

Vorwort

Die wesentliche Ergänzung der neuen Auflage besteht in der Überarbeitung und Erweiterung der Übungsaufgaben mit Lösungen, deren Zahl fast verdoppelt wurde. Die Aufgaben sind ausführlich kommentiert und stellen somit eine Ergänzung des Lehrstoffes dar.

Weitere Verbesserungen und Ergänzungen, insbesondere die neuen Entwicklungen in der Neutrino-Physik, flossen in die vorliegende Auflage mit ein.

Besonderen Wert wurde auch auf das Layout gelegt, dass eine bessere Lesbarkeit des Buches garantieren soll. Die Abbildungen wurden komplett überarbeitet und soweit wie möglich vereinheitlicht.

Wir bedanken uns bei allen Studenten und Dozenten für ihre Kommentare und Anmerkungen. Insbesondere danken wir Gertrud Dimler (Springer-Verlag Heidelberg) für die gute Zusammenarbeit und Jürgen Sawinski (Heidelberg) für Ideen und Überarbeitung der L^AT_EX-Quellen sowie der Abbildungen.

Heidelberg, Mai 1999

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 An-

hang 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.

Heidelberg, April 1993

Bogdan Povh
Klaus Rith
Christoph Scholz
Frank Zetsche

12. Das Standardmodell

Se non è vero, è ben trovato.

Giordano Bruno
Gli eroici furori

Die Wissenschaft hat ewig Grenzen,
aber keine ewigen Grenzen.

P. du Bois-Reymond
Über die Grenzen
des Naturerkennens

Das *Standardmodell* der Elementarteilchenphysik umfasst die vereinheitlichte Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung und die Quantenchromodynamik. Im Folgenden wird noch einmal resümiert, was wir in den vorangegangenen Kapiteln über die verschiedenen Teilchen und Wechselwirkungen gelernt haben.

- Wir kennen, neben der Gravitation, drei elementare Wechselwirkungen, die in ihrer Struktur sehr ähnlich sind. Jede von ihnen wird durch den Austausch von Vektorbosonen vermittelt.

Wechselwirkung	koppelt an	Austausch-Teilchen	Masse (GeV/c ²)	J ^P
stark	Farbe	8 Gluonen (g)	0	1 ⁻
elektromagn.	elektrische Ladung	Photon (γ)	0	1 ⁻
schwach	schwache Ladung	W [±] , Z ⁰	≈ 10 ²	1

Gluonen tragen Farbe und wechselwirken deshalb untereinander. Die Bosonen der schwachen Wechselwirkung, die selbst schwache Ladung tragen, koppeln ebenfalls aneinander.

- Neben den Austauschbosonen gibt es weitere fundamentale Teilchen, die Quarks und Leptonen. Diese sind Spin-1/2-Teilchen, also Fermionen. Sie werden in aufsteigender Masse in drei „Familien“ oder „Generationen“ angeordnet.

Fermionen	Familie			elektr. Ladung	Farbe	schwacher Isospin		Spin
	1	2	3			linkshdg.	rechtshdg.	
Leptonen	ν_e e	ν_μ μ	ν_τ τ	0 -1	—	1/2	— 0	1/2
Quarks	u d	c s	t b	+2/3 -1/3	r, b, g	1/2	0 0	1/2

Zu allen diesen Fermionen gibt es die entsprechenden Antifermionen mit gleicher Masse, aber entgegengesetzter elektrischer Ladung, Farbe und dritter Komponente des schwachen Isospins.

Aus der experimentell gemessenen Breite der Z^0 -Resonanz lässt sich zeigen, dass es kein viertes masseloses Neutrino und damit keine vierte Generation von Fermionen (zumindest keine vierte Generation mit masselosem Neutrino) geben kann.

