . .	468
<b>G</b>	<b>Generatoren für die Gruppe <math>SU(3)</math></b>	<b>471</b>
<b>H</b>	<b>Quantenzahlen der Mesonen</b>	<b>475</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>477</b>
	<b>Index</b>	<b>489</b>



# Vorwort

*Doch muss man bedenken, dass eine fruchtbare Theorie niemals aus dem Nichts entspringt und dass man stets auf die schon vorliegenden Untersuchungen angewiesen ist. Darum muss jeder Forscher, der vorwärts kommen will, vor allem dasjenige kennen lernen, was Andere vor ihm geleistet haben.*

Max Planck

Dieses Buch hat wie so viele andere seinen Ursprung in Vorlesungen, die ich mehrfach an der Universität Duisburg-Essen für Studenten nach dem Vordiplom gehalten habe. Historisch haben sich Kernphysik und Teilchenphysik nach gemeinsamen Anfängen getrennt. Heute gibt es jedoch soviel Überlappung zwischen den beiden Gebieten, dass eine gemeinsame Behandlung gerechtfertigt erscheint. Es ist ein Ziel dieses Buches, diese Gemeinsamkeiten sowohl in der experimentellen als auch in der theoretischen Methodik herauszuarbeiten. Es ist also nicht, wie es häufig zu finden ist, ein Nebeneinander von Kern- und Teilchenphysik.

Nicht alles, was in diesem Buch steht, kann in dem zeitlich begrenzten Rahmen einer Vorlesung gebracht werden. Es ist aber sicherlich besser man kann Abschnitte übergehen, als dass sie schmerzlich vermisst werden. Natürlich ist die Auswahl des Stoffes manchmal willkürlich und dem eigenen Geschmack folgend. Dennoch hoffe ich, den Geschmack vieler Lehrenden und Lernenden getroffen zu haben. Eine Einführung kann natürlich nicht an allen Stellen so weit in die Tiefe gehen, dass alles immer umfassend dargestellt wird. Daher habe ich häufig die Originalarbeiten angegeben, bzw. auf weiterführende Literatur hingewiesen.

Der gesamte Komplex der Anwendungen der Kern- und Elementarteilchenphysik sowie der Anwendungen ihrer Methoden und Geräte ist im vorliegenden Text gänzlich unbeachtet geblieben. Dies liegt nicht daran, dass dieses Gebiet uninteressant ist, ganz im Gegenteil ist es äußerst reizvoll, aber eine auch nur ansatzweise Diskussion hätte den Rahmen dieses Buches gesprengt.

Es ist im Allgemeinen unmöglich, für jede physikalische Größe einen eigenen Buchstaben zu finden. Daher sind Bezeichnungen nahezu immer im Kontext erklärt. Ein anderes Problem ist die Frage nach den Einheiten. Hier werden die üblichen SI-Einheiten verwendet, soweit nicht praktische Erwägungen dem entgegenstehen. Da die Kern- und die Elementarteilchenphysik mit beschleunigten Teilchen arbeiten, ist es bequem, die Energieeinheit eV zu benutzen. Dies ist die Energie, die ein Teilchen mit der elektrischen Ladung  $e$  nach dem Durchlaufen einer Potentialdifferenz von 1 V gewinnt. Gemäß der Einstein'schen Beziehung  $E = mc^2$  ist die Einheit der Masse dann  $eV/c^2$ . Die Einheit des Impulses ist  $eV/c$ . Typische Energien in der Kernphysik sind  $MeV/c^2$ , und  $GeV/c^2$  in der Teilchenphysik. Häufig setzt