

# Modelle und Forschungsdynamik: Strategien der zeitgenössischen Physik

Stephan Hartmann\*

## Zusammenfassung

An Beispielen aus der Entwicklung der Elementarteilchenphysik wird aufgezeigt, welche Rolle Modelle im Entstehungsprozess einer physikalischen Theorie spielen. Modelle finden sowohl aus pragmatischen als auch aus didaktischen Gründen als Vorstufe einer Theorie und als Ersatz für eine Theorie Verwendung. Damit stellt die “Modellmethode” eine wesentliche methodologische Strategie der aktuellen physikalischen Forschung dar.

## 1 Theorienentwicklung als Gegenstand der Wissenschaftstheorie

Modelle spielen eine wesentliche Rolle im Entstehungsprozess einer physikalischen Theorie. Es ist das Ziel des vorliegenden Aufsatzes, diese Aussage an Beispielen aus der Elementarteilchenphysik zu erläutern und zu belegen, um anschließend einige wissenschaftstheoretische und didaktische Konsequenzen aufzuzeigen.

Wie gehen Wissenschaftler bei der Entwicklung einer neuen Theorie vor? Folgen sie in ihrer kreativen Arbeit bestimmten methodologischen Regeln, oder sind ihre Geistesprodukte allein das Resultat eines genial anmutenden, unanalysierbaren Bemühens? Philosophen mit so unterschiedlichen wissenschaftstheoretischen Auffassungen wie *H. Reichenbach*, *K. Popper* und *P. Feyerabend* argumentieren einhellig für die letztgenannte Alternative. Nach *H. Reichenbach* beschäftigt sich die Philosophie immer nur mit der “Konstruktion des *Rechtfertigungszusammenhangs*”, der *Entdeckungszusammenhang* gehört in das Reich

---

\*Eine erweiterte Version erschien in *Praxis der Naturwissenschaften – Physik* 1/95, 33–41 (1995).

der Psychologie<sup>1</sup>. Und auch *K. Poppers* "Logik der Forschung" ist einzig und allein ein Schema, wissenschaftliche Hypothesen zu testen. Auf welche Weise der Forscher zu diesen Hypothesen kam, ist - jedenfalls für *Popper* - jenseits wissenschaftlicher Rationalität. *Popper* schreibt<sup>2</sup>:

An der Frage, wie es vor sich geht, daß jemand etwas Neues einfällt - sei es nun ein musikalisches Thema, ein dramatischer Konflikt oder eine wissenschaftliche Theorie-, hat wohl die empirische Psychologie Interesse, nicht aber die Erkenntnislogik. Diese interessiert sich nicht für *Tatsachenfragen* (Kant: "quid facti"), sondern nur für *Geltungsfragen* ("quid iuris")...

Trotz seiner Skepsis gegenüber einer philosophischen Analyse des kreativen Entstehungsprozesses einer Theorie soll hier betont werden, daß *Popper* an vielen Stellen seines Werkes auf den Einfluß metaphysischer Hintergrundüberzeugungen auf die Hypothesenwahl hinweist.

Die Herausforderung, ein Verfahren zu entwickeln, wissenschaftliche Erkenntnisse regelgeleitet zu finden, hat eine lange Tradition in der Geistesgeschichte, man denke nur an *R. Lullus* oder an *Leibniz'* Bemühungen um eine *ars inveniendi*. Aus verschiedenen Gründen haben Philosophen nicht erst im Gefolge des logischen Empirismus endgültig mit einem derartigen durchaus attraktiven Ziel gebrochen. Dies bedeutet jedoch nicht, daß der Forschungsprozess philosophisch uninteressant ist. In der Tat blendet ein Wissenschaftsphilosoph den größten Teil wissenschaftlicher Aktivitäten aus seiner metatheoretischen Arbeit aus, wenn er sich nur mit der Rekonstruktion<sup>3</sup> "toter Theorien" - um eine treffende Charakterisierung von *J. Audretsch*<sup>4</sup> zu verwenden - oder etwa der begrifflichen Analyse wissenschaftlicher Erklärungen beschäftigt<sup>5</sup>.

Eine genauere Betrachtung des Forschungsprozesses in der Physik zeigt, daß dieser häufig von der bewußten Inkaufnahme von Inkonsistenzen und anderen Vorgehensweisen geprägt ist, die einem an den Klassikern der modernen Logik geschulten Philosophen die Haare zu Berge stehen lassen. Aktuelle physikalische Theorien sind in diesem Sinne zuweilen vorläufig, an ihrer unmittelbaren Verbesserung wird gearbeitet und am Ende eines solchen Prozesses steht irgendwann einmal eine allen geheiligten Kriterien der Wissenschaftstheorie gerechtwerdende Theorie. Es ist aber gerade diese spezifische *Vorläufigkeit*,

---

<sup>1</sup>[14], S. 3

<sup>2</sup>[11], S. 6

<sup>3</sup>Unter der Rekonstruktion einer Theorie versteht man in der Wissenschaftstheorie eine Formulierung der Theorie in der Sprache der mathematischen Modelltheorie.

<sup>4</sup>[4], S. 381

<sup>5</sup>In diese Richtung geht auch die Kritik einiger Fachwissenschaftler an der Wissenschaftstheorie, vgl. die Arbeit [4] von *J. Audretsch* und [12] von *H. Primas*. Dazu auch [17], S. 198 f.

die ein wesentliches Merkmal der aktuellen Physik und eine entscheidende Grundlage ihres pragmatischen Erfolges darstellt.

Wissenschaftler verfolgen bei ihrer alltäglichen Arbeit oftmals andere *Strategien* als die, die Philosophen fernab der Labors und Schreibtische der Physiker als logisch-methodologisch plausibel erscheinen. Diesen alltäglichen Forschungsprozess<sup>6</sup> und die dahinter liegende Rationalität anhand von speziellen Problemsituationen zu analysieren, ist das Ziel dieser Arbeit.

Am konkreten Beispiel einer Analyse der Funktion von Modellen im Forschungsprozess soll *eine* Strategie der zeitgenössischen Wissenschaft aufgezeigt werden. Im folgenden Abschnitt 2 werden zunächst vier verschiedene Typen von Modellen nach ihrer Verwendung klassifiziert und untersucht. Anschließend wird in Abschnitt 3 an einem Fallbeispiel aus der Physik der starken Wechselwirkung detailliert gezeigt, welche Rolle Modelle bei der Entwicklung dieser Theorie spielten. Schließlich werden in Abschnitt 4 noch einige didaktische Konsequenzen dieser Untersuchung erläutert.

## 2 Die Funktion von Modellen in der Physik

Es soll an dieser Stelle nicht der Versuch unternommen werden, genau zu definieren, was ein Modell ist. Dies geschieht jedoch nicht, weil wir mit *T. W. Adorno* glauben, daß Definitionen rationale Tabus sind<sup>7</sup>, sondern aus einem mehr praktischen Grund. *L. Apostel* [3] stelle schon 1961 fest, daß eine Definition des Modellbegriffs in den Wissenschaften aufgrund seiner diversen Verwendungsmöglichkeiten geradezu unmöglich ist. Dieser Eindruck hat sich in den letzten Jahren eher verstärkt. Es ist sogar schwer, im Sprachgebrauch der Physiker einen Unterschied zwischen “Modell” und “Theorie” auszumachen. Oder wie ist es etwa zu erklären, daß die fundamentale Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung heute oft als das Weinberg-Salam-Modell bezeichnet wird? So kann man mit gutem Grund eine Bevorzugung des Modellbegriffs gegenüber dem Theoriebegriff diagnostizieren.

