

Christoph Berger

Elementarteilchenphysik

Von den Grundlagen zu den modernen Experimenten

Professor Dr. Christoph Berger
RWTH Aachen
I. Physikalisches Institut
52056 Aachen
Deutschland
E-Mail: berger@rwth-aachen.de

ISSN 0937-7433
ISBN 978-3-642-41752-8 ISBN 978-3-642-41753-5 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-642-41753-5

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

Springer Spektrum

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001, 2006, 2014

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, 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.

Planung und Lektorat: Dr. Vera Spillner
Einbandentwurf: deblik, Berlin

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Spektrum ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.
www.springer-spektrum.de

Vorwort zur dritten Auflage

Die enormen Fortschritte der experimentellen Elementarteilchenphysik in den vergangenen acht Jahren führten zu einer gründlichen Überarbeitung des Buches im Rahmen einer Neuauflage. Bei diesen Fortschritten denkt man natürlich zunächst an die Entdeckung eines neuen Elementarteilchens mit einer Masse von etwa 133 Protonmassen am LHC Speicherring des europäischen Forschungszentrums CERN in Genf. Nach unserem derzeitigen Erkenntnisstand hat es alle Eigenschaften des so lange gesuchten Higgs-Bosons und bringt damit das in den letzten 40 Jahren entwickelte *Standardmodell* der theoretischen Teilchenphysik zu einem triumphalen Abschluss.

Aber auch auf anderen Gebieten gab es bedeutende neue Erkenntnisse. Ich denke hier vor allem an die Neutrinophysik und die Untersuchung der Neutrino-Oszillationen. Sogar auf einem Gebiet, das in den 1960er Jahren im Zentrum des Interesses stand, nämlich der Messung des Wirkungsquerschnitts der Proton-Proton-Streuung bei höchsten Energien gab es bedeutende Fortschritte, die berücksichtigt werden mussten.

Fast so alt wie das Standardmodell sind die Fragen, die es unbeantwortet lässt und die man mit einer Erweiterung des theoretischen Rahmens zu beantworten suchte. Hier steht das supersymmetrische Standardmodell ganz im Zentrum des Interesses. Die am besten erforschte Version dieser Theorie, die sog. *natürliche Supersymmetrie* kann am LHC getestet werden. Der negative Ausgang aller bisherigen Experimente nach Signalen der Supersymmetrie wird am Schluss des Buches behandelt. Dieser negative Ausgang hat zu einer lebhaften Debatte darüber geführt, ob die Lage der theoretischen Physik nicht derjenigen vor 110 Jahren ähnelt, wo der negative Ausgang der Suche nach dem Äther eine grundlegende Revision der theoretischen Konzepte erzwang.

Am Aufbau und Stil des Buches habe ich keine wesentlichen Änderungen vorgenommen. Insofern ist die 3. Auflage eine Fortschreibung des Konzepts von 2001. Insbesondere habe ich daran festgehalten, dass bis auf wenige Ausnahmen alle theoretischen Ergebnisse mit Hilfe des bereitgestellten Materials nachgerechnet werden können. Ein Lehrbuch dieser Art kann man nicht oh-

ne eigene Mitarbeit lesen. Es gibt mittlerweile Hunderte von populärwissenschaftlichen Büchern und Artikeln über Themen der Elementarteilchenphysik, gerade auch über solche, die in meinem Buch nicht behandelt werden, da für sie keine experimentelle Überprüfung möglich ist. Ich kann aber hier nur der Meinung von C.F. Gauß beipflichten, der 1853 in einem Brief an A. von Humboldt schrieb: „Ich bin seit langer Zeit gewöhnt, von der Gedingenheit der höheren Cultur, welche die so genannten höheren Stände durch Lesen populärer Schriften oder Anwohnen populärer Vorlesungen erwerben zu können glauben, wenig zu halten. Ich bin vielmehr der Meinung, dass in wissenschaftlichen Gebieten probenhaltige Einsicht nur durch Anwendung eines gewissen Maßes eigener Anstrengung und eigener Verarbeitung des von anderen dargebotenen erreicht werden kann.“

Aachen, Mai 2014

Vorwort zur zweiten Auflage

Anlässlich der Vorbereitung der zweiten Auflage wurde das gesamte Buch nochmals gründlich überarbeitet mit dem Ziel, die Daten zu aktualisieren und möglichst viele Druckfehler und Versehen der ersten Auflage zu eliminieren. Zusätzlich habe ich natürlich die Gelegenheit benutzt, neuere Entwicklungen der letzten fünf Jahre aufzugreifen und zu erläutern. Dadurch haben sich vor allem die Abschnitte über CP -Verletzung und Neutrino-Physik des siebten Kapitels geändert. Zusammen mit kurzen neuen Abschnitten über Halbleiterzähler und das optische Theorem führte dies zu einer moderaten Vergrößerung des Umfangs des Buches um 13 Seiten. Da die schon 2004 begonnene Bearbeitung viel Zeit in Anspruch nahm, sind einige Messwerte nicht mehr auf dem neuesten Stand. Die Zahlenangaben beruhen auf der alle zwei Jahre publizierten Datensammlung der *Particle Data Group* vom Juli 2004 [PDG12]. Natürlich hätte ich auch auf die ständig aktualisierten Daten im *world wide web* zurückgreifen können. Für ein Lehrbuch erschien es mir aber vorteilhaft, von einer gedruckten Sammlung auszugehen, zumal sich die Elementarteilchenphysik nicht mehr so stürmisch wie in den 1970er Jahren entwickelt.

