

Springer-Lehrbuch

Jörn Bleck-Neuhaus

Elementare Teilchen

Moderne Physik von den Atomen
bis zum Standard-Modell

 Springer

Prof.Dr. Jörn Bleck-Neuhaus
Universität Bremen
FB 1 Physik
28334 Bremen
Deutschland
bleck@physik.uni-bremen.de

Der Autor ist für Anregungen und Kritik dankbar.
(siehe auch <http://www.iup.uni-bremen.de/~bleck/Lehrbuch>)

ISSN 0937-7433

ISBN 978-3-540-85299-5

e-ISBN 978-3-540-85300-8

DOI 10.1007/978-3-540-85300-8

Springer Heidelberg Dordrecht London New York

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

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, 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.

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.

Satz und Herstellung: le-tex publishing services GmbH, Leipzig

Einbandentwurf: WMXDesign GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Springer ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.de)

Vorwort: Warum dieses Buch?

Moderne Physik wird der Teil der physikalischen Naturwissenschaft genannt, der mit der Entdeckung und Untersuchung der *Quanten* – kleinster Einheiten von Materie und kleinster Umsätze von Energie – in der Zeit um 1900 begann und immer noch anhält. Obwohl schon seit dem Altertum Gegenstand mehr oder weniger naturwissenschaftlicher Spekulationen, zeigten sich diese Quanten in den Experimenten nun mit so neuartigen Eigenschaften, dass sie mit den damals etablierten Begriffen der Physik – zusammenfassend die *Klassische Physik* genannt – nicht mehr zu verstehen waren. So hat der heute aktuelle Wissensstand der Kern- und Elementarteilchenphysik eine wechselvolle Entstehungsgeschichte, oft gekennzeichnet durch schockierend neue, immer noch schwer zu vermittelnde Begriffsbildungen. Dies Buch folgt dem Ansatz, die Entwicklungsprozesse selber für ein besseres Verständnis der schwierigen neuen Begriffe nutzbar zu machen.

Manch angehendem Physiker (gemeint sind ab hier immer beide Geschlechter) fällt es nicht gerade leicht, die Grundbegriffe der Modernen Physik wirklich anzunehmen, vor allem solche, denen vertraute Anschauungen der Klassischen Physik, ja des gesunden Menschenverstandes, widersprechen. Quantenbedingungen und Welle-Teilchen-Dualismus sind dafür nur die bekannteren Beispiele (und hier in Grundzügen schon vorausgesetzt¹), gefolgt von neuen Postulaten wie Spindrehimpuls, Antiteilchen, Erzeugung und Vernichtung von Materie, ununterscheidbare Teilchen, virtuelle Teilchen, verschränkte Zustände, verletzte Spiegel-Symmetrien etc. All diese Begriffe kennzeichnen wissenschaftliche Durchbrüche gegen das jeweils herrschende Vorverständnis. Sie waren daher alles andere als einfach und unbestritten – ähnlich wie früher schon Newtons Mechanik, Maxwells Elektrodynamik, Einsteins Relativitätstheorie. So dürfte es auch heutigen Studenten gehen: Ihre eigene Vorbildung in klassischer Physik ist zwar Voraussetzung dafür, die Wege zu den neuen Entdeckungen mitzugehen. Sie kann es ihnen aber auch erschweren, sich das aktuelle physikalische Bild von den fundamentalen Konstituenten der Materie und der Kräfte wirklich anzueignen, es mit dem Wissen über die klassische Physik

¹ Ebenfalls vorausgesetzt: Grundkenntnisse in den Werkzeugen der Quantenmechanik wie Schrödinger-Gleichung, Wellenfunktion, Zustandsvektor, Operatoren, Eigenwerte, Matrizen, Hilbert-Raum, Pauli-Prinzip.

zu verbinden und den richtigen Umgang mit beiden zu lernen. Zumal ihr Vorverständnis sich nicht nur in ihrem alltäglichen Leben sondern bisher auch in ihrem Physikstudium durchaus bewährt haben dürfte und keinesfalls nun über Bord geworfen gehört. Ganz im Gegenteil: Ein offener Umgang mit den widersprüchlichen Aspekten von klassischer und moderner Physik kann die Auseinandersetzung nach beiden Seiten produktiv machen und beide Begriffswelten integrieren.

Mit dieser Problematik stehen die Physiker in der besten Tradition ihrer Wissenschaft. Nicht erst seit dem Entstehen der Modernen Physik mussten sie sich darin üben, ihre Konzepte und Kategorien für Wahrnehmung und Erklärung, die aus dem praktischen Leben heraus entstanden waren, aufgrund widersprüchlicher experimenteller Beobachtungen immer wieder kritisch zu analysieren und, wo erforderlich, durch andere – notwendig weniger anschauliche, abstraktere – zu ersetzen. Erwähnt seien hier wieder die durch Galileis Trägheitsprinzip und Newtons Kraftgesetz schließlich erreichte Überwindung der Aristotelischen Mechanik, die in Einsteins Spezieller Relativitätstheorie notwendig gewordene Verknüpfung von Raum und Zeit, und künftig vielleicht die noch weitaus seltsamer erscheinenden Ideen über weitere Dimensionen des Weltalls oder über Schleifen im Fortschritt der Zeit.

Damit soll nicht gesagt werden, dass nicht auch andere Wissenschaften ihre „kopernikanischen Wendepunkte“ hatten – z.B. als die Vorstellung von der Scheibenform der Erde aufgegeben wurde, oder die Vorstellung der Unveränderlichkeit ihrer geographischen Beschaffenheit und der Lebensformen darin, oder als in der Mathematik die Infinitesimalrechnung oder in der Psychologie das Unbewusste entdeckt wurde. Auch ist Physik sicher nicht die abstrakteste aller Wissenschaften, man denke nur an Mathematik oder Philosophie. Doch scheint es so, dass die Physiker durch eine besonders harte Lehre gegangen sind, und womöglich deshalb genötigt wurden, eine erkennbar eigene Art des Denkens zu entwickeln.²

Denn die Physik hat sich in besonderem Maß dazu verpflichtet, zwischen ihren meistens unter Mühen herausgearbeiteten Grundbegriffen, auch den abstraktesten, und den Phänomenen, auch den unmittelbar anschaulichen der „direkten“ Wahrnehmung, ständig eine sichere Verbindung, einen beidseitigen Brückenschlag zu leisten. Ihr (selbst gewähltes) Ziel ist ja, die Vorgänge der (materiellen) Welt in allen Größenordnungen von Zeit und Raum als Folge einheitlicher Prinzipien und Gesetze zu verstehen. Daher begegnen Physiker wohl seit jeher mit besonderer Häufigkeit dem Gegensatz zwischen der Einfachheit der mit den Sinnen scheinbar unmittelbar aufgenommenen Phänomene und dem Abstraktionsgrad der zu ihrer Interpretation benötigten Begriffe.