- Da die Photonen masselos sind, hat die elektromagnetische Wechselwirkung eine unendliche Reichweite. Die Reichweite der schwachen Wechselwirkung beträgt wegen der großen Masse der Austauschbosonen 10^{-3} fm. Den Gluonen schreibt man die Masse Null zu. Die effektive Reichweite der starken Wechselwirkung ist jedoch dadurch beschränkt, dass Gluonen untereinander wechselwirken. Bei Abständen $\gtrsim 1$ fm ist die Energie des Farbfelds so groß, dass sie zur Erzeugung reeller Quark-Antiquark-Paare ausreicht. „Freie“ Teilchen müssen immer farbneutral sein.
- Die elektromagnetische und die schwache Wechselwirkung können als Aspekte einer einheitlichen Wechselwirkung, der elektroschwachen Wechselwirkung, aufgefasst werden, wobei die entsprechenden Ladungen durch den Weinberg-Winkel über (11.14) verknüpft sind.
- Bei den Wechselwirkungen gelten unterschiedliche Erhaltungssätze:
 - Bei allen drei Wechselwirkungen bleiben Energie (E), Impuls (\mathbf{p}), Drehimpuls (\mathbf{L}), Ladung (Q), Farbe, Baryonenzahl (B) und die drei Leptonenzahlen (L_e, L_μ, L_τ) erhalten.
 - Die Paritäten P und C bleiben bei der starken und der elektromagnetischen Wechselwirkung erhalten, nicht jedoch bei der schwachen Wechselwirkung. Der geladene Strom der schwachen Wechselwirkung ist maximal paritätsverletzend, denn er koppelt nur an linkshändige Fermionen und rechtshändige Antifermionen; der neutrale schwache Strom ist teilweise paritätsverletzend, denn er koppelt in unterschiedlicher Stärke an rechts- und linkshändige Fermionen und Antifermionen. Man kennt einen Fall, bei dem die kombinierte CP -Parität nicht erhalten bleibt.
 - Nur der geladene Strom der schwachen Wechselwirkung wandelt Quarks in andere Quarks (Quarks mit anderem Flavour) und Leptonen in andere Leptonen um. Die Quantenzahlen, die den Quark-Flavour angeben (dritte Komponente des Isospins (I_3), Strangeness (S), Charm (C) etc.) bleiben daher bei den übrigen Wechselwirkungen erhalten.
 - Der Betrag des Isospins (I) bleibt bei der starken Wechselwirkung erhalten.

Die möglichen Übergänge innerhalb der Leptonen- und Quarkdupletts und über die Grenzen der Familien hinaus sind in Abb. 12.1 dargestellt. Vielleicht ist dieses Bild der Vorbote einer neuen Art von Spektroskopie, die noch elementarer ist als die Spektroskopie der Atome, Kerne und Hadronen.

Insgesamt zeigen die Experimente eine verblüffend gute quantitative Übereinstimmung mit den Annahmen des Standardmodells, wie der Anord-