Die Grundstruktur des Buches wurde beibehalten. Es befasst sich daher ausschließlich mit der eigentlichen Elementarteilchenphysik. Mancher mag vielleicht bedauern, dass es keine ausführliche Diskussion der Astroteilchenphysik und Kosmologie gibt, zumal sich das Interesse vieler bisher an Beschleunigern arbeitenden Physiker diesen Gebieten zugewandt hat. Eine Behandlung der genannten Themen im bisherigen Stil des Buches, also der im Text erfolgenden Erarbeitung aller Formeln und Zusammenhänge, hätte aber den Umfang um mindestens hundert Seiten vergrößert. Ich bin überzeugt, dass mit der neuen Generation von Experimenten, die ab 2007 am *Large Hadron Collider* des CERN in Genf beginnen, sich der Schwerpunkt des Interesses wieder verlagern wird. Vielleicht ist gerade dann für die Studierenden ein Buch besonders nützlich, das sich zum Ziel setzt, den inneren Zusammenhang möglichst vieler Phänomene quantitativ herauszuarbeiten. Aus diesem Grunde wird z. B. immer wieder die *crossing*-Technik bei der Herleitung von

Wirkungsquerschnitten benutzt. Hierher gehört auch die Betonung der Ähnlichkeit von weiten Teilen der perturbativen Quantenchromodynamik (QCD) mit der Quantenelektrodynamik (QED). Schließlich wird die Weizsäcker-Williams-Methode zur Berechnung von QED-Wirkungsquerschnitten deshalb so ausführlich behandelt, weil sie eine zentrale Rolle in den QCD-Analysen der Elektron-Proton-Streuung oder der Proton-Proton-Streuung spielt.

Auch an dieser Stelle möchte ich nochmals auf die *website* des Buches hinweisen, die über meine Homepage <http://mozart.physik.rwth-aachen.de> erreicht werden kann. Hier finden sich vor allem Erläuterungen zu den Übungsaufgaben, aber auch Berichtigungen und Ergänzungen.

Aachen, im Februar 2006

Christoph Berger

Vorwort

You can't learn anything without teaching.
J. A. Wheeler

Dieses Lehrbuch ist – wie viele andere auch – aus Vorlesungen entstanden. An der Technischen Hochschule Aachen habe ich die Kursvorlesung Elementarteilchenphysik I/II sehr oft gehalten. Naturgemäß wuchs der Umfang des sich daraus entwickelnden Lehrbuchs weit über den Rahmen der Vorlesung hinaus, obwohl die grundsätzliche Struktur übernommen wurde.

Ein Vorläufer dieses Buches ist mein 1992 erschienenes Lehrbuch „Teilchenphysik“, welches eine überraschend freundliche Aufnahme gefunden hat. Allerdings wurde immer wieder das Fehlen eines Abschnitts über Teilchenbeschleuniger und Detektoren bedauert. Eine Behandlung dieser Themen war daher für eine eventuelle Neuauflage vorgesehen. In der Zwischenzeit hat sich aber unser Gebiet so stürmisch entwickelt, dass bei einer Berücksichtigung der neuen Ergebnisse der Umfang von etwa 270 Seiten auf über 450 Seiten anstieg. Daraus ist dann ein neuer Text entstanden.

Die Hörer der Vorlesung sind Studenten im 6. und 7. Semester. Ich versuche daher, ein konsistentes Bild der modernen Teilchenphysik auf der Grundlage einer soliden Kenntnis der nichtrelativistischen Quantenmechanik sowie der Atom- und Kernphysik zu vermitteln. Alle anderen benötigten Hilfsmittel, wie z.B. Dirac-Gleichung und Feynman-Graphen, werden im Buch bereitgestellt. Insbesondere die Behandlung der Feynman-Graphen ist hierin beispielhaft für eine moderne Form des Lernens. Es ist manchmal unumgänglich, zunächst die Anwendung von intuitiv ansprechenden Regeln zu üben und erst in einem späteren Teil des Studiums deren exakte Begründung zu erlernen. Jeder wendet heute Computer zur Lösung numerischer oder algebraischer Probleme an, ohne etwas über Turing-Maschinen oder Digitalelektronik usw. zu wissen.