In der Annahme, dass die Schwierigkeiten beim Physiklernen heute häufig den Widerständen ähneln, mit denen seinerzeit die Entdecker der neuen Konzepte, bei sich selber und in der Fachwelt, zu kämpfen hatten, wird hier stärker als in anderen Lehrbüchern der Prozess der Herausbildung der Neuerungen verarbeitet – durchaus auch aus der Rückschau mit dem Wissen von heute. Ziel ist, auf diese Weise ein profunderes physikalisches Verständnis für die schwierigen Befunde und Begriffe

² die in der Schule auch schwierig zu unterrichten sei.

zu fördern, die für die Erforschung des Mikrokosmos erarbeitet werden mussten. Obgleich sie nicht selten revolutionär anmuteten, sind sie heute auch aus der angewandten Physik oder sogar dem Alltag nicht mehr wegzudenken. Damit kann diese Darstellung auch eine lehrreiche Schule sein im Hinblick darauf, dass die Physik eine dynamische Naturwissenschaft und auch heute in ständiger Weiter-Entwicklung begriffen ist.

Inhalt der folgenden Kapitel:

1. Atome, und die zwei ersten wirklichen Elementarteilchen
2. Radioaktive Strahlen und der Weg ins Innere der Atome
3. Entdeckung des Atomkerns mit den Mitteln der klassischen Physik
4. Masse und Bindungsenergie der Kerne, Entdeckung von Proton und Neutron
5. Stoßprozesse quantenmechanisch
6. Physik der Radioaktiven Strahlen
7. Struktur der Kerne: Spin, Parität, Momente, Anregungsformen, Modelle
8. Nukleare Energie, Entwicklung der Sterne, Entstehung der Elemente
9. Elektron und Photon: Was Elementarteilchen sind und wie sie wechselwirken – Die Quanten-Elektrodynamik
10. Das Elektron als Fermion und Lepton
11. Proton, Neutron, Pion und der Hadronen-Teilchenzoo
12. Schwache Wechselwirkung und Gebrochene Symmetrien
13. Starke Wechselwirkung und Quark-Modell der Hadronen
14. Standardmodell der Elementarteilchen
15. Zwölf wesentlich neue Ergebnisse der Elementarteilchenphysik

Diese Gliederung folgt der begrifflichen Entwicklung der physikalischen Vorstellungen ungefähr in ihrem historischen Ablauf, wobei in Wirklichkeit natürlich alles viel zu eng miteinander verwoben war, als dass man es in so klarer Abfolge darstellen könnte. Zahlreiche Querverweise, Vor- und Rückgriffe zwischen den einzelnen Kapiteln geben davon einen Eindruck. Sie sind unvermeidlich, bezeugen aber auch den engen Zusammenhang der verschiedenen Zweige des physikalischen Denkens. Jedem Kapitel ist ein Überblick vorangestellt, der vorweg wichtige Ergebnisse kurz vorstellt und zugleich in den Zusammenhang der ganzen Entwicklung einordnet. Diese Überblicke sind auch als zusammenhängender Text lesbar, wenn die ausführlichen Darstellungen im Hauptteil jedes Kapitels übersprungen werden sollen. Um das Lesen eines einzelnen Kapitels zu erleichtern, ohne alle vorhergehenden präsent haben zu müssen, wird an die Bedeutung einiger Grundbegriffe immer wieder einmal mit kurzen Worten erinnert.

Die ganze Darstellung bemüht sich vor allem um die Vermittlung von Verständnis, sowohl bei den Einzelheiten als auch den Zusammenhängen. Die dafür nötige, möglichst sorgfältige und lückenlose Argumentation erfordert dann oft mehr Raum als die knappste exakte Darstellung, zumal eine gewisse Nähe zu Alltagsphänomenen und zur Umgangssprache durchaus beabsichtigt ist, gerade auch um an den für die Physik essentiellen Brückenschlag vom und zum Alltag zu erinnern. Dazu gehören auch Fragen, die laienhaft einfach klingen mögen, weshalb sie in Lehrbüchern

gewöhnlich gar nicht mehr auftauchen, die aber zur Abrundung und Integration des dargestellten Spezialwissens hilfreich sein können.³ Mit den Worten von Richard Feynman: Nur was man einfach ausdrücken kann, hat man gut verstanden.

Die eingestreuten Fragen und Aufgaben sind nicht als systematische Überprüfung des beabsichtigten Lernziels gedacht, sondern als Anregung an die Leser, auch selber Querverbindungen innerhalb des Kapitels, des Buchs oder sogar der weiteren Physik und Wissenschaft herzustellen. Immer liegt die Antwort bzw. Lösung in Reichweite, wird aber, um den Lesefluss nicht zu sehr zu unterbrechen, gleich mit angegeben.

Von den zahlreichen guten Lehrbüchern, die es zu diesen Themen schon gibt, werden oft *Experimentalphysik* Bd. 3 und 4 von W. Demtröder (Literaturverzeichnis [57, 58]) und *Elementarteilchenphysik* von C. Berger [24] zitiert. Häufig wurde, quasi als Wegweiser zu den originalen Schauplätzen, die Original-Literatur als Quelle herangezogen, auch wenn sie nun seit vielen Jahrzehnten fast nur noch auf Englisch erscheint – eine der sichtbaren Folgen der Vertreibung unzähliger Wissenschaftler erst aus Deutschland und dann aus den von ihm besetzten Ländern. Daher sind auch in Abbildungen die Beschriftungen oft auf Englisch.

Der Text entstand aus der Kursvorlesung an der Universität Bremen für Physik-Studierende ab dem 5. Semester im Zyklus „Höhere Experimentalphysik“. Bekanntschaft mit Quantenmechanik – etwa auf dem Niveau eines Grundkurs-IV „Quantenphysik“ – ist vorausgesetzt. Die Vorlesung ist nicht als Vorbereitung auf eine Spezialisierung in diesem Gebiet entwickelt worden. Vielmehr sollen die angehenden Physiker Kenntnisse über die subatomare Physik mitnehmen, die zum Allgemeinwissen ihres Fachs zählen dürfen. Das gilt auch für dieses Buch. Als Zielgruppe ist daher neben den Physik-Studierenden vor ihrem B.Sc.-Abschluss auch an Physik-Lehrende an Schulen oder Hochschulen gedacht.