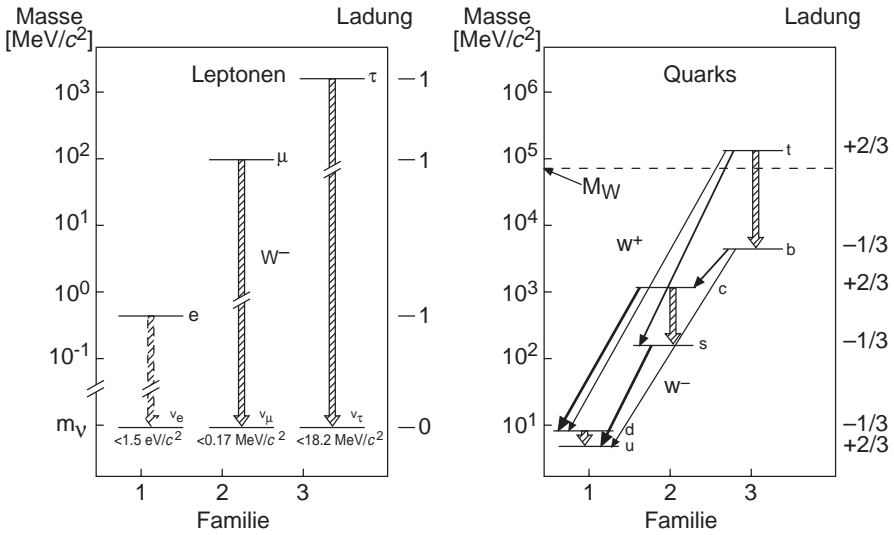


Abb. 12.1. Übergänge von Quark- und Leptonzuständen durch geladene Ströme. Die Breite der Pfeile spiegelt die Stärke der Kopplung wider. Aus Gründen der Energie- und Ladungserhaltung wird der Übergang $e^- \rightarrow \nu_e$ zwar in Reaktionen wie Leptonenstreuung oder K-Einfang beobachtet, nicht jedoch als Zerfall eines freien Teilchens. Die Masse des t-Quarks ist so groß, dass es unter Emission eines realen W^+ -Bosons zerfällt.

nung der Fermionen in linkshändige Dupletts und rechtshändige Singulets des schwachen Isospins, der Stärke der Kopplung des Z^0 an die linkshändigen und rechtshändigen Fermionen, der Verdreifachung der Quarkfamilien aufgrund der Farbe und dem Verhältnis der Massen von W^\pm und Z^0 . Somit ergibt sich ein abgeschlossenes Bild der fundamentalen Bausteine der Materie und ihrer Wechselwirkungen.

Andererseits bleibt vieles am heutigen Standardmodell noch unbefriedigend. So gibt es eine große Zahl freier Parameter (18 oder mehr, je nach Zählweise [Na86]), zum Beispiel die Massen von Fermionen und Bosonen, die Kopplungskonstanten der Wechselwirkungen und die Koeffizienten der CKM-Matrix. Diese Parameter ergeben sich nicht aus dem Standardmodell, sondern müssen experimentell ermittelt und ad hoc in das Modell eingebaut werden.

Viele Fragen sind noch völlig ungeklärt: Warum gibt es gerade 3 Familien von Fermionen? Haben die Neutrinos endliche Massen? Wie entstehen die Massen der übrigen Fermionen und der W- und Z-Bosonen? Gibt es das Higgs-Boson? Ist es ein Zufall, dass innerhalb jeder Familie die Fermionen um so größere Massen haben, je mehr Ladungen (stark, elektromagnetisch, schwach) sie tragen? Gilt die Erhaltung der Baryonen- und Leptonenzahl streng? Was ist der Ursprung der CP-Verletzung? Woher kommt die Mi-

schung der Quarkfamilien, die durch die CKM-Matrix beschrieben wird? Gibt es eine solche Mischung auch für Leptonen? Warum gibt es gerade vier Wechselwirkungen? Wodurch ist die Größe der Kopplungskonstanten der einzelnen Wechselwirkungen festgelegt? Kann man die starke und die elektroschwache Wechselwirkung zusammenfassen, so wie man es bei der elektromagnetischen und der schwachen Wechselwirkung getan hat? Kann man auch die Gravitation einbinden?

Dass man sich solche Fragen überhaupt stellt, spiegelt bereits die Erfahrung der Physiker mit der Analyse der Bausteine der Materie wider. Auf dem Wege vom Festkörper über das Molekül, das Atom, den Kern und das Hadron zum Quark hin haben sie immer wieder neue fundamentale Teilchen finden können. Deshalb fragen sie „Warum?“ und setzen damit implizit voraus, dass es eine noch fundamentalere Ursache der beobachteten Phänomene gibt – eine Annahme, die man nur experimentell verifizieren kann.

Nature has always looked like a horrible mess, but as we go along we see patterns and put theories together; a certain clarity comes and things get simpler.

Richard P. Feynman [Fe85]

20. Vielkörpersysteme der starken Wechselwirkung

How many bodies are required before we have a problem? G.E. Brown points out that this can be answered by a look at history. In eighteenth-century Newtonian mechanics, the three-body problem was insoluble. With the birth of relativity around 1910 and quantum electrodynamics in 1930, the two- and one-body problems became insoluble. And within modern quantum field theory, the problem of zero bodies (vacuum) is insoluble. So, if we are out after exact solutions, no bodies at all is already too many!