Wie kommt es zu dieser geradezu inflationären Verwendung des Modellbegriffs? Ein wesentlicher Aspekt ist sicher, daß Physiker vorsichtig und skeptisch gegenüber ihren eigenen Geistesprodukten geworden sind. Theorien sind in der Regel *vorläufig* und werden bald von einer “besseren” ersetzt. Der Modellbegriff scheint diese *Vorläufigkeit* in genuiner Weise zu berücksichtigen.

Einige angesehene Philosophen, wie etwa *P. Achinstein* [1], *M. Bunge* [6] und *M. Red-*

---

<sup>6</sup>Der “alltägliche” Forschungsprozess sei hier vom “revolutionären” Forschungsprozess unterschieden. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich ausschließlich mit der Forschung innerhalb eines Forschungsprogramms im Sinne von *I. Lakatos*.

<sup>7</sup>Vgl. [2], S. 24

*head* [13] haben sich trotz *L. Apostels* Warnung nicht davon abhalten lassen, genauer zu analysieren, was ein Modell in der Physik ist. Da diese Arbeiten bereits im Beitrag von *M. Stöckler*<sup>8</sup> vorgestellt wurden, soll das Bungesche Konzept hier - der Vollständigkeit halber - nur kurz dargestellt werden.

Ein Modell (oder eine spezielle Theorie) besteht nach *Bunge* aus zwei Teilen, einer fundamentalen Theorie und speziellen Modellannahmen. Als Illustration mag das zur Beschreibung von Gasen herangezogene Billard-Ball-Modell dienen. Bei der fundamentalen Theorie handelt es sich um die Newtonsche Mechanik, zu den Modellannahmen gehört etwa die Aussage, daß es sich bei einem Gas um eine Menge von Partikeln handelt, die sich in einem vorgegebenen Behälter irregulär bewegen.

Wichtig ist es hier festzuhalten, daß diese Analyse des Modellbegriffs eine originär statische ist. Es wird von Anfang an davon ausgegangen, daß es bereits eine Klasse von Modellen gibt, die dann mit den Mitteln der analytischen Wissenschaftsphilosophie auf ihre gemeinsamen Elemente hin analysiert werden kann. Wie ein Modell (in diesem Fall also die fundamentale Theorie bzw. die Modellannahmen) jedoch zustande kommt, bleibt hier genauso unberücksichtigt wie die Frage, welche Rolle Modelle allgemein im Forschungsprozess spielen. Gleichwohl sind Modelle im Bungeschen Sinne im Forschungsprozess von einer gewissen Bedeutung. Eine wesentliche Eigenschaft dieser Modelle ist nämlich, daß sie unmittelbar Anlaß zum Weiterfragen geben. Darauf weist auch *S. Toulmin* deutlich hin:

... einer der Hauptvorteile eines guten Modells besteht ... gerade darin, daß uns neue Fragen einfallen, wenn wir es betrachten, daß es uns über die vorgegebenen Phänomene hinaus und zur Formulierung von Hypothesen führt, die sich bei experimenteller Nachprüfung als fruchtbar erweisen können.<sup>9</sup>

Das kann am Beispiel des Billard-Ball-Modells der Gase illustriert werden. Geht man davon aus, daß die das Gas konstituierenden Teilchen punktförmig sind, so ergeben sich bekanntlich die Gesetze des idealen Gases. Nun zeigt aber der Vergleich mit dem Experiment, daß nicht alle Gase in dieser Weise "ideal" sind. Als verbesserte Beschreibung solcher Systeme bietet es sich an, Effekte des tatsächlich endlichen Teilchenvolumens zu berücksichtigen. Das Ergebnis entsprechender Rechnungen ist die Van-der-Waals-Gleichung, mit der nun auch Flüssigkeit-Gas-Phasenübergänge beschreibbar sind - allerdings auf Kosten zweier systemabhängiger Parameter. Weitere Modifikationen der Modellannahmen bieten sich an und können mit der Methode der Virialentwicklung konsistent berücksichtigt werden<sup>10</sup>.

---

<sup>8</sup>Dieses Heft, S.

<sup>9</sup>[16], S. 37 f

<sup>10</sup>Die allgemeine Theorie, hier die Newtonsche Mechanik, bleibt unverändert. Man kann jedoch auch

Es fällt auf, daß es theoretische Konstrukte gibt, die von Physikern als Modell bezeichnet werden und die in keiner Weise in das Bungesche Schema passen, so etwa das oben bereits erwähnte Weinberg-Salam-Modell oder auch das Quarkmodell in der Hadronenphysik. Das Weinberg-Salam-Modell beschreibt die Wechselwirkung fundamentaler Teilchen wie Elektronen und Neutrinos, deren Eigenschaften selbst allein durch die Theorie festgelegt werden<sup>11</sup>. Scheint es in diesem Fall keine speziellen Modellannahmen im Bungeschen Sinne zu geben, so fehlt beim Quarkmodell - zumindest in seiner ursprünglichen Form<sup>12</sup> - die zugrundeliegende Theorie komplett. Das (ursprüngliche) Quarkmodell ist ein allein auf gruppentheoretischen Überlegungen basierendes Klassifikationsschema für stark wechselwirkende Teilchen<sup>13</sup>.

Es erweist sich, daß man - neben dem Bungeschen - drei Modelltypen nach ihrer Funktion im Forschungsprozess unterscheiden kann. Diese sind: (i) Modelle als Ersatz für eine Theorie, (ii) "Spielzeug"-Modelle und (iii) Entwicklungsmodelle. Im folgenden sollen zunächst - der Vollständigkeit halber - die ersten beiden Typen kurz erläutert werden. Dann werden die für diese Arbeit besonders wichtigen Entwicklungsmodelle vorgestellt, deren Bedeutung im Forschungsprozess, wie sich zeigen wird, nicht zu überschätzen ist.

**Modelle als Ersatz für eine Theorie** finden in der aktuellen Forschung manifoldige Verwendung. Oftmals ist man zwar im Besitz einer fundamentalen Theorie, um ein gegebenes Problem zu lösen. Es zeigt sich aber, daß die unmittelbare Anwendung der Theorie praktisch unmöglich ist. Die entsprechenden Gleichungen sind entweder mit den derzeit zur Verfügung stehenden analytischen und numerischen Methoden nicht lösbar oder - schlimmer noch! - gar nicht erst formulierbar. Beispiele für diese Situation gibt es viele: So kann man etwa die Quantenchromodynamik (QCD) nicht direkt zur Berechnung der Hadronen- und Kernstruktur einsetzen<sup>14</sup>. Ein anderes Beispiel ist fast das gesamte Gebiet der Festkörperphysik. Aufgrund der komplizierten Korrelationen zwischen sehr vielen Teilchen ist man zwangsläufig auf simplifizierende Modellannahmen angewiesen. Es ist aussichtslos, auch nur zu versuchen, z.B. das Verhalten eines Kristalles ausgehend von den Gesetzen der Quantenelektrodynamik (QED) zu untersuchen.

Stattdessen entwickeln die Forscher phänomenologische Modelle, die die relevanten physikalischen Modellannahmen beibehalten und nun als allgemeine Theorie die Quantenmechanik nehmen. Auf diese Weise gelangt man zur Beschreibung von Quantengasen.

<sup>11</sup>Die Theorie enthält jedoch Parameter, die etwa die Masse der Elementarteilchen bestimmen.