Die Experimente der Teilchenphysik werden zur Zeit immer mit den Vorhersagen des sog. Standard-Modells verglichen. In diesem Sinne ist auch das vorliegende Buch eine Abhandlung über das Standard-Modell. Da Physik

keine historische Wissenschaft ist, folge ich in der Entwicklung des Modells nicht dem historischen Weg. Es erschien mir richtiger, gleich zu Beginn die qualitativen Grundlagen zu beschreiben und die ausführliche Behandlung den späteren Abschnitten zu überlassen. Es ist ganz im Sinne dieses unhistorischen Ansatzes, dass z. B. die Gruppe $SU(3)$ nicht an Hand der Quark-Arten sondern über ihre Farben eingeführt wird.

Die Entwicklung des Standard-Modells ist untrennbar mit dem überwältigenden Erfolg der Eichtheorien verbunden, wozu es einige ausgezeichnete Bücher gibt. Ich habe daher im vorliegenden Buch auf eine Darstellung der theoretischen Grundlagen verzichtet. Hinzu kommt, dass einige der in diesem formalen Rahmen erzielten Resultate auch an Hand der weit anschaulicheren Diskussion des Verhaltens von Wirkungsquerschnitten bei hohen Energien gewonnen werden können.

Die Erfolge des Standard-Modells beim Berechnen der Reaktionswahrscheinlichkeiten für die verschiedensten Prozesse verstellen manchmal den Blick darauf, dass sich manche dieser Ergebnisse auch ohne ein spezifisches Modell erreichen lassen. Daher wurde im zweiten Kapitel des Buches der Betrachtung der Symmetrioperationen der Teilchenphysik ein breiter Raum gewidmet. Besonderer Wert wurde hierbei auf den Helizitätsformalismus, d. h. auf eine konsistente Beschreibung des Spins, gelegt. Dieser Formalismus ist gerade für den Experimentalphysiker von unschätzbarem Wert, wenn es z. B. darum geht, aus Winkelverteilungen der Reaktionsprodukte auf den Spin von Teilchen zu schließen. Vielleicht werden diese Kenntnisse bei der Entdeckung neuer Teilchen und der Bestimmung ihrer Quantenzahlen an zukünftigen Beschleunigern wieder besonders wichtig werden.

Der vorliegende Text ist auch aus vielen Diskussionen entstanden, die ich mit jungen Physikern im Rahmen der Anfertigung ihrer Diplom- und Doktorarbeiten führen konnte. Es wurde deshalb versucht, die meisten der Begriffe und Formeln, die in der täglichen Arbeit benötigt werden, zu diskutieren. In einem einführenden Buch ist dies natürlich nur in einem beschränkten Umfang möglich. Nichtsdestoweniger habe ich das Buch in diesem Sinne auch für mich selbst geschrieben.

Das Studium der Physik ist sicher schwierig. Es ist ganz natürlich, dass ein Student den Text nicht einfach lesen kann, sondern sich den Inhalt mit Papier und Bleistift in der Hand erarbeiten muss. Um dem Anfänger zu helfen, beziehen sich die Literaturangaben in den meisten Fällen nicht auf die Originalarbeiten, sondern auf weiterführende Lehrbücher. Inzwischen erlaubt das Internet einen engen Kontakt zwischen Leser und Autor. Auf der *web page* des Buches (<http://mozart.physik.rwth-aachen.de/elmt.html>) sind zusätzliche Angaben zu den Lösungen der Übungsaufgaben zu finden. Hier sollen aber auch eventuelle Fehler oder Unklarheiten korrigiert werden. Damit dies möglich ist, brauche ich Ihre Mitarbeit.

Aachen, im Juli 2001

Christoph Berger

Inhaltsverzeichnis

1	Überblick und Hilfsmittel	1
1.1	Strukturen der Materie	1
1.1.1	Teilchen und Kräfte	1
1.1.2	Abstandsskalen und Energieskalen	5
1.1.3	Intermezzo: Schreibweise und Maßsysteme	17
1.2	Die Elementarteilchen	20
1.2.1	Antimaterie	21
1.2.2	Leptonen	25
1.2.3	Hadronen	34
1.2.4	Quarks	44
1.2.5	Felder und Wechselwirkungen	49
1.2.6	Was ist ein Elementarteilchen?	57
1.3	Wirkungsquerschnitte und Zerfallsraten	58
1.3.1	Der Wirkungsquerschnitt	59
1.3.2	Zerfallsraten	63
1.4	Teilchenbeschleuniger	66
1.4.1	Linearbeschleuniger	66
1.4.2	Das Zyklotron	69
1.4.3	Das Synchrotron	71
1.4.4	Speicherringe	85
1.5	Detektoren	88
1.5.1	Detektoren an <i>collidern</i>	88
1.5.2	Spurenkammern	93
1.5.3	Kalorimeter	98
1.5.4	Blasenkammer	101
2	Die Streumatrix und ihre Symmetrien	103
2.1	Die Streumatrix	103
2.1.1	Wirkungsquerschnitte und Streuamplitude	105