Bedanken möchte ich mich vor allem bei meinen Studentinnen und Studenten, die durch Fragen, Kritik, Ermunterung und Anregungen über die Jahre erheblich dazu beigetragen haben, die Entwicklung der Argumentation und die Art ihrer Darstellung zu verbessern. (Manche zogen auch ein mehr traditionelles Lehrbuch über den augenblicklichen Stand des Wissens vor, wovon es ja eine reiche Auswahl gibt.) Zahlreichen Kollegen aus älterer und jüngerer Zeit danke ich ebenfalls für Kritik, Anregungen und Hinweise auf Fehler. Auch die hoffentlich zahlreichen künftigen Leserinnen und Leser sind gebeten, mir ihre Bemerkungen zum Buch mitzuteilen.

Bremen, Januar 2010

Jörn Bleck-Neuhaus

³ Daraus ergaben sich zahlreiche für ein Lehrbuch eher unkonventionelle Bemerkungen und damit auch entsprechende Stichworte für das alphabetische Register am Schluss des Buchs, um sie wieder aufzufinden – nebenbei eine Einladung, dort herumzustoßern.

Symbole, Schreibweisen, Abkürzungen

| | |
|---|--|
| $\vec{a}, \vec{b}, \dots, a, b, \dots$ | Vektoren im \mathbb{R}^3 und deren Beträge |
| $(\vec{a} \cdot \vec{b}), \vec{a} \times \vec{b}$ | Skalarprodukt, Vektorprodukt |
| $ \psi\rangle, \psi(t, \vec{r})$ | Zustandsvektor, Wellenfunktion |
| $\hat{O} (\hat{O}^\dagger)$ | Operator für die physikalische Größe O (hermitesch konjugiert) |
| $\langle x \rangle, \bar{x}$ | Erwartungswert/Mittelwert der Größe x |
| \hat{a}^\dagger, \hat{a} | Erzeugungs- bzw. Vernichtungsoperator |
| $[\hat{A}, \hat{B}]_\pm$ | Kommutator bzw. Antikommutator = $\hat{A}\hat{B} \pm \hat{B}\hat{A}$ |
| a | Beschleunigung |
| | Reichweite- oder Abschirm-Parameter |
| α | α -Teilchen |
| | Sommerfeldsche Feinstrukturkonstante |
| A | Atomgewicht |
| | Fläche |
| | Aktivität |
| | Anzahl Nukleonen im Kern |
| | Baryonenladung |
| \vec{A} | Vektorpotential ($\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$) |
| A^μ | elektrodynamisches 4-Potential ($\Phi/c, \vec{A}$) |
| a_{Bohr} | Bohrscher Radius (H-Atom, $\approx 0,053$ nm) |
| a_{NN} | Reichweite der Nukleon–Nukleon-Kraft |
| β | Elektron/Positron aus β -Radioaktivität |
| | Geschwindigkeit als v/c |
| b | Stoß-Parameter |
| | <i>bottom</i> -Quark |
| B | neutrales Austausch-Boson der elektroschwachen Wechselwirkung |
| | Farbladung <i>blau</i> |
| | B -Meson |
| B_1, \dots, B_5 | Terme des Tröpfchenmodells |
| \vec{B}, B | magnetisches Feld (Vektor bzw. Betrag) |

| | |
|--|--|
| \hat{c}^\dagger, \hat{c} | Erzeugungs- bzw. Vernichtungsoperator |
| c | Lichtgeschwindigkeit <i>charm</i> -Quark |
| \hat{C}, C | Ladungskonjugation bzw. Quantenzahl |
| <i>CMS</i> | Schwerpunktsystem (<i>center of mass system</i>) |
| c_P, c_V | spezifische Wärme bei konstantem Druck bzw. Volumen |
| δ | Differenz Deformationsparameter Diracsche δ -Funktion |
| Δ | Differenz Δ -Teilchen |
| d | Deuteron <i>down</i> -Quark |
| $d\sigma/d\Omega$ | differentieller Wirkungsquerschnitt |
| \vec{D} | elektrisches Dipolmoment |
| ϵ | Nachweiswahrscheinlichkeit (efficiency) des Detektors |
| η_{Coulomb} | Phase bei der Streuung am Coulomb-Potential |
| e | Elektron elektrische Elementarladung (positiv) |
| e | Zahl $e = 2,71828 \dots$ |
| E | Energie |
| \vec{E}, E | elektrisches Feld (Vektor bzw. Betrag) |
| E_B, E_{Ion} | Bindungsenergie, Ionisierungs-Energie |
| E_H | Bindungsenergie des H-Atoms (13,6 eV) |
| E_K, E_L | Bindungsenergie des Elektrons in der <i>K</i> - bzw. <i>L</i> -Schale |
| $E_{\text{kin}}, E_{\text{pot}}, E_{\text{rot}}$ | kinetische, potentielle und Rotations-Energie |
| E_{Fermi} | Fermi-Energie |
| <i>EC</i> | Elektronen-Einfang |
| f | Anzahl der Freiheitsgrade Streuamplitude Funktion |
| F | Faraday-Konstante ($= e N_A$) Kraft Fläche Formfaktor Gesamtdrehimpuls-Quantenzahl des Atoms |
| γ | γ -Quant, Photon Lorentz-Faktor Dirac-Matrix Newtons Gravitationskonstante |
| g | g -Faktor (magnetisches Moment) Erdbeschleunigung |
| g | Kopplungskonstante der Wechselwirkung |
| G | Gluon Gamov-Faktor |