<sup>12</sup>Später bekam das Quarkmodell in Form des nichtrelativistischen Quarkmodells eine dynamische Komponente, vgl. [10], S. 85 f.

<sup>13</sup>Teilchen, die dem Einfluß der starken Wechselwirkung unterliegen werden als *Hadronen* bezeichnet. In der Gruppe der Hadronen unterscheidet man noch einmal zwischen den fermionischen *Baryonen* (halbzahliger Spin) und den bosonischen *Mesonen* (ganzzahliger Spin); vgl. dazu auch Abschnitt 3.

<sup>14</sup>Auf numerische Berechnungen im Rahmen der gittertheoretischen Formulierung der QCD wird weiter unten eingegangen.

sikalischen Freiheitsgrade des betrachteten Systems effektiv beschreiben. So sind etwa Nukleonen- und Pionfelder die wesentlichen Freiheitsgrade in der Kernphysik nicht zu hoher Energien. Bei der Beschreibung der Phänomene im Supraleiter hat es sich als sinnvoll erwiesen, Elektronenpaare (Cooper-Paare) als die relevanten Freiheitsgrade anzusehen. Diese physikalische Einsicht stellt die Grundlage der BCS-Theorie der Supraleitung dar, wie sie 1957 von *J. Bardeen*, *L. Cooper* und *J. Schrieffer* formuliert wurde. Diese Modelle haben den großen pragmatischen Vorteil, relativ leicht (oder besser: überhaupt) lösbar zu sein. Nachteilig ist sicher, daß sie in keinem direkt-ableitbaren Zusammenhang zur fundamentalen Theorie stehen. Ihre theoretische Rechtfertigung ist also fraglich. So sind sie weder fundamental, noch "richtig" in dem Sinne, in dem (möglicherweise) die fundamentale Theorie richtig ist. Außerdem enthalten Modelle dieser Art gewöhnlich viele freie, an das Experiment anzupassende Parameter.

All dies mag den Anschein erwecken, als ob die Tatsache, daß Physiker bei ihren alltäglichen Berechnungen aus pragmatischen Gründen oftmals auf einfache Modelle angewiesen sind, eine ganz und gar bedauernswürdige Situation ist. Dies ist jedoch keineswegs der Fall! Außer ihrer leichten Handhabbarkeit haben derartige Modelle wesentliche Vorteile aufgrund ihrer einfachen Struktur. So vermitteln sie zuweilen mehr physikalische Einsicht als etwa die allgemeine Theorie, die in ihrem physikalischen Gehalt nur schwer zu überschauen ist. Ein Beispiel mag dies verdeutlichen: Seit einigen Jahren gibt es die Möglichkeit, die Gleichungen der QCD direkt numerisch zu lösen, um so die Massen von Hadronen und andere Observablen zu berechnen. Um diese Rechnungen auszuführen, werden die Gleichungen zunächst mit Hilfe der Feynmanschen Pfadintegralmethode auf einem raum-zeitlichen Gitter formuliert und anschließend numerisch gelöst. Es sei an dieser Stelle hervorgehoben, daß sich die zugrundeliegenden physikalischen Mechanismen mit diesem *black-box*-Verfahren nicht offenlegen lassen. So bleibt es z.B. unklar, welche physikalischen Prozesse (Polarisationseffekte, wie wichtig ist der Dirac-See?) wesentlich zur Masse der Hadronen beitragen und welche nur von untergeordneter Bedeutung sind. In einer gittertheoretischen Rechnung werden alle möglichen Prozesse gleichermaßen berücksichtigt. Tatsächlich tragen aber oftmals nur einige wenige "Graphen" oder Klassen von Graphen dominant bei. In der Identifikation und physikalischen Interpretation dieser Prozesse liegt ein wesentliches Element physikalischer Einsicht.

Auch für die Heuristik der Theorienfindung ist die physikalische Einsicht, die sogenannte "Anschauung", ein nicht zu unterschätzendes Hilfsmittel. Dies hat auch didaktische Implikationen. Ein konkretes physikalisches Problem läßt sich gewöhnlich verständlicher machen, wenn man es mit einem einfachen Modell erklärt. Dieses Phänomen gibt es auch schon in der klassischen Physik. Man denke etwa an die heuristisch wichtigen mechanischen Modelle für elektrodynamische Prozesse (*Lord Kelvin*, *J.C. Maxwell*).

Zusammengefaßt läßt sich sagen, daß Modelle als Ersatz für eine Theorie einfach lösbare, allerdings nicht fundamentale, “anschauliche” und somit sowohl das Verständnis als auch die Intuition fördernde theoretische Konstrukte zur Beschreibung realer physikalischer Phänomene sind.

“**Spielzeug**”-Modelle sind Modelle ohne direkte physikalische Anwendung. So stellt sich natürlich sofort die Frage, warum diese Art von Modellen überhaupt von Physikern ernsthaft studiert wird. Tatsächlich stellt die damit verbundene, noch näher zu charakterisierende Methode eine wichtige Strategie physikalischer Forschung dar.

Am besten läßt sich all dies an einem Beispiel klarmachen. In der Quantenfeldtheorie gehört die sogenannte  $\varphi^4$ -Theorie zu den beliebtesten Untersuchungsgegenständen. In vielen einschlägigen Lehrbüchern wird sie ausführlich behandelt und in Fachveröffentlichungen finden sich immer wieder Verweise auf diese Theorie, die, wie es scheint, selbst keine unmittelbare physikalische Anwendung hat. Es gibt kein physikalisches System, was allein den Gesetzen der  $\varphi^4$ -Theorie gehorcht. Wir haben es also mit einem typischen “Spielzeug”-Modell zu tun.

Die  $\varphi^4$ -Theorie ist die am einfachsten zu konstruierende, nichttriviale Quantenfeldtheorie wechselwirkender Felder. Viele allgemeine Probleme der Quantenfeldtheorie, wie etwa das der Renormierung, treten schon in dieser Theorie auf und können so systematisch studiert werden.

Hervorzuheben ist auch die didaktische Bedeutung von “Spielzeug”-Modellen. Da es i.a. viel leichter ist, einen komplizierten Formalismus an einem einfachen Beispiel zu lernen, überwiegen hier die Vorteile von “Spielzeug”-Modellen gegenüber den Nachteilen, da es für diese Zwecke zunächst einmal uninteressant ist, ob das studierte Modell tatsächlich eine physikalische Anwendung hat oder nicht.

**Entwicklungsmodelle** sind Modelle, die - in historischer und systematischer Hinsicht - Vorstufen einer Theorie darstellen. Der Term “Entwicklungsmodell” wurde 1980 von *J. Leplin* eingeführt (“Developmental Models”). *Leplin* zeigt am Beispiel der Entwicklung der frühen Quantenmechanik durch *M. Planck* und *A. Einstein* die Bedeutung spezieller Modelle im Prozess des Ringens um diese Theorie.

Entwicklungsmodelle spielten aber nicht nur in der guten alten Zeit eine bedeutende Rolle. Sie sind vielmehr auch heute noch ein ganz wesentliches Hilfsmittel bei der Theorienkonstruktion. Einen für die Rekonstruktion der Entwicklung moderner physikalischer Theorien wichtigen Beitrag leistete der amerikanische Wissenschaftsphilosoph *P. Suppes* im Jahr 1962. *Suppes* rekonstruierte die Entwicklung einer psychologischen Theorie (einer speziellen Reiz-Reaktionstheorie) aus einer “aufsteigenden” Folge von Modellen[15]. Unter “aufsteigend” ist hierbei zu verstehen, daß die zeitlich späteren Theorien auf allgemeineren Prinzipien beruhen und einen größeren Phänomenbereich abdecken. Diese von

*Leplin* nicht erörterte Variante eines Entwicklungsmodells erfreut sich - wie nun gezeigt werden soll - auch großer Beliebtheit in der physikalischen Grundlagenforschung.