2.1.2	Zerfallsraten	111
2.1.3	Symmetrien der S -Matrix	115
2.1.4	Das optische Theorem	119
2.1.5	Anhang über die δ -Funktion	120
2.2	Drehungen in drei Dimensionen	122
2.2.1	Drehungen	122
2.2.2	Die Drehgruppe	125
2.2.3	Darstellungen der Drehgruppe	127
2.2.4	Drehgruppe und halbzahlige Spins	134
2.2.5	Produkte von Darstellungen	137
2.3	Drehungen und Verschiebungen in vier Dimensionen	141
2.3.1	Lorentz-Transformationen	141
2.3.2	Die Poincaré-Gruppe	144
2.3.3	Darstellungen der Poincaré-Gruppe	146
2.4	Anwendungen	149
2.4.1	Kinematik der Zwei-Körper-Reaktionen	149
2.4.2	Zwei-Körper-Zerfälle	152
2.4.3	Partialwellenentwicklung der Streuamplitude	156
2.4.4	Resonanzen in Formationsexperimenten	157
2.4.5	Pion-Resonanzen	168
2.4.6	Der Spin des Photons	169
2.4.7	Der Spin des neutralen Pions	171
2.5	Spiegelungen und Paritätsinvarianz	173
2.5.1	Die Paritätstransformation	173
2.5.2	Die Parität des Photons, des ρ -Mesons und der Pionen	178
2.5.3	Spin und Parität des K -Mesons	181
2.5.4	Paritätsverletzung in der schwachen Wechselwirkung	183
2.6	Die Zeitumkehr	188
2.6.1	Zeitumkehr und das Prinzip des detaillierten Gleichgewichts	188
2.6.2	Invarianz der Wechselwirkungen unter Zeitspiegelungen	191
2.7	Innere Symmetrien I	193
2.7.1	Globale Phasentransformationen	194
2.7.2	Die Teilchen-Antiteilchen-Konjugation	196
2.7.3	Lang- und kurzlebige neutrale K -Mesonen	200
2.7.4	$C P$ -Verletzung im K_L -Zerfall	208
2.8	Innere Symmetrien II, Isospin und $S U 2$	219
2.8.1	Die Form der $S U 2$ -Matrizen	220
2.8.2	Darstellungen	222
2.8.3	Antiteilchen in der $S U 2$	224
2.8.4	Die Isoinvarianz der Kernkraft	225
2.8.5	Isospin und Quarks	227
2.8.6	Reguläre Darstellung und G -Parität	228

2.8.7	Isospin und K -Zerfälle	231
3	Elementare Quantenelektrodynamik	235
3.1	Dirac-Gleichung und Feynman-Regeln	236
3.1.1	Die Dirac-Gleichung	236
3.1.2	Lösungen der freien Dirac-Gleichung	241
3.1.3	Feynman-Regeln	255
3.1.4	Die Renormierung und die laufende Kopplung	259
3.2	Basis-Reaktionen der QED	268
3.2.1	$e^- e^+$ -Vernichtung in $\mu^- \mu^+$ -Paare	268
3.2.2	Die Elektron-Myon-Streuung	274
3.2.3	Bhabha- und Møller-Streuung	281
3.2.4	Anwendungen der Streuformeln	285
3.2.5	Die Compton-Streuung	292
3.3	Prozesse höherer Ordnung	302
3.3.1	Die Bremsstrahlung	302
3.3.2	Strahlungskorrekturen zur Mott-Streuung	312
4	Hadronen in der Quantenchromodynamik	319
4.1	Quarks mit Farbe	320
4.1.1	Das Statistik-Problem	320
4.1.2	Die Gruppe $S U 3$	321
4.1.3	Mesonen als $q\bar{q}$ -Zustände	328
4.1.4	Baryonen als $q q q$ -Zustände	330
4.2	Farbdynamik	334
4.2.1	Gluonen und das Potential der QCD	335
4.2.2	Die laufende Kopplungskonstante	343
4.3	Der Aufbau der Hadronen	349
4.3.1	Die Werte von Spin und Parität im Quarkmodell	350
4.3.2	Hadronen aus u - und d -Quarks	353
4.3.3	Die Massen der Quarks	360
4.3.4	Hadronen aus u -, d - und s -Quarks	362
4.4	Die chromodynamische Hyperfeinstruktur	377
4.4.1	Die Aufspaltung für Hadronen aus u - und d -Quarks	377
4.4.2	Hyperfeinstruktur und „seltsame“ Quarks	379
4.5	Elektromagnetische und starke Zerfälle von Hadronen	381
4.5.1	Radiative Zerfälle der Vektormesonen	381
4.5.2	Zerfälle der Vektormesonen in Leptonenpaare	385
4.5.3	Radiative Zerfälle der pseudoskalaren Mesonen	391
4.5.4	Zerfälle in Hadronen	394
4.6	Neue schwere Quarks	398
4.6.1	Das Vektormeson $J/\psi(1 S)$	398
4.6.2	Die Υ -Mesonen	402
4.6.3	Quarkonium, $c\bar{c}$ und $b\bar{b}$	403