R. D. Mattuck [Ma76]

Im zweiten Teil dieses Buches haben wir den Aufbau von Vielkörpersystemen aus Quarks beschrieben. Für die Bindung dieser Systeme ist die starke Wechselwirkung verantwortlich, im Unterschied zu den Atomen, Molekülen und Festkörpern, die durch die elektromagnetische Wechselwirkung zusammengehalten werden.

Die aus Quarks aufgebauten Systeme – Hadronen und Kerne – sind komplexe quantenmechanische Systeme. Diese Komplexität äußert sich zum Beispiel darin, dass solch ein System viele Facetten aufweist, die nicht miteinander vereinbar scheinen. Einige Aspekte solcher Systeme lassen sich im Einteilchenbild verstehen, andere deuten auf die Existenz größerer Substrukturen hin, wieder andere werden als kollektive Effekte des gesamten Systems erklärt, und einige schließlich sind chaotisch und lassen sich nur statistisch beschreiben. Jedes dieser Konzepte beschreibt aber nur einen Teilaspekt des Systems.

Quasiteilchen. Bei ausreichend niedriger Anregungsenergie lassen sich Vielkörpersysteme, auch wenn sie eine komplizierte innere Struktur haben, oft als ein System von sogenannten *Quasiteilchen* beschreiben. Statt die elementaren Bausteine mit ihrer unübersehbaren Vielfalt gegenseitiger Wechselwirkung zu behandeln, betrachtet man „effektive Teilchen“ (z. B. Elektronen und Löcher im Halbleiter). Ein Großteil der Wechselwirkung der elementaren Konstituenten untereinander ist dabei in der inneren Struktur der Quasiteilchen enthalten, so dass diese Quasiteilchen nur schwach miteinander wechselwirken.

Kollektive Zustände. Eine andere Klasse von elementaren niederenergetischen Anregungen sind sogenannte kollektive Zustände, bei denen viele Bausteine des Systems kohärent zusammenwirken. Dies können die Gitterschwingungen eines Kristalls (Phononen) oder Wellen an der Oberfläche eines Atomkerns sein.

Chaotische Phänomene. Mit wachsender Anregungsenergie wird die Komplexität jedes Vielteilchensystems immer größer und entzieht sich einer quantitativen Beschreibung, die auf elementaren Anregungen aufbaut. Es treten dann statistische Phänomene auf, die universellen Charakter haben, also unabhängig von Details der Wechselwirkung sind.

Hadronen. Über die Struktur der Hadronen ist noch wenig bekannt. Ihre elementaren Bestandteile sind Gluonen und Quarks. Um sie aber tatsächlich experimentell beobachten zu können, müsste man bei „unendlich“ großen Impulsüberträgen messen. Daher sieht man auch in der tiefinelastischen Streuung immer nur effektive Quarks, also Vielteilchengebilde. Der Erfolg der QCD besteht darin, die Abhängigkeit der Strukturfunktionen von der Auflösung quantitativ zu erklären; der absolute Verlauf der Strukturfunktionen, also die Struktur der Hadronen, kann hingegen noch nicht vorhergesagt werden, auch nicht bei großen Impulsüberträgen.

Die Struktur der Nukleonen hängt jedoch vom Verhalten der Quarks bei kleinen relativen Impulsen ab, da angeregte Zustände Energien von nur einigen 100 MeV haben. Bei derart geringen Impulsüberträgen ist die Kopplungskonstante α_s so groß, dass die in der QCD übliche Störungsrechnung nicht mehr anwendbar ist und man es mit einem echten Vielteilchensystem zu tun hat.

Es hat sich herausgestellt, dass man die spektroskopischen Eigenschaften der Hadronen allein durch Konstituentenquarks beschreiben kann und man die Gluonen nicht berücksichtigen muss. Die Konstituentenquarks sind keine elementaren Teilchen, sondern komplexe Gebilde, die wir als *Quasiteilchen* auffassen. Sie unterscheiden sich in ihren Eigenschaften (z. B. Masse, Ausdehnung, magnetisches Moment) deutlich von den elementaren Quarks. Es scheint so zu sein, dass sich durch die Einführung solcher Quasiteilchen eine gewisse Ordnung in der Spektroskopie der Hadronen erzielen lässt. Zwar ist die gruppentheoretische Klassifizierung der angeregten Zustände sehr erfolgreich, aber die dynamischen Eigenschaften sind wenig verstanden. Es ist auch nicht klar, ob komplexe Anregungen der Hadronen im Konstituentenquarkmodell beschrieben werden können.