| | |
|---|---|
| | Farbladung <i>grün</i> |
| $\hbar (= h/2\pi)$ | Plancksches Wirkungsquantum |
| H | Higgs-Boson |
| $\hat{H}, \hat{H}_0, \hat{H}_{\text{WW}}$ | Hamilton-Operator, ohne Wechselwirkung, nur Wechselwirkung |
| I | Intensität (Quadrat der Amplitude) |
| | Gesamtdrehimpuls-Quantenzahl eines Kerns |
| j | Gesamtdrehimpuls-Quantenzahl eines Teilchens (Bahn + Spin) |
| $j_\ell(x)$ | Besselfunktion |
| j^μ | 4-Stromdichte (ρ, \vec{j}) |
| J | Gesamtdrehimpuls-Quantenzahl der Hülle |
| J/Ψ | J/Ψ -Meson |
| k | Federkonstante |
| | Kritikalität im Reaktor |
| \vec{k}, k | Wellenvektor, Wellenzahl |
| $K^{0,\pm}$ | Kaon (neutral, geladen) |
| k_B | Boltzmann-Konstante |
| λ | Zerfallskonstante, Übergangsrate |
| | Wellenlänge |
| λ_C | Compton-Wellenlänge $\hbar/(mc)$ |
| Λ | Λ -Teilchen |
| | Energie der Renormierungsskala |
| | beliebig ausgerichtete Achse |
| ℓ | mittlere freie Weglänge |
| | Bahndrehimpuls-Quantenzahl eines Teilchens |
| | Lepton |
| L | Länge |
| | Laborsystem |
| | Gesamter Bahndrehimpuls |
| | Leptonenladung |
| LHC | Large Hadron Collider |
| m | (Ruhe-)Masse |
| | Einzelmessergebnis (natürliche Zahl) |
| $m_e, m_p, m_n, m_\pi \dots$ | Masse des Elektrons, Protons, Neutrons, Pions, ... |
| m_W | Masse des W -Boson bzw. Masse des Stoßpartners nach tief-inelastischer Streuung |
| m_{red} | reduzierte Masse $m_1 m_2 / (m_1 + m_2)$ |
| m_j, m_s, M_I, m_ℓ | magnetische Quantenzahl |
| μ | Mittelwert der Poisson-Verteilung |
| | Massenschwächungskoeffizient (γ -Strahlung) |
| | magnetisches Moment (auch $\vec{\mu}$) |
| | Myon (auch μ^\pm) |
| | = (0, 1, 2, 3) Laufindex für 4-Vektor |

| | |
|--|---|
| $\mu_{\text{Bohr}}, \mu_{\text{Kern}}$ | Bohrsches bzw. Kern-Magneton |
| M_{fi} | Matrizelement $\langle \Psi_{\text{fin}} \hat{H}_{\text{WW}} \Psi_{\text{ini}} \rangle$ |
| N | Anzahl Nukleon Anzahl Neutronen |
| n | Gasmenge in kmol Neutron Teilchendichte Hauptquantenzahl (Schalenmodell) Brechungsindex |
| \hat{n} | Teilchenzahl-Operator |
| n_e | Elektronendichte |
| ν | Neutrino Frequenz $\nu = \omega/2\pi$ |
| N_A | Avogadro-Konstante |
| Ω | Raumwinkel (θ, ϕ) Phasenraum-Volumen Ω -Teilchen |
| $\vec{\omega}, \omega$ | Winkelgeschwindigkeit (Vektor, Betrag) |
| ω_c | Zyklotronfrequenz QB/m |
| $\pi^{0,\pm}, \pi$ | Pion (neutral, geladen) Zahl $\pi = 3,1416\dots$ |
| ϕ, φ | im 3-dimensionalen: Azimutwinkel (Drehwinkel um die z -Achse) im 2-dimensionalen: Winkelabstand zur x -Achse |
| Φ^0 | Φ^0 -Meson |
| \vec{p}, p | Impuls, Impuls-Betrag |
| p | Proton Wahrscheinlichkeit |
| p^μ | 4-Impuls $(E/c, \vec{p})$ |
| P | Druck Paritäts-Quantenzahl Gesamtimpuls |
| \hat{P} | Raumspiegelung |
| $P_\mu(m)$ | Wahrscheinlichkeit (Poissonverteilung) |
| q | Quark Quantenzahl der elektrischen Ladung (in e) 4-Impuls-Übertrag |
| Q | elektrische Ladung (in A s) elektrisches Quadrupol-Moment Gütefaktor eines Resonators Energie-Ausbeute des Fusionsreaktors |
| QCD | Quanten-Chromo-Dynamik |
| QED | Quanten-Elektro-Dynamik |

| | |
|---|--|
| QFT | Quanten-Feld-Theorie |
| ρ | Dichte, Ladungsdichte größte Annäherung zweier Teilchen beim Stoß $\rho^{0,\pm}$ -Meson |
| ρ_0 | größte Annäherung bei zentralem Stoß |
| ρ_E | statistischer Faktor dn/dE in der Goldenen Regel |
| \vec{r} | Ort (x, y, z) |
| r_0 | Längenparameter für Kernradius |
| r_e | klassischer Elektronen-Radius (ca. 1,4 fm) |
| R | universelle Gaskonstante Krümmungsradius Kernabstand im Molekül Farbladung <i>rot</i> |
| \mathbb{R}, \mathbb{R}^3 | reelle Zahlengerade bzw. 3-dimensionaler Raum |
| R_q | Skalenfaktor der Wirkungsquerschnitte für elektro- magnetische Paarerzeugung von Quarks bzw. Leptonen |
| $R_{\text{Atom}}, R_{\text{Kern}}$ | Atom- bzw. Kernradius |
| σ | Wirkungsquerschnitt Standardabweichung |
| $\vec{\sigma} = (\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$ | Paulische Spin-Matrizen |
| s | Spindrehimpuls-Quantenzahl eines Teilchens Stromdichte <i>strange</i> -Quark |
| S | Schwerpunktsystem <i>strangeness</i> -Ladung Gesamtspin eines Teilchensystems Entropie |
| S_p, S_n | Separationsenergie des letzten Protons bzw. Neutrons |
| SLAC | Stanford Linear Accelerator |
| Sp \bar{p} S | Super-Proton-Antiproton-Synchrotron (<i>CERN</i>) |
| $SU(2), SU(3)$ | Gruppe der komplexen 2×2 - bzw. 3×3 -Matrizen mit Determinante +1 |
| τ | mittlere Lebensdauer Einschlusszeit des Fusionsplasmas τ^\pm Tauon |
| τ_R | Reaktorperiode |
| ϑ, θ | Ablenkwinkel, Polarwinkel (Abstand zur z -Achse) |
| Θ | Trägheitsmoment |
| θ_W | Weinberg-Winkel |
| θ_C | Cabibbo-Winkel |
| t | Zeit <i>top</i> -Quark |
| T | Temperatur, $T_{\text{Raum}} = 300 \text{ K}$ Isospin |

| | |
|--------------------------------|--|
| \hat{T} | Zeitumkehr |
| $T_{1/2}$ | Halbwertszeit |
| T_3 | Beitrag des Isospin zur elektrischen Ladung |
| u | up -Quark |
| \vec{u}, u | Geschwindigkeit im Schwerpunktsystem |
| \vec{v}, v | Geschwindigkeit |
| \vec{V}, V | Geschwindigkeit des Schwerpunkts |
| V | Volumen |
| $V(r)$ | Potential, potentielle Energie |
| V_0 | Tiefe des Potentialtopfs |
| W | Austrittsarbeit (Photoeffekt) |
| $W^{0,\pm}$ | Austausch-Boson der Schwachen Wechselwirkung |
| Υ | Υ -Meson |
| $Y_\ell^m(\vartheta, \varphi)$ | Kugelfunktion |
| Z | chemische Ordnungszahl |
| | Anzahl Protonen im Kern |
| | Zählrate $n / \Delta t$ |
| Z^0 | Austausch-Boson der Schwachen Wechselwirkung |