Bevor dies am Beispiel der Entwicklung der Quantenchromodynamik erläutert wird, soll erst noch ein wichtiger Unterschied zwischen Rekonstruktionen in der Psychologie und in der Physik aufgezeigt werden. Ein ganz wesentliches Element physikalischer Theoriebildung ist die Orientierung an allgemein akzeptierten, grundlegenden Prinzipien, wie etwa Symmetrieprinzipien oder - spezieller: - Erhaltungssätzen. Durch Berücksichtigung dieser Prinzipien wird die Zahl der "möglichen" Theorien beträchtlich eingengt. Offenbar fehlen derartige Prinzipien in der Psychologie, so daß in dieser Wissenschaft bei der Theorienkonstruktion wesentlich mehr Spielraum besteht.

### 3 Fallbeispiel: Vom Hadronen-Zoo zur Quantenchromodynamik

Die Bedeutung von Entwicklungsmodellen läßt sich durch eine Rekonstruktion der Entwicklung der QCD sehr gut belegen. Die QCD ist die grundlegende Theorie der starken Wechselwirkung (vgl. Kasten), in der Quarks durch den Austausch von Gluonen miteinander wechselwirken.

Die Entwicklung dieser Theorie kann in die folgenden fünf Stufen unterteilt werden:

#### 1. SAMMELN VON DATEN: DER HADRONEN-ZOO

Die erste Phase der Konstruktion einer neuen Theorie beginnt gewöhnlich mit der Sichtung des Datenmaterials, welches durch die gesuchte Theorie beschrieben werden soll. Manchmal sind die Daten seit langer Zeit bekannt und möglicherweise bereits in einer spezielleren Theorie zusammengefaßt. Es gibt aber auch die Situation, daß neue Daten sozusagen aus heiterem Himmel plötzlich gefunden werden, ohne daß eine Theorie diese erforderte. Dies war zum Beispiel bei der Entdeckung der 3 K-Hintergrundstrahlung<sup>15</sup> durch *A. Penzias* und *R. Wilson* im Jahr 1963 [8] und bei der Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung der Fall.

Auch das Gebiet der Physik der starken Wechselwirkung begann mit der Gewinnung von Daten. In der ersten Phase der Physik der starken Wechselwirkung (beginnend in den 30er Jahren dieses Jahrhunderts) sammelten Experimentalphysiker eine große Anzahl von Daten über neue und bis dato nicht in einem theoretischen System klassifizierbare Teilchen. Diese Teilchen wurden anfänglich in (nach heutigen

---

<sup>15</sup>*G. Gamow* u.a. hatten zwar schon früh vermutet, daß es die Hintergrundstrahlung geben *mußte*, wenn es den Urknall gab, *A. Penzias* und *R. Wilson* wußten von diesen Spekulationen aber nichts.

Maßstäben) niederenergetischen Kernreaktionen produziert; eine solche Reaktion findet etwa statt, wenn ein durch ein elektrisches Feld beschleunigter Atomstrahl auf eine Metallfolie gelenkt wird. Bei hinreichend hohen Schwerpunktsenergien wechselwirken die Kerne des Atomstrahles mit denen der Folie. Ist die Energie groß genug, so werden neue Teilchen produziert, deren Masse und Ladung systematisch bestimmt werden kann. Sind die produzierten Teilchen selbst instabil, so kann man versuchen, deren Zerfallsprodukte zu bestimmen und so Eigenschaften des zerfallenen Teilchens selbst zu extrahieren.

An diesem Beispiel kann man deutlich sehen, daß die Bestimmung dieser Eigenschaften die zu findende neue Theorie nicht bereits voraussetzt. Die Bestimmung von Masse und Ladung der Teilchen setzt nur ältere, hochbestätigte Theorien (für diese Anwendungsfälle) voraus, nämlich die Newtonsche Mechanik und die Maxwellsche Theorie des Elektromagnetismus.

## 2. EINFÜHRUNG VON INTERNEN KONZEPTEN: SPIN, ISOSPIN UND SELTSAMKEIT

Natürlich ist vom Standpunkt des Theoretikers aus gesehen sehr wenig mit einer Auflistung der positiven Daten gewonnen. Man möchte verstehen, *warum* die Daten so sind wie sie sind, oder besser noch, warum die Daten so sein *müssen*, wie sie sind. Dazu ist es erforderlich, theoretische, die Datenmenge strukturierende Konzepte einzuführen. In diesem Abschnitt werden zunächst interne Konzepte betrachtet, also Konzepte, die sich allein auf die Daten selbst beziehen und sich nicht auf übergeordnete Prinzipien stützen. Wie aber gehen Wissenschaftler dabei genau vor? Die folgenden aus einer Analyse des Forschungsprozesses gewonnenen methodologischen Regeln können dabei hilfreich sein:

- (a) Analysiere die gewonnenen Daten im Hinblick auf Ähnlichkeiten. Lassen sich bestimmte Daten zu “Blöcken” zusammenfassen?
- (b) Übernehme alte Konzepte, die in einer ähnlichen Situation hilfreich waren.
- (c) Konstruiere neue Konzepte in Analogie zu bereits bekannten.

Gemeinsam ist all diesen Regeln das Postulieren einer Analogierelation zwischen Daten eines neuen Datenfeldes bzw. zwischen verstandenen und “noch” unverstandenen Strukturen.

Dies soll nun wieder am Beispiel der Physik der starken Wechselwirkung verdeutlicht werden. Der Weg zu einem tieferen Verständnis der Elementarteilchendaten beginnt mit einer genauen Auswertung der jeweiligen Zerfallskanäle. Bestimmte Zerfälle treten sehr häufig auf, andere scheinen “verboten” zu sein. Hat man genug derartiger

Informationen gesammelt, so konnte man als erstes damit beginnen, jedem Teilchen eine Spin-Quantenzahl zuzuordnen.

Der Spin ist eine dreimpulsartige Größe, deren Einführung ursprünglich (für Elektronen) durch das Stern-Gerlach-Experiment motiviert wurde: Im inhomogenen Magnetfeld spaltet sich ein Atomstrahl mit ungerader Elektronenzahl in zwei Teilstrahlen auf. Ebenso kann man mit anderen *stabilen* Systemen wie Protonen und Kernen verfahren. Für instabile Teilchen ist dieses Verfahren jedoch nicht anwendbar. Leider sind nun aber die meisten bekannten Teilchen instabil, und so ist man auf zusätzliche theoretische Argumente angewiesen. Zu nennen sind hier:

- (a) **Der Erhaltungssatz für den Gesamtdrehimpuls** (= Bahndrehimpuls + Spin): Ausgehend von Teilchen, deren Spin bereits bekannt ist, kann so aus geeignet gewählten Reaktionen der Spin eines anderen Teilchens bestimmt werden.
- (b) **Das Prinzip des detaillierten Gleichgewichtes**: Es zeigt sich, daß das Übergangsmatrixelement für die Reaktion  $A + B \rightarrow C + D$  gleich dem für die Reaktion  $C + D \rightarrow A + B$  ist. Somit ist nun das Verhältnis der Wirkungsquerschnitte beider Reaktionen allein eine Funktion der beteiligten Drehimpulse, so daß wiederum ein unbekannter Spin aus bereits bekannten ermittelt werden kann.
- (c) **Das Spin-Statistik-Theorem**: Diesem berühmten, 1954 von *W. Pauli* und *G. Lüders* gefundenen Prinzip zufolge haben Teilchen immer ganzzahligen (Bosonen) oder halbzahligen (Fermionen) Spin. Durch dieses Prinzip wird theoretisch etabliert, daß auch instabile Teilchen einen Spin haben “müssen”.