4.6.4	Hadronen mit <i>charm</i> und <i>bottom</i>	412
5	Elektronen und Quarks	417
5.1	Elektron-Positron-Annihilation in Hadronen	417
5.1.1	Der Wirkungsquerschnitt	417
5.1.2	QCD-Korrekturen	421
5.1.3	Der Endzustand	426
5.2	Die elastische Elektron-Nukleon-Streuung	433
5.2.1	Der Wirkungsquerschnitt	433
5.2.2	Experimente zur elastischen Elektronenstreuung ...	436
5.2.3	Das $e\pi$ -System	440
5.3	Inelastische Elektron-Nukleon-Streuung	444
5.3.1	Der Wirkungsquerschnitt im Quarkmodell	444
5.3.2	Allgemeine Form des Wirkungsquerschnitts	448
5.3.3	Modelle und Ergebnisse für F_2^{eN}	454
5.3.4	QCD-Korrekturen	460
5.3.5	Der Endzustand	470
5.4	Zwei-Photonen-Physik	473
5.4.1	Resonanzerzeugung	474
5.4.2	Die Strukturfunktion des Photons	477
6	Von der schwachen zur elektroschwachen Wechselwirkung	485
6.1	Schwache Wechselwirkung von Leptonen	485
6.1.1	Quasielastische $\nu_\mu e^-$ -Streuung	486
6.1.2	Der Zerfall des Myons	491
6.2	Schwache Wechselwirkung von Quarks	496
6.2.1	Der Cabibbo-Winkel	496
6.2.2	Der β -Zerfall des Neutrons	498
6.2.3	Der Zerfall $\pi \rightarrow \mu \nu$	504
6.2.4	Zerfälle von K^- , D^- und B^- -Mesonen	508
6.2.5	Der Zerfall des <i>top</i> -Quarks	513
6.2.6	Inelastische Neutrino-Nukleon-Streuung	514
6.3	Die elektroschwache Wechselwirkung	522
6.3.1	Die Entdeckung der neutralen Ströme	522
6.3.2	Elektroschwache Wechselwirkung der Leptonen	524
6.3.3	Elektroschwache Wechselwirkung von Quarks	532
7	Das Standardmodell	537
7.1	Die Neutrino-Elektron-Streuung	538
7.2	Die $e^- e^+$ -Vernichtung in Fermion-Antifermion-Paare	542
7.2.1	Die Bornsche Näherung	543
7.2.2	Strahlungskorrekturen	550

7.3	Die Elektron-Nukleon-Streuung bei Berücksichtigung des Z- und W-Austausches	552
7.4	Die Erzeugung des W-Bosons in Quark-Antiquark-Stößen ..	555
7.5	Die Produktion des <i>top</i> -Quarks in Hadron-Hadron-Stößen ..	560
7.6	Intermezzo: Die Hadron-Hadron-Streuung	563
7.7	Higgs-Bosonen	571
7.8	C P-Verletzung im Standardmodell	589
7.8.1	Die CKM-Matrix	589
7.8.2	C P-Verletzung und <i>b</i> -Quarks	595
7.9	Neutrinomassen und Neutrino-Oszillationen	602
7.10	Jenseits des Standardmodells	621
7.10.1	Majorana-Neutrinos	621
7.10.2	Das Parameterproblem	628
7.10.3	Die große Vereinheitlichung	630
7.10.4	Hierarchie und Feinabstimmung	639
7.10.5	Die supersymmetrische Erweiterung des Standardmodells	641
8	Lösungshinweise zu den Übungsaufgaben	657
8.1	Kapitel 1	657
8.2	Kapitel 2	659
8.3	Kapitel 3	663
8.4	Kapitel 4	665
8.5	Kapitel 5	667
8.6	Kapitel 6	668
8.7	Kapitel 7	670
	Literaturverzeichnis	673
	Sachverzeichnis	685

Sachverzeichnis

- ABJ-Anomalie, 394
- Abschneideparameter der QCD, 347
- Abstandsabhängigkeit von α_S , 345
- Abstandsskala d , 418
- Additive Quantenzahl, 24, 195
- Adiabaten-Bedingung, 616
- Adjungierte ψ -Funktion, 245
- Akzeptanzfunktion, 63
- Altarelli-Parisi-Gleichungen, 466
- Antiabschirmung, 346
- Antimaterie, 21, 216
- Antinukleonen, 224
- Antitag-Konfiguration, 474
- Antiteilchen, 24
- Anzahldichte, 60
- appearance*-Experiment, 605
- Arbeitspunkt, 80
- Auflösungskriterium, 429
- Austauschteilchen, 52
- Axialvektorstrom, 252

- $B^0 \bar{B}^0$ -Oszillation, 596
- β -Funktion, 80
- Betatronschwingung, 80
- Bethe-Bloch-Formel, 288
- Bethe-Heitler-Formel, 309
- Bhabha-Streuung, 281
- Bjorkensche SkalenvARIABLE, 448
- B -Meson, 403, 414
- Bornsche Näherung, 256
- bottom*, 44
- Bottomonium, 409
- branching ratio*, 64
- Brechungsindex, 620
- Breit-System, 471
- Breit-Wigner-Formel, 161, 399, 557
- Breit-Wigner-Funktion, 166

