

# Die Elementaren Teilchen in der Modernen Physik

Von Atomen, Kernen, Quanten, Quarks

Notizen und Stichworte

zu einer Vorlesung für Physikstudierende mittlerer Semester

Jörn Bleck-Neuhaus

Entwurf 10. Juni 2009 21:27

## Vorwort

(frei zur Nutzung zum Selbststudium,  
um kurze Rückmeldung an [bleck@physik.uni-bremen.de](mailto:bleck@physik.uni-bremen.de) wird gebeten)

## 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 vorausgesetzt<sup>1</sup>), 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 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 Schule gegangen sind, und womöglich deshalb genötigt wurden, eine erkennbar eigene Art des Denkens zu entwickeln<sup>2</sup>.

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 leben Physiker

<sup>1</sup>Ebenfalls vorausgesetzt: Grundkenntnisse in den Werkzeugen der Quantenmechanik wie Schrödinger-Gleichung, Operatoren, Eigenwerte, Matrizen, Hilbert-Raum.

<sup>2</sup>die in der Schule auch schwierig zu unterrichten sei.

wohl mit einem besonders tiefen Gegensatz zwischen der Konkretheit der mit den Sinnen aufgenommenen Phänomene und der Abstraktheit 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 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 ungefähr dem historischen Ablauf und der begrifflichen Entwicklung der physikalischen Vorstellungen, 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 und sind daher unvermeidlich. Jedem Kapitel ist ein Überblick vorangestellt, der es 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 einzelner Kapitel zu erleichtern, ohne alles voranstehende 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 von Einzelheiten als auch von Zusammenhängen. Die dafür nötige, möglichst sorgfältige und lückenlose Argumentation erfordert dann oft mehr Raum als der knappste mögliche Text, 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.<sup>3</sup> 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.

---

<sup>3</sup>Daraus ergaben sich auch zahlreiche für ein Lehrbuch eher unkonventionelle Stichworte für das alphabetische Register am Schluss des Buchs.

# Index

- Alltagsverstand
  - Basis von Verstehen, 2
- Antiteilchen, 2
- Aristotelische Mechanik, 2
- Einstein, Albert
  - Relativitätstheorie, 2
- Erzeugung/Vernichtung
  - von Materie, 2
- Fortschritt der Wissenschaft
  - schwer erarbeitet, 2
- Galilei
  - Trägheitsprinzip, 2
- Infinitesimal-Rechnung
  - Newton, 2
- Klassische Physik
  - Vorverständnis ist Voraussetzung f. Moderne Physik, 2
  - vertraute Anschauungen, 2
- kopernikanischen Wendepunkte, 2
- Maxwell, James C.
  - Elektrodynamik, 2
- Moderne Physik (ab ~1900)
  - schwer anzunehmen, 2
- Newtonsche Mechanik, 2
- Physik lernen
  - mit/gegen den Alltagsverstand, 3
- Prinzipien
  - einheitliche in der Physik, 2
- Relativitätstheorie, 2
- Scheibenform der Erde, 2
- Spiegelsymmetrie, *siehe auch Parität*
  - gebrochen, 2
- Spin  $\frac{1}{2}$ , 2
- Unbewusstes
  - in der Psychologie, 2
- Ununterscheidbarkeit von Teilchen (*siehe auch identische Teilchen*), 2
- verschränkter Zustand, 2
- virtuelle Teilchen, 2
- widersprüchliche Aspekte
  - klass. vs. moderne Physik, 2
- Wissensstand
  - Entstehungsgeschichte, 2