Angeregte Zustände von Hadronen mit leichten Quarks sind nur bis ca. 3 GeV bekannt. Dabei werden die Resonanzen um so breiter und liegen um so dichter beieinander, je höher die Energie ist. Bei Energien $\gtrsim 3$ GeV sind keine Resonanzstrukturen mehr zu erkennen. Dies wäre unter Umständen der Bereich, in dem chaotische Phänomene zu erwarten wären. Man kann sie aufgrund der großen Breiten der Resonanzen jedoch nicht beobachten.

Kollektive Phänomene sind in Hadronen ebenfalls noch nicht beobachtet worden. Das mag daran liegen, dass die Zahl der effektiven Konstituenten zu klein ist, um kohärente Phänomene aufbauen zu können.

Kräfte der starken Wechselwirkung. *Elementare* Teilchen (Quarks und Leptonen) wechselwirken durch *elementare* Kräfte, die durch den Austausch von Gluonen, Photonen, W- und Z-Bosonen vermittelt werden. Die Kräfte

zwischen Systemen mit innerer Struktur (Atomen, Nukleonen, Konstituentenquarks) sind komplizierterer Natur und selbst Vielteilchenphänomene, wie z. B. die Van-der-Waals-Kräfte oder die kovalenten Bindungskräfte.

In erster Näherung parametrisiert man die Kräfte der starken Wechselwirkung zwischen Nukleonen oder zwischen Konstituentenquarks durch effektive Kräfte, die kurzreichweitig sind und je nach Spin und Isospin anziehend oder abstoßend sind. Bei Konstituentenquarks setzt man die Wechselwirkung bei kleinen Abständen durch die des 1-Gluon-Austauschs mit einer effektiven Kopplungskonstante an, und bei großen Abständen wird der Viel-Gluon-Austausch durch ein Confinement-Potential parametrisiert. Für die Wechselwirkung im 2-Nukleonen-System spielt der 2-Gluon-Austausch (Van-der-Waals-Kraft) oder der 2-Quarks-Austausch (kovalente Bindung) vermutlich eine kleinere Rolle.

Die kurzreichweitige Abstoßung ist einerseits die Konsequenz der Symmetrie der Quarkwellenfunktion des Nukleons und andererseits der chromomagnetischen Abstoßung. Der dominierende Anteil der anziehenden Kernkraft wird durch den Austausch von $q\bar{q}$ -Paaren vermittelt. Es ist keine Überraschung, dass sich diese Paare als leichte Mesonen identifizieren lassen.

Im Kern wird diese Kraft überdies durch Vielkörpereffekte (z. B. das Pauli-Prinzip) stark modifiziert. Deswegen werden bei den Rechnungen in der Kernphysik häufig phänomenologische Kräfte verwendet, deren Form und Parameter an experimentelle Ergebnisse angepasst werden.

Kerne. Es ist eine naive Vorstellung, dass der Kern aus Nukleonen besteht. Realistischer ist es, die Konstituenten des Kerns als Quasi-Nukleonen zu betrachten. Die Eigenschaften dieser Quasiteilchen ähneln denen der Nukleonen, wenn sie sich nahe der „Fermikante“ befinden. So lassen sich einige Phänomene der Kerne bei niedrigen Energien (Spin, magnetisches Moment und Anregungsenergien) durch die Eigenschaften einzelner schwach gebundener Nukleonen auf der äußersten Schale oder durch Löcher in einer abgeschlossenen Schale erklären.