Handelt es sich beim Spin-Konzept noch um ein Konzept, welches von der Atomphysik auf die Teilchenphysik übertragen wurde, so sind Isospin und Seltsamkeit erstmals im Kontext der Teilchenphysik zu finden. Um nämlich zu einem vollständigen Verständnis der auftretenden Prozesse zu gelangen, ist es notwendig, neben dem Spin weitere Quantenzahlen einzuführen. So postulierte *W. Heisenberg* 1932 die Erhaltung des von ihm selbst so genannten Isospin in bezug auf die starke Wechselwirkung. Schon die Bezeichnung “Isospin” zeigt deutlich die heuristisch wertvolle *strukturelle Analogie* und konzeptionelle Isomorphie zum Spin. *Heisenberg* bemerkte, daß sich Protonen und Neutronen in bezug auf die starke Wechselwirkung sehr ähnelten. Zwar haben beide eine unterschiedliche elektrische Ladung; die starke Wechselwirkung unterscheidet jedoch nicht zwischen (ansonsten gleichen) Teilchen

unterschiedlicher elektrischer Ladung; sie ist also - metaphorisch gesprochen - "ladungsblind".

Nachdem es in der Nachkriegszeit möglich wurde, Teilchen immer höherer Energie zu erzeugen, schlugen *M. Gell-Mann* u.a. 1953 unter dem Eindruck nicht in das bisherige Schema passender experimenteller Ergebnisse die sogenannte Seltsamkeit (englisch: *Strangeness*) als eine weitere Erhaltungsgröße der starken Wechselwirkung vor.

So kam nach und nach Ordnung in den rasch größer werdenden Hadronenzoo. Außerdem entwickelte sich langsam eine Intuition für mögliche und unmögliche Prozesse unter den Physikern.

Dieses Beispiel zeigt sehr deutlich, wie Wissenschaft von bereits Bekanntem ausgehend versucht, Unbekanntes zugänglich zu machen. Neuen Konzepte wie Isospin und Seltsamkeit ergeben sich nicht selten aus Analogieüberlegungen.

### 3. VEREINHEITLICHUNG INTERNER KONZEPTE: DER ACHTFACHE-WEG

Ein wesentliches Element bei der Verbesserung der Modellierung gegebener Daten ist die "Anreicherung" mit allgemeinen Prinzipien und die Integration vorläufiger Konzepte in bereits bekannte, fundamentale Strukturen. Auf diese Weise wird versucht, die angestrebte vereinheitlichte Beschreibung zu erreichen.

Im Falle der Hadronenphysik hat es sich zunächst als notwendig erwiesen, die nun zwar vorläufig geordnete, aber immer noch unüberschaubare Menge an Elementarteilchen-Daten in ein fundamentaleres Schema einzuordnen. Diese sogenannte  $SU(3)_F$ -Klassifikation<sup>16</sup>, auch der Achtfache-Weg genannt, stellt einen wesentlichen Schritt hin zu einem dynamischen Verständnis der starken Wechselwirkung dar. Die neue Klassifikation motiviert auch ernsthafte Zweifel an der Fundamentalität der Hadronen.

1962 schlugen *M. Gell-Mann* und *G. Zweig* unabhängig voneinander eine neue Symmetrie der Hadronen vor, die  $SU(3)_F$ -Symmetrie. Es stellte sich heraus, daß man Gruppen von Hadronen aufgrund sehr ähnlicher Eigenschaften (z.B. Masse) in Gruppen zusammenfassen konnte. Das Ergebnis waren Oktetts, Dekupletts und andere Strukturen. Führt man die gruppentheoretische Analyse etwas weiter, so zeigt sich, daß die bekannten Strukturen durch "Zusammensetzen" von elementarerer Strukturen, den sogenannten Fundamentaldarstellungen der Gruppe  $SU(3)_F$  verstanden werden können. Die Elemente der Fundamentaldarstellung werden als "Quarks" und das so erhaltene Modell als das "Quarkmodell" bezeichnet.

---

<sup>16</sup>Das  $F$  steht für das englische *flavor* - Geschmack.

Das Beispiel zeigt also, wie sich aus der Vereinheitlichung alter Konzepte neue grundlegende Perspektiven ergeben. Außerdem resultiert eine einfachere, überschaubarere Beschreibung der Daten, als dies vormals möglich war.

#### 4. (AD HOC) KORREKTUR (EXTERNER) INKONSISTENZEN: DAS FARB-KONZEPT

Ein Vorläufer-Modell einer physikalischen Theorie kann Inkonsistenzen enthalten. Diese Aussage muß genauer erläutert werden. Dazu soll zunächst zwischen *internen*, *externen* und *scheinbaren Inkonsistenzen* unterschieden werden.

Eine Menge  $M$  von Sätzen ist **intern inkonsistent**<sup>17</sup>, wenn aus  $M$  sowohl die Aussage  $A$ , als auch die Aussage  $\bar{A}$  (nicht- $A$ ) abgeleitet werden kann. Faßt man eine physikalische Theorie  $T$  als eine Menge  $M_T$  von Sätzen auf (*statement-view*), so ist klar, daß jede vernünftige physikalische Theorie der Forderung nach interner Konsistenz genügen muß [5].

Eine physikalische Theorie  $T$ , wieder als eine Menge  $M_T$  von Sätzen verstanden, ist **extern inkonsistent**, wenn sich unter Berücksichtigung von nicht zu  $M_T$  gehörenden und auch nicht aus  $M_T$  ableitbaren, allgemeinen physikalischen Prinzipien ein Widerspruch ableiten läßt. Im frühen Stadium einer neuen physikalischen Theorie ist es durchaus nicht beunruhigend, wenn eine derartige Inkonsistenz auftritt. Möglicherweise kann auf diese Weise sogar eine Einschränkung des Gültigkeitsbereiches des externen, vermeindlich “allgemeinen” Prinzips nahegelegt werden.

Ich nenne eine physikalische Theorie  $T$  **scheinbar inkonsistent**, wenn sie Aussagen enthält, die zwar weder intern noch extern inkonsistent sind, die den beteiligten Physikern aber dennoch verdächtig erscheinen. Sie sind scheinbar inkonsistent, weil sich vielleicht erst nach vielen Jahren grundlegend neue physikalische Einsichten ergeben, die die scheinbare Inkonsistenz schlußendlich plausibel machen. Eine Beispiel für eine derartige Inkonsistenz ist das Renormierungsproblem in der Quantenfeldtheorie. Bei störungstheoretischen Berechnungen werden bestimmte Integrale “unphysikalisch” unendlich. Das hat viele Physiker lange Jahre beunruhigt. In diesem Zusammenhang fiel auch immer wieder der Term “inkonsistent”. Ohne auf diese schwierige Problematik im Detail eingehen zu können [7], sei doch gesagt, daß sich in den letzten Jahren eine gänzlich neue Sicht des Renormierungsverfahrens herauskristallisiert hat, die zu einer Neubewertung des Renormierungsproblems Anlaß gegeben hat.