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|----|
| 1 | Zur Einführung: | |
| | Atome, und die zwei ersten wirklichen Elementarteilchen | 1 |
| | Überblick | 1 |
| 1.1 | Elementarteilchen: Die Ausgangslage um 1900 | 2 |
| 1.1.1 | Gibt es überhaupt Atome? | 2 |
| 1.1.2 | Elektron und Photon: Die ersten zwei richtigen Elementarteilchen | 14 |
| 1.2 | Überblick über den weiteren Inhalt | 18 |
| 1.3 | Stichworte zur Geschichte und Bedeutung der Kern- und Elementarteilchenphysik | 19 |
| 1.3.1 | Physikalische Entdeckungen | 19 |
| 1.3.2 | Technische Entwicklungen | 21 |
| 1.3.3 | Militärische Entwicklungen | 21 |
| 1.3.4 | Politisch wirksame Anstöße | 21 |
| 2 | Radioaktive Strahlen und der Weg ins Innere der Atome | 23 |
| | Überblick | 23 |
| 2.1 | Erste Experimente mit Radioaktivität | 25 |
| 2.1.1 | Fotoplatte mit Uransalzen: Henri Becquerel 1896 | 25 |
| 2.1.2 | Nebelkammer | 28 |
| 2.2 | Abbremsung von α -Teilchen: Niels Bohr 1913 | 31 |
| 2.2.1 | Versuch der Deutung der Nebelkammer-Spuren mit klassischer Mechanik | 31 |
| 2.2.2 | Bohrsche Theorie der Abbremsung von α -Teilchen | 35 |
| 2.2.3 | Untere und obere Grenze für den Energieverlust: Formeln von Bohr und Bethe/Bloch für das Bremsvermögen | 38 |
| 2.3 | α -Teilchen: Sonden zur Erkundung des Atominneren | 42 |
| 3 | Entdeckung des Atomkerns mit den Mitteln der klassischen Physik . . | 47 |
| | Überblick | 47 |
| 3.1 | Das Rutherford-Experiment | 49 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3.1.1 | Der Vorversuch | 49 |
| 3.1.2 | Streuung von α -Teilchen an Goldatomen | 50 |
| 3.2 | Rutherfordstreuung: Klassische Theorie | 52 |
| 3.2.1 | Thomson-Modell: Keine Erklärung für große Ablenkwinkel | 52 |
| 3.2.2 | Potentialstreuung: Klassische Trajektorien im Coulombfeld | 53 |
| 3.2.3 | Wirkungsquerschnitt | 56 |
| 3.2.4 | Experimentelle Überprüfung der Rutherford-Formel | 59 |
| 3.2.5 | Rutherfords Atommodell | 61 |
| 3.2.6 | Deutung der Rutherford-Formel | 62 |
| 3.3 | Aktuelle Anwendung: <i>Rutherford Backscattering Spectroscopy</i> | 62 |
| 3.4 | Anomale Rutherfordstreuung, Kernradius | 65 |
| 3.4.1 | Wie „punktförmig“ ist der Atomkern? | 65 |
| 3.4.2 | Kernradius | 66 |
| 3.5 | Zusammenfassung: Aufbau der Materie (Zwischenstand) | 70 |
| 3.5.1 | Aufbau der Atome aus Kern und Hülle | 70 |
| 3.5.2 | Vorkommen der Elemente | 71 |
| 4 | Masse und Bindungsenergie der Kerne, Entdeckung von Proton und Neutron | 73 |
| | Überblick | 73 |
| 4.1 | Masse der Atomkerne | 76 |
| 4.1.1 | Entwicklung des Kenntnisstands bis etwa 1910 | 76 |
| 4.1.2 | Messung der Massen einzelner Atome | 78 |
| 4.1.3 | Isotope | 82 |
| 4.1.4 | Das Proton und Rutherfords Proton-Elektron-Modell des Kerns | 83 |
| 4.1.5 | Das Neutron und das Proton-Neutron-Modell des Kerns | 88 |
| 4.1.6 | Präzisionsmessung und Massendefekt | 92 |
| 4.1.7 | Moderne Anwendungen und Messmethoden der Kernmassen | 93 |
| 4.2 | Energie-Inhalt der Atomkerne: Tröpfchen-Modell | 97 |
| 4.2.1 | Deutung des Massendefekts als Energieabgabe | 97 |
| 4.2.2 | Die mittlere Bindungsenergie pro Nukleon | 98 |
| 4.2.3 | Tröpfchen-Modell: Schrittweise Entwicklung | 104 |
| 4.2.4 | Tröpfchen-Modell: Physikalische Diskussion | 110 |
| 4.3 | Ausblick | 116 |
| 5 | Stoßprozesse quantenmechanisch | 119 |
| | Überblick | 119 |
| 5.1 | Stoß in der Quantenmechanik | 123 |
| 5.2 | Quantenmechanische Bewegungsgleichung/Weg zur Bornschen Näherung | 125 |
| 5.3 | Differentieller Wirkungsquerschnitt | 127 |
| 5.4 | Coulomb-Streuung in Bornscher Näherung | 128 |
| 5.4.1 | Berechnung von Streuamplitude und Wirkungsquerschnitt | 128 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.4.2 | Wellenmechanische Charakterisierung der Coulomb-Streuung | 130 |
| 5.5 | Mehrere Streuzentren: Die Intensitäten addieren oder die Amplituden? | 132 |
| 5.5.1 | Wann muss man die kohärente Überlagerung bilden? | 132 |
| 5.5.2 | Wann gilt Kohärente Summe = Inkohärente Summe? | 132 |
| 5.5.3 | Wann verschwindet der Interferenzterm? | 133 |
| 5.5.4 | Wann sind die Phasen der einzelnen Streuwellen gleichmäßig verteilt? | 134 |
| 5.5.5 | Zwischenergebnis: Rutherford-Modell bestätigt | 136 |
| 5.6 | Hofstadter-Streuung: Massen- und Ladungsverteilung im Kern | 136 |
| 5.6.1 | Coulomb-Streuung an ausgedehnter Ladungsverteilung | 137 |
| 5.6.2 | Die Form der Kerne | 139 |
| 5.7 | Ein quantenmechanischer Effekt: Kohärente Überlagerung der Streuamplituden von Projektil und Target | 142 |