- Bremsstrahlung, 303, 424
- Cabibbo-Winkel, 589
- Callan-Gross-Relation, 449
- Casimir-Operatoren, 130, 146, 324
- Chargino, 649, 651
- charm*, 44
- Charmonium, 404
- charm*-Quark, 400
- charm*-Schwelle, 419
- Chew-Frautschi-Plot, 343
- Chirale Invarianz, 253
- Chirale Symmetrie, 368
- Chirales Supermultiplett, 642
- Chiralität, 250, 251
- Chiralitätserhaltung, 271
- Chiralitätsoperator, 250
- C -Invarianz, 197
- CKM-Matrix, 599
- C -Parität, 197, 199
- $C P$ -Invarianz, 202
- $C P$ -Verletzung, 208, 213, 214, 589, 593
und b -Quarks, 595
- $C P T$ -Theorem, 202
- Clebsch-Gordan-Koeffizienten, 138
- ^{60}Co -Experiment, 186
- collider*, 71
Prinzip, 16
- confinement*, 340
- Compton-Streuung, 292
- crossing* Relationen, 276

- Dagger, 240
- Dalitz-Plot, 114, 181
- Defizit der Sonnen-Neutrinos, 609
- δ -Funktion, 120
- $\Delta I = 1/2$ -Regel, 231

- Delta-Resonanzen, 38
- $\Delta S = \Delta Q$ -Regel, 216
- Detektoren, 88
- Deuteronspaltung, 179
- DGLAP-Gleichungen, 466
- Diffraktionsmodell, 564
- Dipolmagnete, 71
- Dipolmoment des Neutrons, 193
- Dirac-Gleichung, 236, 241
- Dirac-Neutrino, 624
- Dirac-Proton, 435
- Dirac-See, 22
- disappearance*-Experiment, 605, 608
- Divergenzproblem, 425
- D*-Meson, 401, 413
- Doppelter β -Zerfall, 623
- Drehgruppe, 125
 - Darstellungen, 127
- Drei-Körper-Zerfälle, 113
- Dreiecks-Anomalie, 394, 643
- Driftkammer, 96
- Driftröhre, 66
- duale Natur der Ladung, 195
- Dunkle Materie, 4, 650

- Effektive Kopplung, 313, 551
- Eichinvarianz, 260
- Eisenmagnete, 82
- Elektron, 25
- Elektron-Myon-Streuung, 274
- Elektron-Neutrino, 28
- Elektron-Pion-Streuung, 443
- Elektron-Positron-Vernichtung, 268, 544
 - in Hadronen, 417
 - in zwei Photonen, 298
- Elektron-Proton-*collider* HERA, 87
- Elektron-Proton-Streuung, 433
- Elektron-Quark-Streuung, 445, 552
- Elektroschwache Theorie, 551, 578
- Energieauflösung, 100
- Energieverlust, 285
- Energieverlustkurve, 288
- event shape*-Variable, 429

- Farbentheorie, 321
- Farbfaktor, 337
- Farbsingulett, 334
- Feinabstimmung, 641
- Feldgradient, 76
- Festkörperzähler, 96
- Feynman-Graph, 50
- Feynman-Regeln, 255
- flavor*-Oszillation, 218, 602
- flavor*-Quantenzahl, 48
- flavor*-Symmetrie, 364, 371
- Flussfaktor, 108, 451
- Fokussierung, 74
- Formel von Thomson, 296
- Formfaktor, 274, 437, 443
- Fréjus-Detektor, 637
- Fragmentierung, 426, 431, 432
- F*-Spin, 324
- Fundamentaldarstellung, 222

- GALLEX-GNO, 610
- Gamma-Gluon-Fusion, 469
- $\gamma\gamma$ -Zerfallsbreite, 477
- γ -Matrizen, 239
- Gauginos, 642
- Gell-Mann-Nishijima-Relation, 222, 228
- Generationenzahl, 547
- g*-Faktor, 267, 655
- Gitter-QCD, 406, 412, 591
- Gluon-Gluon-Fusion, 562
- Gluonen, 335
- Gluonstrahlung, 460
- G*-Parität, 355
- grand unified theory*, 630
- GSW-Modell, 578, 588, 639

- Hadron-Hadron-Streuung, 563
- Hadronen, 34
- Hadronisierung, 418
- Hadronisierungsprogramm, 433
- Halbleiterzähler, 96
- Handsche Formeln, 452
- heavy quark effective theory* (HQET), 405
- Helizität, 147
- Helizität von Antifermionen, 187
- Helizitätsamplitude, 164
 - flip-, 164
 - no flip-, 164
- Helizitätserhaltung, 271
- Helizitätsformalismus, 147
- Helizitätsoperator, 147
- Helizitätszustände, 246
- Higgs-Boson, 571, 581, 640
- Higgsino, 643
- Hohlraumresonator, 68
- Hyperfeinstruktur, 377
- Hyperladung, 363