Das Quarkmodell weist auch eine Inkonsistenz auf, genauer gesagt eine externe Inkonsistenz. Nimmt man nämlich die *realistische* Interpretation der Quarks

---

<sup>17</sup>Manchmal spricht man auch von Konsistenz im formallogischen Sinne.

als “Bausteine” der Hadronen mit Spin-1/2 ernst, so ergibt sich ein Widerspruch mit einem wichtigen und allgemein akzeptierten Grundprinzip der Physik, dem Pauli-Prinzip. Dieses wichtige Prinzip besagt, daß zwei Fermionen niemals in allen Quantenzahlen übereinstimmen können. Genau dies tritt aber beim Baryonendekuplett (vgl. Abbildung ??) im Rahmen des Quarkmodells auf: Im  $\Delta^{++}$  (Spin  $S = 3/2$ , Isospin  $T = 3/2$ ) etwa stimmen alle Quarks sowohl hinsichtlich ihrer Flavorquantenzahl ( $u$ , d.h. Isospin  $T = T_3 = 3/2$ ), als auch bezüglich ihres Spins ( $S = S_3 = 3/2$ ) überein. Weiterhin ist es plausibel, daß sie sich in einem räumlichen Zustand niedrigster Energie, also einem  $s$ -Zustand befinden. Die drei Quarks stimmen somit in allen Quantenzahlen überein - das Pauli-Prinzip wäre also verletzt!

Aus dieser Situation bietet sich ein einfacher Ausweg, wenn man eine neue Quantenzahl, genannt *Farbe*, ad hoc einführt, die für die Einhaltung des Pauli-Prinzips sorgt. Jedem Quark wird eine der drei Farben *rot*, *grün* oder *blau* zugeordnet. So ist der Farb-Anteil in der Baryonenwellenfunktion immer antisymmetrisch, und da im  $\Delta^{++}$  die “Restwellenfunktion” (Ort, Spin und Flavor), wie wir gesehen haben, total symmetrisch ist und weiterhin das Produkt aus einer symmetrischen und einer antisymmetrischen Wellenfunktion antisymmetrisch ist, gibt es nun kein Problem mehr.

Man fordert zudem, daß physikalisch beobachtbare Objekte stets farbneutral sind, d.h. im Baryon tritt jede der drei Farben einmal auf, bei Mesonen findet die Struktur Farbe-Antifarbe Verwendung.

In der Folge zeigte sich, daß es gerade diese Einführung eines neuen Freiheitsgrades war, der die Integration des Quarkmodells in einen umfassenderen theoretischen Rahmen ermöglichte, der schließlich zu einem dynamischen Verständnis hadronischer Freiheitsgrade führte.

## 5. INTEGRATION IN EINEN UMFASSENDEN THEORIERAHMEN: DAS EICHTHEORIEN-KONZEPT

Je nach Komplexität der zu beschreibenden Daten mag es mehrere Stufen dieser Verfeinerungen und konzeptuellen Zusammenfassungen geben. Letztendlich sollten sich jedoch die Ergebnisse all dieser Bestrebungen in einen allgemeinen Theorienrahmen einbetten lassen.

Im Falle der Elementarteilchenphysik ist die Quantenfeldtheorie ein solcher Theorienrahmen. Die Quantenfeldtheorie stellt einen allgemeinen Formalismus dar, der die Wechselwirkung “elementarer” Quantenfelder zu beschreiben vermag. Historisch gesehen hat sich dieser allgemeine Rahmen der Elementarteilchenphysik, der stark an

das erinnert, was der Wissenschaftstheoretiker *I. Lakatos* den “harten Kern” eines Forschungsprogrammes nennt, aus der Quantenelektrodynamik (QED) entwickelt. Die QED stellt nicht zuletzt aufgrund ihres großen empirischen Erfolges ab den 50er Jahren dieses Jahrhunderts *das* Paradigma einer Quantenfeldtheorie dar. Berechnungen physikalischer Observablen wie des anomalen magnetischen Momentes des Elektron stimmen z.Z. bis auf *zwölf* Dezimalen mit dem Experiment überein. Die Entwicklung der QED begann, als *P. Dirac* 1928 erstmals eine Quantentheorie des Elektromagnetismus formulierte. *Dirac* setzte zunächst das durch eine Maxwell-Gleichung beschriebene Vektorpotential in Form einer Fourierreihe an, deren Koeffizienten für die Anteile zu positiver bzw. negativer Energie durch Linearkombinationen neuer Größen ausgedrückt werden konnten, so daß die resultierenden Gleichungen schließlich denen des harmonischen Oszillators struktural analog waren. Diesen zu quantisieren hatte man schon in der “gewöhnlichen” nichtrelativistischen Quantenmechanik gelernt<sup>18</sup>. So konnten die alten Quantisierungsregeln per Analogieübertragung im neuen Gebiet der Quantentheorie des Elektromagnetismus verwendet werden.

Im Anschluß an die Arbeiten zur QED lernte man schnell, andere Felder zu quantisieren und so entwickelte sich mit der Zeit ein allgemeiner Formalismus. Wichtig für die weitere Entwicklung war v.a. eine spezielle Klasse von Quantenfeldtheorien, zu der auch die QED gehört, nämlich die der (renormierbaren) lokalen Eichfeldtheorien.

So konnte zunächst eine Eichtheorie der elektroschwachen Wechselwirkung konstruiert werden und anschließend auch die starke Wechselwirkung in diesen Rahmen einbezogen werden.

Wie gelang die Einbeziehung der starken Wechselwirkung? Es zeigte sich, daß gerade das neu eingeführte Farbkonzept geeignet war, das gesuchte Eichkraftfeld dingfest zu machen. Frühere Versuche in dieser Richtung, etwa die Isospin Symmetrie zu “eichen” (*C.N. Yang* und *R. Mills*, 1954) scheiterten alle<sup>19</sup>.

Nachdem *G. t’Hooft* 1971 nachwies, daß nichtabelsche Eichtheorien renormierbar sind und gezeigt werden konnte, daß eine  $SU(3)$ -Eichtheorie asymptotisch frei ist, war klar, daß die starke Wechselwirkung durch eine nichtabelsche Farb- $SU(3)$ -Eichtheorie zu beschreiben ist: Die QCD war geboren.

---

<sup>18</sup>Vgl. dazu [9].

<sup>19</sup>Das Projekt von *Yang* und *Mills* scheiterte insbesondere an der Tatsache, daß die in einer Eichtheorie (zunächst) notwendigerweise masselosen Eichbosonen im Widerspruch zur Kurzreichweitigkeit der Kernkräfte stand. Man darf spekulieren, wie sich die Geschichte der starken Wechselwirkung weiter entwickelt hätte, wenn man schon zu dieser Zeit vom Higgs-Mechanismus gewußt hätte.

Damit ist der Endpunkt der von uns zu schildernden Entwicklung erreicht. Es sollte jedoch noch erwähnt werden, daß es zahlreiche Bestrebungen gibt, die QCD selbst in noch allgemeinere Rahmen zu integrieren. Diese Vorhaben laufen unter dem Schlagwort “Große Vereinheitlichung der Kräfte”. So steigt die Theorienkonstruktion im “Turm” der Entwicklungsmodelle immer weiter auf. Mit dem Hinzunehmen immer allgemeinerer Prinzipien wird gleichzeitig der Anwendungsbereich der Theorie immer größer. Aus praktischen Gründen mag man trotzdem auf eine frühere Version der Theorie zurückgreifen, und das Modell nun als Ersatz für die vorhandene Theorie verwenden.