| 5.7.1 | Abweichungen von der Rutherford-Formel bei Streuung identischer Teilchen | 143 |
| 5.7.2 | Interferenz von Projektil und Target | 146 |
| 5.7.3 | Destruktive Interferenz bei Fermionen | 149 |
| 6 | Physik der Radioaktiven Strahlen | 155 |
| | Überblick | 155 |
| 6.1 | Radioaktiver Zerfall, Zufallsprozesse, Quantensprünge | 157 |
| 6.1.1 | Das exponentielle Zerfallsgesetz und seine atomistische Deutung | 157 |
| 6.1.2 | Der metastabile Zustand und seine Lebensdauer: Die Goldene Regel | 162 |
| 6.1.3 | Messung von Halbwertszeiten und Gültigkeit des Zerfallsgesetzes | 171 |
| 6.1.4 | Zähler-Experimente: Der Beginn des digitalen Zeitalters | 175 |
| 6.1.5 | Zählstatistik: Poisson-Verteilung | 177 |
| 6.2 | Natürliche und zivilisatorische Quellen ionisierender Strahlung | 182 |
| 6.2.1 | Typen radioaktiver Emissionen und Quellen ionisierender Strahlung | 182 |
| 6.2.2 | Radioaktive Zerfallsreihe, radioaktives Gleichgewicht | 185 |
| 6.3 | α -Strahlung | 186 |
| 6.3.1 | Empirische Beziehung zwischen Übergangsrate und α -Energie | 187 |
| 6.3.2 | Tunneleffekt | 188 |
| 6.4 | γ -Strahlung | 192 |
| 6.4.1 | γ -Strahlen sind elektromagnetische Wellen | 192 |
| 6.4.2 | Exponentielle Abschwächung in Materie | 196 |
| 6.4.3 | Compton-Streuung | 198 |
| 6.4.4 | Photoeffekt | 204 |
| 6.4.5 | Paarerzeugung und Vernichtungsstrahlung | 209 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6.4.6 | Erzeugung von Photonen: Spontane Emission | 213 |
| 6.4.7 | Beziehung zwischen Übergangsrate und γ -Energie | 215 |
| 6.4.8 | γ -Spektroskopie: Beispiel | 222 |
| 6.5 | β -Strahlung | 226 |
| 6.5.1 | β -Teilchen sind Elektronen | 226 |
| 6.5.2 | β -Teilchen werden im Emissionsakt neu erzeugt | 228 |
| 6.5.3 | β -Energie-Spektrum kontinuierlich: Energiesatz verletzt? | 231 |
| 6.5.4 | Beziehung zwischen Übergangsrate und β -Energie | 232 |
| 6.5.5 | Drehimpuls-Erhaltung verletzt? | 233 |
| 6.5.6 | Neutrino-Hypothese 1930 | 233 |
| 6.5.7 | Fermi-Theorie des β -Zerfalls I: Form des kontinuierlichen Spektrums | 234 |
| 6.5.8 | Fermi-Theorie des β -Zerfalls II: Wechselwirkung mit Reichweite Null | 239 |
| 6.5.9 | β^+ -Radioaktivität | 240 |
| 6.5.10 | Elektronen-Einfang und zwei weit reichende Konsequenzen | 241 |
| 6.5.11 | Neutrino-Nachweis 1955 | 244 |
| 7 | Struktur der Kerne: Spin, Parität, Momente, Anregungsformen, Modelle | 249 |
| | Überblick | 249 |
| 7.1 | Drehimpuls, Spin und Statistik | 250 |
| 7.1.1 | Drehimpuls von Elektron, Hülle, Kern, Atom, Molekül: Grundlagen | 252 |
| 7.1.2 | Spin $\frac{1}{2}$ und Pauli-Spinor | 263 |
| 7.1.3 | Der unanschauliche Drehimpuls in Beispielen | 265 |
| 7.1.4 | Proton: Spin $\frac{1}{2}$ | 268 |
| 7.1.5 | Austauschsymmetrie und Statistik des Protons | 276 |
| 7.1.6 | Weitere Kernspins | 278 |
| 7.2 | Parität | 280 |
| 7.3 | Magnetisches Moment | 283 |
| 7.3.1 | Das magnetische Moment des Protons | 285 |
| 7.3.2 | Magnetische Momente anderer Kerne | 287 |
| 7.3.3 | Anwendung: Magnetische Kern-Resonanz (Prinzip) | 290 |
| 7.3.4 | Magnetische Kern-Resonanz (Beispiel) | 294 |
| 7.4 | Elektrische Momente | 295 |
| 7.4.1 | Elektrisches Dipolmoment? | 295 |
| 7.4.2 | Elektrische Quadrupolmomente | 299 |
| 7.5 | Kollektive Anregungsformen | 304 |
| 7.5.1 | Kollektive Schwingungen: Dipol-Riesenresonanz | 305 |
| 7.5.2 | Kollektive Rotation | 309 |
| 7.5.3 | Kollektive Schwingungen: Oberflächen-Vibration | 314 |
| 7.6 | Einzelteilchen-Modell | 317 |
| 7.6.1 | Evidenz für abgeschlossene Schalen bei Kernen: Die Magischen Zahlen | 320 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 7.6.2 | Schalenmodell mit Oszillator-Potential | 321 |
| 7.6.3 | Schalen-Modell mit Spin-Bahn-Wechselwirkung | 326 |
| 7.6.4 | Zur Begründung des Einzel-Teilchen-Modells | 329 |
| 8 | Nukleare Energie, Entwicklung der Sterne, Entstehung der Elemente | 333 |
| | Überblick | 333 |
| 8.1 | Größenordnung der Kernenergie | 334 |
| 8.1.1 | Ist die Sonne radioaktiv? Eine Anekdote | 334 |
| 8.1.2 | Größenordnungen und Bedeutung von Energie-Umsätzen | 336 |
| 8.2 | Kern-Spaltung | 338 |
| 8.2.1 | Physikalische Grundlagen | 338 |
| 8.2.2 | Entdeckungsgeschichte der induzierten Spaltung | 344 |
| 8.2.3 | Technische Umsetzungen: Reaktor und Bombe | 346 |
| 8.2.4 | Geregelte Kettenreaktion | 351 |
| 8.2.5 | Aufbau eines Kraftwerks und Nukleare Stromwirtschaft | 353 |
| 8.2.6 | Die „Atom“-Bombe | 356 |
| 8.3 | Kern-Fusion | 358 |
| 8.3.1 | Physikalische Grundlagen | 358 |
| 8.3.2 | Technische Nutzung | 362 |
| 8.4 | Stern-Energie, Stern-Entwicklung | 364 |