- Ideale Mischung, 364
- infinite momentum frame*, 304, 444
- initial state radiation*, 462
- Infrarot-Divergenz, 463
- Infrarot-Singularität, 314
- Infrarotkatastrophe, 267

- Inklusive Reaktion, 62, 566
- Irreduzible Darstellung, 328
- Isoinvarianz, 225, 227
- Isospin, 227, 363
- Isospinanalyse, 231
- Jacobi-Determinante, 150
- Jacobi-Spitze, 155
- Jet, 426, 432, 470
- $J/\psi(1 S)$, 398
- K2K-Experiment, 608
- Kalorimeter, 92, 98
 - elektromagnetische, 98
 - hadronische, 100
- Kamiokande-Experiment, 608, 610
- Kastenspektrum, 152
- Kernkraft, 3, 12
- Klein-Gordon-Gleichung, 238
- Klein-Nishina-Formel, 294
- K -Meson, 43, 200
- Konstituentenmasse, 360, 381, 401
- Kritische Energie, 98, 311
- Ladungserhaltung, 195
- Ladungsunabhängigkeit, 226
- Ladungsverteilung, 440
- Λ -Baryon, 43
- Landau-Pol, 265
- large hadron collider* (LHC), 87
- Laufende Kopplungskonstante, 638
- leading-log*-Näherung, 263, 347, 463
- Lebensdauer, 64
- Leiteroperatoren, 129
- Leptogenese, 619
- Leptonen, 2, 25
- Leptonenzahl, 29
- Leptonfamilien, 30
- LHC (*large hadron collider*), 562
- Lie-Algebra, 130, 222
- Lie-Gruppen, 129
- Linearbeschleuniger, 66
- linear collider*, 73
- Linsengleichung, 79
- Longitudinale Strukturfunktion, 466
- Lorentz-Boost, 249
- Lorentz-Invarianz, 151
- Lorentz-Transformationen, 145
- LSP, 649
- Luminosität, 62, 86
- Luminositätsfunktion, 475, 558, 571
- Magnetisches Moment, 358
- Majorana-Neutrino, 621, 624
- Majorana-Teilchen, 622
- Mandelstam-Variable, 152, 275
- Masse der Atome, 361
- Massenformel, 367
- Massenmatrix, 626
- Massenschale, 52
- Massensingularität, 279
- Minimal ionisierende Teilchen, 288
- MINOS-Experiment, 608
- Mischungswinkel, 606
- Molière-Radius, 99, 312
- Mott-Streuung, 314
- MSSM, 644, 649
- MSW-Effekt, 615
- Multiplizität, 568
- Multipolfelder, 84
- Myon-Neutrino, 30
- Møller-Streuung, 282
- Natürlichkeit, 649
- Neutralino, 649, 654
- Neutrino, 26
 - Existenzbeweis, 32
- Neutrino-Elektron-Streuung, 538
- Neutrino-Optik, 613
- Neutrino-Oszillation, 602, 607, 615
- Neutrinohypothese, 27
- Neutrinomasse, 602
- Noethersches Theorem, 119
- non singlet*-Strukturfunktion, 465
- on shell*-Schema, 541
- Optisches Theorem, 160, 620
- Orthogonalitätsrelationen, 123, 145
- Ortsauflösung, 9, 95
- Oszillationslänge, 606
- Oszillatorpotential, 406
- OZI-Regel, 397
- Paarerzeugung durch zwei Photonen, 298
- Parameter ε , 211
- Parameterproblem, 628
- Parität, 174
 - ρ -Meson, 178
 - Photon, 178
- Paritätseigenzustände, 175
- Partialbreite Γ_f , 64
- Partialbreite Γ_f , 161
- Partialwellenamplitude, 159
- Partialwellenentwicklung, 156
- Parton, 428, 448
- Pauli-Matrizen, 221
- Pauli-Prinzip, 357
- Pauli-Spinoren, 247