Dieses ausführliche Fallbeispiel sollte verdeutlichen, wie die Entwicklung einer physikalischen Theorie ausgehend von nur vorläufig systematisiertem Datenmaterial vor sich gehen kann. Natürlich *kann* alles auch ganz anders verlaufen, es gibt keinen “Königsweg” von den Daten zur Theorie<sup>20</sup>.

Weiterhin sollte klar geworden sein, wie neue Konzepte mit Hilfe von Analogieüberlegungen aus bereits bekannten formuliert werden können. Dies wurde am Beispiel Spin-Isospin demonstriert. Ebenfalls unter Verwendung von einer Analogie können neue Konzepte eingeführt werden, wie am Beispiel des Achtfachen-Weges verdeutlicht wurde.

Der vorläufige Charakter der verschiedenen Modelle wurde deutlich am Auftreten von (externen) Widersprüchen, die zu ignorieren zuweilen sinnvoll sein kann.

## 4 Didaktische Konsequenzen

Zum Abschluß sollen noch einige didaktische Überlegungen zu obigen Ausführungen angestellt werden.

Viele Schulbücher der Physik vermitteln - möglicherweise unbeabsichtigt - den Eindruck, daß es sich bei den Erkenntnissen der Physiker im Grunde um einen abgeschlossenen Block von Wissen handelt. Physiker, so wird suggeriert, lösen bei ihrer Arbeit - genau wie die Schüler bei den Hausaufgaben - vorgegebene Probleme mit bekannten Methoden. Ab und an betritt ein genialer Physiker die Bühne und fügt, am Ende eines von tiefer Einsicht gekennzeichneten Akt des “Sehens”, dem Kanon physikalischer Theorien eine wichtige neue hinzu.

Ein derartiges Bild kann falscher nicht sein; Physik ist, wie alle anderen Naturwissenschaften, eine in ständiger Entwicklung begriffene menschliche Form rationaler Auseinandersetzung mit bestimmten Aspekten der Natur.

Dies kann den Schülern auf zweierlei Weise deutlich gemacht werden. Zum einen können

---

<sup>20</sup>In der analytischen Philosophie wird dies unter dem Schlagwort “Unterbestimmtheit der Theorie durch die Daten” diskutiert. Es war der amerikanische Philosoph *W. V. O. Quine*, der in seinen Schriften immer wieder auf diesen Sachverhalt hingewiesen hat.

**historische Exkurse** im Unterricht motivieren, wie Wissenschaftler zur Entwicklung bestimmter Theorien kamen und warum spezielle Begriffe eingeführt wurden. Gewöhnlich schlagen Forscher gerade nicht den direkten “Lehrbuch-Weg” ein, um ihr Ziel, eine neue Theorie o.ä. zu erreichen; sie folgen vielmehr einem verschlungenen Pfad und landen manchmal zwischenzeitlich gar in einer Sackgasse.

Zum anderen ist es gleichermaßen wichtig, den Schülern zumindest qualitativ **Resultate und Strategien der zeitgenössischen Physik** vorzuführen. *Inhaltlich* hat ein solcher Unterricht zur Folge, daß die Schüler schon früh an die weltbildkonstituierenden Erkenntnisse moderner Naturforschung herangeführt werden. Es darf nicht sein, daß junge Menschen bis zum Beginn des Studiums warten müssen, bevor sie etwas über bloße Schlagworte hinausgehendes über die Chaostheorie oder über Erkenntnisse der Kosmologie vermittelt bekommen.

*Methodisch* können die Schüler so lernen, *wie* in der zur Zeit aktuellen Wissenschaft gearbeitet wird, wie eine neue Theorie (zumindest innerhalb eines Forschungsprogrammes im Sinne von *I. Lakatos* bzw. innerhalb eines Paradigmas im Sinne von *T.S. Kuhn*) konstruiert wird. Eine solche Betrachtung scheint von Nöten, finden doch beim Eindringen in neue Erfahrungsbereiche oft auch neue Methoden Verwendung.

Eine dieser für den Forschungsprozess typischen Methoden, ist die Konstruktion von Modellen. Modelle dienen als Ersatz einer physikalischen Theorie, als Vorstufe einer Theorie oder als “Spielzeug”-Modell. Damit stellen Modelle *das* Hilfsmittel einer *vorläufigen* Physik dar.

Schüler sollten schon früh lernen, durch “Denken in Modellen” eine Anschauung für eine gegebene physikalische Situation zu erlangen.

## Literatur

- [1] P. Achinstein. *Concepts of Science*. The John Hopkins Press, Baltimore, 1968.
- [2] T.W. Adorno. *Ästhetische Theorie. Gesammelte Werke Band 7*. Suhrkamp, Frankfurt, 1970.
- [3] L. Apostel. Formal Study of Models. In H. Freudenthal (ed.), *The Concept and the Rôle of the Model in Mathematics and Natural and Social Sciences*, 163–177, Dordrecht, 1961.
- [4] J. Audretsch. Vorläufige Physik und andere pragmatische Elemente physikalischer Naturerkenntnis. In H. Stachowiak (Hg.), *Pragmatik, Band III*, 373–392, Hamburg, 1989.

- [5] M. Bunge. *Scientific Research I*. Springer-Verlag, Berlin, 1967.
- [6] M. Bunge. *Method, Model, and Matter*. D. Reidel, Dordrecht, 1973.
- [7] T. Cao and S. Schweber. The Conceptual Foundations and the Philosophical Aspects of Renormalization Theory. *Synthese*, 97:33–108, 1993.
- [8] B. Kanitscheider. *Kosmologie*. Reclam, Stuttgart, 1984.
- [9] W. Kuhn. Methodisches Konzept zur Elementarisierung der Quantenelektrodynamik. *Praxis der Naturwissenschaft - Physik*, 34:Heft 7, 1985.
- [10] A. Pickering. *Constructing Quarks*. Edinburgh UP, Edinburgh, 1984.
- [11] K. Popper. *Logik der Forschung, Neunte, weiter verbesserte und vermehrte Auflage*. Mohr, Tübingen, 1984.
- [12] H. Primas. Zum Theorienpluralismus in den Naturwissenschaften - Kommentar zum Beitrag von Erhard Scheibe. In P. Hoyningen-Huene, G. Hirsch (Hg.), *Wozu Wissenschaftsphilosophie?*, 172–178, Berlin, 1988.
- [13] M. Redhead. Models in Physics. *British Journal for the Philosophy of Science*, 31:145–163, 1980.
- [14] H. Reichenbach. *Gesammelte Werke, Band 4: Erfahrung und Prognose, hrsg. von A. Kamlah und M. Reichenbach*. Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1983.
- [15] P. Suppes. Models of Data. In E. Nagel, P. Suppes, A. Tarski (eds.), *Logic, Methodology and Philosophy of Science, Proceedings of the 1960 International Congress*, 252–261, Stanford, 1962.
- [16] S. Toulmin. *Einführung in die Philosophie der Wissenschaft*. Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen, 1953.
- [17] G. Vollmer. *Wissenschaftstheorie im Einsatz - Beiträge zu einer selbstkritischen Wissenschaftstheorie*. S. Hirzel, Stuttgart, 1993.