| 8.4.1 | <i>pp</i> -Fusion | 364 |
| 8.4.2 | Katalytischer CNO-Zyklus | 367 |
| 8.5 | Entstehung der chemischen Elemente aus Wasserstoff | 369 |
| 8.5.1 | Häufigkeit der Elemente und Nuklide | 369 |
| 8.5.2 | Entstehung von ^{12}C aus ^4He | 371 |
| 8.5.3 | Stern-Entwicklung und Entstehung der Elemente | 373 |
| 9 | Photon und Elektron – was Elementarteilchen sind und wie sie wechselwirken: Die Quantenelektrodynamik | 379 |
| | Überblick | 379 |
| 9.1 | Welle-Teilchen-Dualismus | 383 |
| 9.2 | Das Photon: Ein Teilchen, das erzeugt und vernichtet werden kann | 384 |
| 9.2.1 | Vom Wellenquant zum Teilchen | 384 |
| 9.2.2 | Vom Teilchen zum Feldquant | 388 |
| 9.3 | Das Elektron (und andere Elementarteilchen): Erste Merksätze | 389 |
| 9.3.1 | Alle Elementarteilchen können erzeugt und vernichtet werden | 389 |
| 9.3.2 | Zu Teilchen gibt es Antiteilchen | 389 |
| 9.3.3 | Elementarteilchen der gleichen Sorte sind vollständig ununterscheidbar | 390 |
| 9.4 | Zweite Quantisierung/Anfänge der Quanten-Feldtheorie | 397 |
| 9.4.1 | Freie Teilchen im Vakuum | 397 |
| 9.4.2 | Der Hamilton-Operator für freie Teilchen | 398 |
| 9.4.3 | Mögliche Prozesse und der Hamilton-Operator mit Wechselwirkungen | 399 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 9.5 | Der grundlegende Prozess der elektromagnetischen Wechselwirkung | 402 |
| 9.6 | Virtuelle Photonen | 403 |
| 9.7 | Feynman-Graphen | 411 |
| 9.7.1 | Elementare Prozesse | 411 |
| 9.7.2 | Elektron-Elektron-Wechselwirkung (virtuelles Photon beteiligt) | 412 |
| 9.7.3 | Elektron-Photon-Wechselwirkung (virtuelles Elektron beteiligt) | 413 |
| 9.7.4 | Photonen-Emission (virtuelles Elektron und virtuelles Photon beteiligt) | 413 |
| 9.7.5 | Feynman-Regeln | 414 |
| 9.7.6 | Antiteilchen | 416 |
| 9.7.7 | Renormierung | 420 |
| 9.8 | Deutung der Austauschwechselwirkung | 423 |
| 10 | Das Elektron als Fermion und Lepton | 425 |
| | Überblick | 425 |
| 10.1 | Spin und Magnetisches Moment: Die frühen Befunde | 427 |
| 10.2 | Diracsche Elektronentheorie (1928) | 429 |
| 10.2.1 | Weg zur relativistischen Wellengleichung | 429 |
| 10.2.2 | Spin | 431 |
| 10.2.3 | Negative Energie? | 434 |
| 10.2.4 | Anomales magnetisches Moment | 435 |
| 10.2.5 | Wie die Dirac-Gleichung Lorentz-invariant wird | 437 |
| 10.2.6 | Anti-Teilchen | 442 |
| 10.2.7 | Chiralität | 447 |
| 10.2.8 | Spin, Statistik, Symmetrie | 449 |
| 10.3 | Die weiteren Leptonen | 454 |
| 10.3.1 | Myonen | 454 |
| 10.3.2 | Verschiedene Leptonenladung von Myon und Elektron | 462 |
| 10.3.3 | Die dritte Leptonen-Familie | 464 |
| 10.4 | Neutrinos | 469 |
| 10.4.1 | Neutrino-Reaktionen | 469 |
| 10.4.2 | Neutrinos von der Sonne und der Supernova | 471 |
| 10.4.3 | Dirac-Teilchen oder doch nicht? | 473 |
| 10.4.4 | Neutrino-Oszillation | 474 |
| 11 | Teilchenzoo der Hadronen | 479 |
| | Überblick | 479 |
| 11.1 | Pionen | 482 |
| 11.1.1 | Vorhersage und Entdeckung der geladenen Pionen | 482 |
| 11.1.2 | Erzeugung von Pionen | 487 |
| 11.1.3 | Schwacher Zerfall, Masse und Lebensdauer der geladenen Pionen | 490 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 11.1.4 | Neutrales Pion: Elektromagnetische Produktion und Zerfall | 494 |
| 11.1.5 | Spin der Pionen | 497 |
| 11.1.6 | Parität der Pionen | 499 |
| 11.1.7 | Pionen als Sonden: Resonanzen in der Pion-Nukleon-Streuung | 502 |
| 11.2 | Ordnung im Teilchenzoo (1): Symmetrien und Isospin | 506 |
| 11.2.1 | Symmetrien der Wechselwirkung | 506 |
| 11.2.2 | Isospin | 509 |
| 11.3 | Ordnung im Teilchenzoo (2): „Seltsamkeit“ und Hierarchie | 512 |
| 11.3.1 | Entdeckung „seltsamer“ Teilchen | 512 |
| 11.3.2 | Charakterisierung und Hierarchie der Wechselwirkungen | 514 |
| 11.3.3 | Physikalische Eigenschaft „Seltsamkeit“ | 515 |
| 11.3.4 | Isospin, <i>strangeness</i> , und die SU(3)-Symmetrie | 518 |
| 11.4 | Antiprotonen | 522 |
| 11.5 | Die Instrumente: Beschleuniger und Detektoren | 524 |
| 11.5.1 | Beschleunigerentwicklung – Ein kurzer Eindruck | 525 |
| 11.5.2 | Detektoren – ein kurzer Überblick mit Beispielen | 526 |
| 11.6 | Ausgang aus dem Teilchenzoo | 532 |
| 12 | Schwache Wechselwirkung und gebrochene Symmetrien | 535 |
| | Überblick | 535 |
| 12.1 | Frühgeschichte (bis 1956) | 537 |
| 12.2 | Gebrochene Spiegelsymmetrien (I): Parität | 538 |
| 12.2.1 | Raumspiegelung \hat{P} | 538 |
| 12.2.2 | Paritätsinvarianz in der Quantenmechanik | 541 |
| 12.2.3 | Bruch der Paritätsinvarianz | 542 |