Stark gebundene Nukleonen können nicht individuellen Schalenmodellzuständen zugeordnet werden. Dies äußert sich beispielsweise darin, dass die bei quasielastischer Streuung beobachteten „Zustände“ sehr breit sind. Im Gegensatz dazu scheint für ein stark gebundenes Λ -Teilchen im Kern die Quasiteilchen-Beschreibung auch für die sehr tief gebundenen Zustände adäquat zu sein.

Auch größere Einheiten im Kern können sich als Quasiteilchen verhalten. Paare von Neutronen bzw. Protonen koppeln im Kern zu Systemen mit $J^P = 0^+$, also zu bosonischen Quasiteilchen. Man vermutet, dass die Paarung von Nukleonen zu suprafluiden Phänomenen in Kernen führt, in Analogie zu Cooper-Paaren im Supraleiter und zu Atom-Paaren im suprafluiden ${}^3\text{He}$. Wir haben gesehen, dass die Trägheitsmomente der Rotationszustände qualitativ mit einem Zweiflüssigkeitsmodell aus einer normalen und einer suprafluiden Phase beschrieben werden können.

Manche Eigenschaften der Kerne kann man als kollektive Anregungen deuten. Besonders anschaulich sind solche Effekte in schweren Kernen. So lassen sich Dipol-Riesenresonanzen als Dichteschwingungen interpretieren. Als endliches System kann ein Kern auch Formschwingungen ausüben. Die Quadrupolanregung wird in Analogie zur Festkörperphysik als Phonon beschrieben. Besonders vielfältig sind die Rotationsbanden deformierter Kerne.

Bei höheren Energien geht der Quasiteilchen- und kollektive Charakter der Anregungen verloren. Es beginnt der Bereich der Konfigurationsmischungen, in denen Zustände aus Superpositionen von Teilchen-Loch- und/oder kollektiven Wellenfunktionen aufgebaut werden. Bei noch höheren Anregungsenergien nimmt die Niveaudichte der Kerne exponentiell mit der Anregungsenergie zu, und eine quantitative Beschreibung der einzelnen Niveaus wird unmöglich. Die hohe Komplexität der Niveaus ermöglicht eine neue Art der Beschreibung, nämlich mit statistischen Methoden.

Digestif. Wir haben uns bemüht, bei jedem Schritt in komplexere Systeme möglichst auf den Erkenntnissen über die elementarerer Systeme aufzubauen. Dieses Bemühen hat uns zwar sehr geholfen, tiefere Einsichten in die Architektur komplexerer Systeme zu gewinnen, zur *quantitativen* Behandlung der komplexen Phänomene haben wir aber neue, *effektive* Bausteine und zwischen ihnen wirkende effektive Kräfte einführen müssen.

Bei der Hadronenspektroskopie haben wir letztendlich die Konstituentenquarks benutzt und nicht die Quarks der grundlegenden QCD; die Wechselwirkung zwischen Nukleonen wird am besten durch den Austausch von Mesonen beschrieben, und nicht durch den Austausch von Gluonen und Quarks; im Kern werden anstelle der aus der Nukleon-Nukleon-Wechselwirkung bekannten Kräfte meist effektive Kräfte verwendet; der Reichtum der kollektiven Zustände im Kern ist, auch wenn wir die Verbindung zum Schalenmodell skizziert haben, mit kollektiven Variablen quantitativ besser zu beschreiben als mit kohärenten Einteilchenanregungen. Dies bedeutet, dass man die beste Beschreibung immer im Rahmen einer „effektiven Theorie“ findet, die unserer experimentellen Auflösung angepasst ist. Dies ist aber keineswegs eine Besonderheit komplexer Systeme der starken Wechselwirkung, sondern findet sich generell in Vielkörpersystemen.

Heute gehen die Bemühungen um ein besseres Verständnis in beide Stoßrichtungen: Man versucht zu prüfen, ob das heutige Standardmodell der Elementarteilchenphysik eine elementare oder auch „nur“ eine effektive Theorie ist, und zugleich versucht man, die Gesetzmäßigkeiten in komplexen Systemen der starken Wechselwirkung noch besser zu verstehen.

Wenn du dieses Buch gelesen hast, dann binde einen Stein daran und wirf es in den Euphrat.

Jeremia 51, 63