# Anhang: Die Quantenchromodynamik

Die Quantenchromodynamik (kurz: QCD) wird allgemein als *die* fundamentale Theorie der starken Wechselwirkung angesehen. Genau wie die Quantenelektrodynamik (QED) ist die QCD eine renormierbare Eichtheorie. Damit ist sichergestellt, daß die Berechnungen in allen Ordnungen der Störungstheorie endliche Resultate liefern. Die elementaren Freiheitsgrade der QCD sind Quarks und Gluonen. Quarks sind Fermionen (Spin-1/2) und treten in insgesamt sechs verschiedenen Arten (*flavours*) auf: *up*, *down*, *strange*, *charm*, *bottom* und das kürzlich entdeckte *top*. Neben Spin und Flavor haben Quarks einen weiteren Freiheitsgrad, den man als *Farbe* bezeichnet. So gibt es *rote*, *grüne* und *blaue* Quarks. Gluonen kommen in acht Variationen vor und sind die bosonischen (Spin-1) Austauscheteilchen der starken Wechselwirkung. Im Gegensatz zu den Austauscheteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung, den Photonen, besitzen sie selbst eine Farbstruktur - das Analogon zur Ladung in der Quantenelektrodynamik (QED) - und wechselwirken deshalb mit sich selbst. Dieses die Rechnungen erheblich komplizierende Phänomen ist eine unmittelbare Folge des nicht-abelschen Charakters der Theorie, der sich in der Nichtvertauschbarkeit der (matrizenwertigen) Generatoren der zugehörigen Eichgruppe  $SU(3)$  manifestiert. Es ist historisch interessant festzustellen, daß die QCD - ebenso wie die Weinberg-Salam-Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung - in enger Analogie zur bewährten QED entwickelt wurde. Die QCD wird durch folgende Lagrangendichte charakterisiert:

$$\mathcal{L}_{QCD} = \bar{\psi}(i\gamma_{\mu}D^{\mu} - \hat{m}_0)\psi - \frac{1}{4}F_{k\mu\nu}F_k^{\mu\nu}$$

$\psi$  repräsentiert dabei das Quarkfeld und  $F_k^{\mu\nu}$  beschreibt die Dynamik der Gluonen. Der Operator  $D^{\mu}$  legt die eichinvariante Kopplung der Quarks an die Gluonen fest und  $\hat{m}_0$  ist die (durch das Experiment zu bestimmende) Massenmatrix der Quarks.

Die Quantenchromodynamik hat *drei* wichtige Eigenschaften, die nun vorgestellt werden sollen: Die **asymptotische Freiheit** der Theorie ist der Grund dafür, daß sich die Quarks bei hohen Energien, wie sie etwa in Experimenten an den großen Beschleunigern auftreten und faktisch im frühen Universum auftraten, quasi-frei bewegen. Technisch gesprochen nähert sich die die Wechselwirkung zwischen den Quarks charakterisierende effektive "laufende" Kopplungskonstante  $\alpha_s$  mit steigender Energie  $Q$  stetig dem Wert null (vgl. Abb. 1). So können die aus der QED bekannten störungstheoretischen Methoden für hohe Energien erfolgreich zur Berechnung vieler Prozesse angewendet werden.

Im Gegensatz zum leicht handhabbaren Hochenergiebereich der QCD weist der Niederenergiebereich, der bis zu Energien von der Größenordnung der Ruheenergie des Protons (ca. 1000 MeV) reicht, eine wesentlich komplexere Struktur auf. Die effektive Kopplungskonstante nimmt nämlich bei geringer werdenden Energien drastisch zu, so daß störungs-

theoretische Methoden nicht mehr anwendbar sind. Eine charakteristische Eigenschaft der Theorie in diesem Energiebereich ist das **Quark-Confinement**. Quarks treten demzufolge nicht als (asymptotisch) freie Zustände auf. Physikalisch beobachtbare Zustände sind immer farbneutrale Teilchen (sog. Singulett). So blieben auch alle bisherigen Experimente zur "Jagd nach den Quarks" erfolglos. Die QCD scheint zu erklären, warum dies so sein muß. Versucht man zu einem Farb-Singulett gekoppelte Quarks zu trennen, so wächst die rücktreibende Kraft proportional zum Abstand der Quarks ähnlich wie bei zwei Teilchen, die durch ein Gummiband verbundenen sind. Übersteigt die aufgewandte Energie jedoch einen kritischen Wert (Mesonenproduktionsschwelle), so versagt diese Analogie; Das "Band" zwischen den Quarks fragmentiert nun und neue Teilchen (zumeist Pionen) werden gebildet.

Die dritte wichtige Eigenschaft der QCD - ihre (approximative) **chirale Symmetrie und die dynamische Brechung dieser Symmetrie** - ist ebenfalls ein Niederenergiephänomen. Chiralität ist eine wohlbekannte Eigenschaft physikalischer, chemischer und biologischer Systeme. So kommen z.B. bestimmte Zucker nur in einer rechtsdrehenden Form vor. Käme die linksdrehende Version ebenso häufig vor wie sein chiraler Partner, die rechtsdrehende Version, so handelte es sich um ein chiral symmetrisches System. Die Wechselwirkung unterscheidet dann nicht zwischen beiden Formen.

Auch in der Quantenfeldtheorie gibt es links- und rechtshändige Zustände. Man kann zeigen, daß eine Quantenfeldtheorie chiral invariant ist, wenn alle Massenterme in der Lagrangedichte verschwinden. Diese Symmetrie ist im Niederenergiebereich nahezu erfüllt, da die Massen der dort relevanten Quarks (ca. 10 MeV) sehr klein sind auf der typischen Skala der Protonenmasse (ca. 1000 MeV). Es sollte also zu jedem Eigenzustand der Wechselwirkung einen chiralen Partner mit gleicher Masse und umgekehrter Chiralität geben. Das ist in der Natur aber nicht der Fall. Aus diesem Dilemma bietet sich ein Ausweg, wenn man annimmt, daß die chirale Symmetrie durch die Wechselwirkung selbst *dynamisch* gebrochen ist. Die Eigenzustände der Wechselwirkung haben dann nicht mehr die Symmetrie der Wechselwirkung, denn diese ist ja nach wie vor chiral invariant. Als Ergebnis dieser Symmetriebrechung werden effektive (Quark-) Massenterme generiert. Diese können leicht mit den in nichtrelativistischen Quarkmodellen verwendeten "Konstituentenmassen" der Quarks (ca. 300 MeV für die leichten Quarks) identifiziert werden.

Da störungstheoretische Methoden im Niederenergiebereich nicht brauchbar sind, finden im allgemeinen zwei wesentlich verschiedene Methoden Verwendung: Bei der gittertheoretischen Formulierung der QCD werden die relevanten Gleichungen zunächst auf einem raum-zeitlichen Gitter formuliert und anschließend numerisch (sehr aufwendig!) gelöst. So konnten Indizien dafür gefunden werden, daß Confinement und dynami-

sche Brechung der chiralen Symmetrie tatsächlich Eigenschaften der QCD sind. Effektive Quantenfeldtheorien hingegen modellieren die für eine spezielle Situation relevanten Freiheitsgrade (skalare Kondensate, Konstituentenquarks oder auch Protonen, Neutronen und Pionen) derart, daß die weitgehend durch Symmetrien festgelegte Wechselwirkung zwischen den beteiligten Feldern i.a. überschaubar ist und die resultierenden Gleichungen einfach lösbar sind.