| 12.2.4 | Das Wu-Experiment: β^- -Strahlen werden bevorzugt entgegen der Spin-Richtung ausgesandt | 543 |
| 12.2.5 | Polarisation von β -Strahlen und Neutrinos | 545 |
| 12.3 | Gebrochene Spiegelsymmetrien (II): Ladungskonjugation | 548 |
| 12.3.1 | Ladungskonjugation \hat{C} | 548 |
| 12.3.2 | Heilung der Paritätsverletzung durch CP-Invarianz | 550 |
| 12.3.3 | Strangeness-Oszillationen | 554 |
| 12.3.4 | Brechung der CP-Invarianz | 558 |
| 12.4 | Gebrochene Spiegelsymmetrien (III): Zeitumkehr | 559 |
| 12.4.1 | Zeitumkehr \hat{T} | 559 |
| 12.4.2 | Erhaltung von $\hat{C}\hat{P}\hat{T}$ | 562 |
| 12.5 | Die Austauschteilchen W, Z | 563 |
| 12.5.1 | Fermi-Wechselwirkung nicht renormierbar | 563 |
| 12.5.2 | Konstruktion von Austauschteilchen als Eichbosonen | 567 |
| 12.5.3 | Elektroschwache Wechselwirkung | 571 |
| 12.5.4 | Experimenteller Nachweis der schweren Austauschbosonen | 578 |
| 13 | Quarks, Gluonen, Starke Wechselwirkung | 583 |
| | Überblick | 583 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 13.1 | Quarks | 586 |
| 13.1.1 | Die Hypothese | 586 |
| 13.1.2 | Gebrochene Elementarladung | 588 |
| 13.1.3 | Typische Prozesse mit Quarks | 590 |
| 13.1.4 | Anomale magnetische Momente der Nukleonen | 592 |
| 13.1.5 | Neuer Freiheitsgrad: Farbe | 593 |
| 13.1.6 | Auswahlregel: Nur weiße Teilchen reell | 594 |
| 13.1.7 | Aufbau der Hadronen aus Quarks | 596 |
| 13.2 | Quarks nachgewiesen? | 599 |
| 13.2.1 | Tief-inelastische Elektron-Proton-Streuung | 600 |
| 13.2.2 | Quarks elektromagnetisch erzeugt | 606 |
| 13.2.3 | Ein viertes Quark: <i>charm</i> | 609 |
| 13.2.4 | Charmonium und das Quark-Quark-Potential | 611 |
| 13.3 | Chromodynamik | 614 |
| 13.3.1 | Starke Wechselwirkung durch Austausch von Gluonen | 614 |
| 13.3.2 | Einschluss (<i>confinement</i>) | 617 |
| 13.3.3 | Sind Quarks noch Teilchen? Welche Masse haben sie denn? | 622 |
| 13.3.4 | Die Kernkräfte: Reichweite und näherungsweise Symmetrien | 625 |
| 13.3.5 | Asymptotische Freiheit | 628 |
| 13.4 | Schwere Quarks | 630 |
| 14 | Standard-Modell der Elementarteilchenphysik | 631 |
| | Überblick | 631 |
| 14.1 | Genauigkeitsrekord: Leptonen- <i>g</i> -Faktoren | 636 |
| 14.2 | Wie viele Familien von Leptonen? | 641 |
| 14.3 | Wie viele Familien von Quarks? | 645 |
| 14.3.1 | Die Einführung der 2. Familie | 645 |
| 14.3.2 | Die Einführung der 3. Familie | 648 |
| 14.4 | Quark-Lepton-Symmetrie | 649 |
| 14.5 | Rückweg nach oben | 651 |
| 14.5.1 | „Die Phänomene retten“ | 651 |
| 14.5.2 | Die Materie | 651 |
| 14.5.3 | Die Prozesse | 653 |
| 14.6 | Offene Fragen | 655 |
| 14.6.1 | Higgs-Boson | 655 |
| 14.6.2 | Noch zu viele Parameter? | 658 |
| 14.6.3 | Seltsame andere Materie? | 660 |
| 15 | Zwölf wesentliche Ergebnisse der Elementarteilchenphysik | 663 |
| | Überblick | 663 |
| 15.1 | Es gibt Elementarteilchen. | 664 |
| 15.2 | Es gibt nur wenige Grundtypen von Elementarteilchen. | 666 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 15.3 | Die punktförmigen Elementarteilchen können Drehimpuls haben ohne sich zu drehen, und magnetisch sein, ohne dass ein Strom fließt. | 667 |
| 15.4 | Elementarteilchen können erzeugt und vernichtet werden. | 667 |
| 15.5 | Zu Teilchen gibt es Antiteilchen. | 668 |
| 15.6 | Elementarteilchen sind (wenn von der gleichen Sorte) vollkommen ununterscheidbar. Für Fermionen gilt dazu noch ein absolutes gegenseitiges Ausschließungsprinzip. | 669 |
| 15.7 | Der Elementarakt der elektromagnetischen Wechselwirkung ist das Emittieren oder Absorbieren eines Photons. Auch das elektrostatische Potential entsteht so. | 670 |
| 15.8 | Elementarteilchen entfalten messbare Wirkungen auch aus „unphysikalischen“ Zuständen heraus, in denen sie selbst prinzipiell unbeobachtbar sind (<i>virtuelle Zustände</i>). | 671 |
| 15.9 | Jede der vier Grundkräfte der Natur kommt durch Austausch von Elementarteilchen in virtuellen Zuständen zustande (den <i>Austauschbosonen</i>). | 672 |
| 15.10 | Für die Wechselwirkungsprozesse gibt es eine exakte Bildersprache | 673 |
| 15.11 | Es gelten die vier Erhaltungssätze der klassischen Physik (für Energie, Impuls, Drehimpuls, elektrische Ladung). Jedoch sind die Spiegel-Symmetrien der klassischen Physik (Raum, Zeit, Ladungsvorzeichen) gebrochen. | 675 |
| 15.12 | Die Teilchen können weitere Arten von Ladung tragen, die sich zum Teil ineinander umwandeln lassen. Das macht unklar, wieviel Arten von Teilchen als verschieden gezählt werden müssen. | 676 |
| | Literaturverzeichnis | 681 |
| | Sachverzeichnis | 689 |