- Paulische Spinmatrizen, 136
- PCAC, 393
- Phasenfokussierung, 72
- Phasenraum-Ellipse, 81
- Phasenraumelement, 108, 150
- Phasentransformationen, 194
- Photon, 169
- Photoproduktion, 453, 469
- π -Meson, 13, 179
- Poincaré-Gruppe, 144
 - Darstellungen, 146
- Polarisationsexperimente, 168
- Polarisationsvektoren, 171
- Polarisierte Photonen, 297
- Positronium, 388, 396
- Prinzip des detaillierten Gleichgewichts, 190
- Proportionalzählrohr, 94
- Proton-Lebensdauer, 636
- Pseudorapidität, 569
- ψ -Resonanzen, 469
- QCD-Korrekturen, 481, 560
- QCD-Potential, 408
- Quadrupol, 75, 76
- Quadrupolstärke, 76
- Quark-Antiquark-Potential, 341, 356
- Quark-Gluon-Plasma, 563
- Quark-Jet, 470
- Quarkmasse, 378
- Quarkmodell, 350
- Quarkmoleküle, 370
- Quarkonium, 388, 392, 400
- Quarks, 2, 44
- Quarksorte, 45, 48
- Quarkverteilungsfunktion, 454
- Radiative Zerfälle, 381, 391
- Rapidität, 143, 567
- Regenerations-Experiment, 207
- Regge-Phänomenologie, 564
- Regge-Trajektorie, 343
- Reichweite, 15
- Renormierte Ladung, 262
- Renormierungsgruppen-Gleichungen, 649
- Resonanzstreuung, 164
- ρ -Meson, 40
- ρ -Parameter, 539
- Rishon, 629
- Rosenbluth-Formel, 437
- Rutherford-Querschnitt, 280
- SAGE, 610
- Schauer, 92
- Schauerentwicklung, 99
- Schwere Ionen, 563
- Schwerpunktsenergie, 19
- seesaw*-Modell, 626
- Seequarks, 454
- Selbstenergie, 266
- Seltene Zerfälle, 654
- Seltsame Teilchen, 43
- Seltsamkeit, 43
- Semileptonische B -Zerfälle, 601
- Sfermion, 642
- Skalenverhalten, 447
- Smyon, 650
- SO_3 , 125
- Soft QCD, 571
- Sonnenmodell, 610
- Sorten-Quantenzahl, 48
- Speicherringe, 85
- Spin-Impuls-Korrelationen, 186
- Spin-Paritäts-Zustände, 353
- Spinoren, 242, 244, 248
- Splitting-Funktion, 305, 465
- Spontane Symmetriebrechung, 577
- Spurenkammer, 89, 93
- Starker Isospin, 48
- sterile Neutrinos, 625
- Stochastische Kühlung, 87
- stop*-Quark, 648
- Strahlungskorrekturen, 267
- Strahlungslänge, 92, 291, 310
- strange particles*, 43
- strangeness*, 43
- strangeness*-Oszillationen, 206
- Streulänge, 60
- Streumatrix, 103
- String-Modell, 341
- Stringmodell, 432
- Strom-Feld-Kopplung, 256
- Strommasse, 361
- Strukturfunktion, 446, 553
- SU_2 , 135, 219
- SU_3 , 321
- SU_5 , 631
 - Symmetrie, 633
- Substruktur (*compositeness*), 629, 630
- Sudbury Neutrino Observatory, 610
- SUGRA, 642
- Summenregel, 458
- Superkamiokande-Detektor, 607
- Superschwache Wechselwirkung, 213
- Supersymmetrie, 642
- Symmetrien der S -Matrix, 115
- Synchrotron, 71
 - Strahlung, 72

- Tau-Lepton, 31, 420
- Teilchen-Antiteilchen-Konjugation, 196, 624
- Thomas-Fermi-Modell, 290
- thrust*-Variable T , 427
- top*-Quark, 47, 551, 560
- Transfermatrix, 77
- Transversalimpulsverteilung, 566
- Tsallis-Funktion, 567

- Ultraviolett katastrophe, 260
- Unitarität der S -Matrix, 116
- Unitaritätsdreieck, 595
- Unitaritätsgrenze, 571
- Urknall, 218

- Vakuumpolarisation, 263
- Valenzquark, 456
- Vektor-Meson-Dominanz, 390, 482
- Vektormeson, 385
- Vektorstrom, 252
- Verbundene Diagramme, 395
- Vereinheitlichungsmasse, 645
- Verteilungsfunktion $f_{\gamma/\mu}(z)$, 304
- Vertexdetektor, 88
- Vertexkorrektur, 266
- Verzweigungsverhältnis, 64
- Vieldrahtproportionalzählkammer, 95
- Viererimpuls-Übertrag, 8
- Vierervektoren, 6
- Virtuelle Korrektur, 425, 464
- Virtuelle Teilchen, 52
- Virtueller Compton-Effekt, 423
- Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie, 549, 550

- W -Boson, 555
- Wechselwirkungslänge, 61, 92
- Weinberg-Winkel, 540
- Weizsäcker-Williams-Methode, 303
- Weizsäcker-Williams-Näherung, 444, 474
- WIMP*, 4
- Wirkungsquerschnitt
 - elastischer, 61
 - inelastischer, 61
- Wolfenstein-Darstellung, 593
- W -Paarerzeugung, 572
- W -Zerfall, 559

- Yangs Theorem, 171
- Ypsilon-Resonanz, 402
- Yukawa-Kopplung, 574, 639
- Yukawa-Kopplungskonstante, 12
- Yukawa-Teilchen, 13

- X - und Y -Bosonen, 633

- Z^0 -Austausch, 546
- Zeitumkehrinvarianz, 217
- Zerfall des Protons, 633
- Zerfallsbreite, 111
- Zerfallskaskade, 375
- Zerfallskonstante, 21
- Zerfallsraten, 63, 111
- Zerfallsverteilung, 152
- Zwei-Jet-Ereignis, 427
- Zwei-Körper-Zerfälle, 111, 152
- Zwei-Photonen-Physik, 473
- Zyklotron
 - Frequenz, 70