

11 Quantentheorie

Die Quantenmechanik in ihrer heutigen Fassung beschreibt nicht nur Atome, sondern einfach alle Phänomene im Mikrokosmos der Elementarteilchen. Obwohl sie hier äußerst erfolgreich ist, ist sie dennoch nicht auf einen bestimmten Größenbereich beschränkt, sondern eine universelle Theorie. Streng genommen gilt sie auch überall in unserer Alltagswelt, obwohl wir nichts davon direkt bemerken. Auch beinhaltet sie nicht nur mechanische Bewegungen, sondern auch die Umwandlung von Teilchen in andere Teilchen. Weiterhin gelang es bald nach ihrer ersten Formulierung, die spezielle Relativitätstheorie in die Quantenmechanik mit einzubetten. Mit ihr wird heute nicht nur die elektromagnetische Kraft beschrieben, sondern auch die Kernkräfte, die wir noch kennenlernen werden. All dies führt dazu, dass die Quantenmechanik zwar einst die klassische Mechanik aus dem atomaren Bereich verdrängte, aber mittlerweile um einiges breiter aufgestellt ist. Ich möchte die Quantenmechanik daher ab jetzt nur noch mit dem neutraleren Begriff Quantentheorie bezeichnen.

In diesem Kapitel möchte ich Sie mit den Grundbegriffen der Quantentheorie vertraut machen. Dazu werde ich mich auf ihre hervorstechendsten Eigenschaften konzentrieren und jeweils den Bezug zu den Atomen herstellen. Tatsächlich ist dieses Kapitel aber nur der Auftakt zu einer größeren Reihe von Kapiteln, die sich alle um das Thema Quantentheorie ranken. Was sie in ihrem tiefsten Kern über die Natur aussagt und wie man sie interpretieren kann, werden wir dann ausführlich im zweiten Teil dieses Buches sehen. Ab jetzt wird sie daher unser ständiger Begleiter sein.

Aber nun zu den wichtigsten Merkmalen der Quantentheorie, die alle im krassen Gegensatz zu den klassischen Theorien stehen. Ich liste sie Ihnen zunächst auf, und dann schauen wir sie uns nacheinander gemeinsam an:

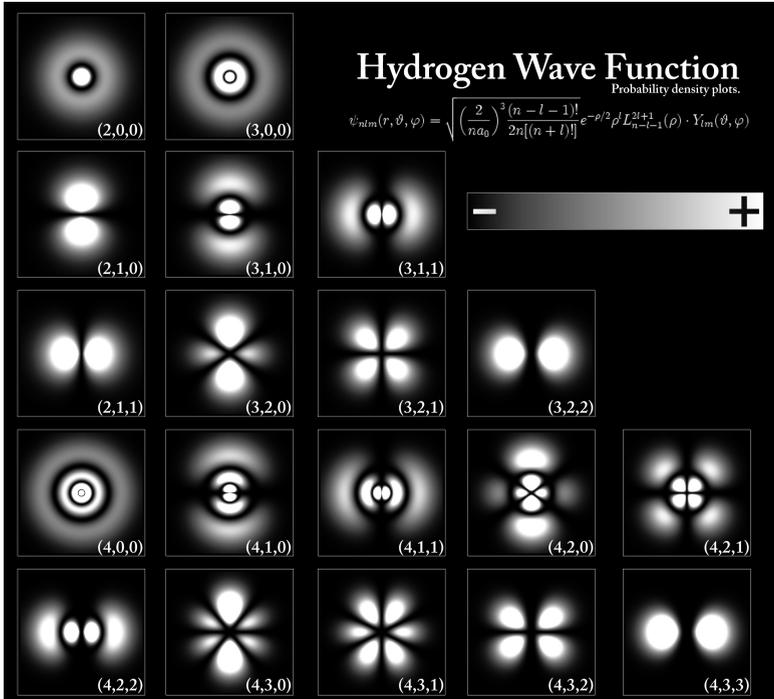
- Die Quantentheorie macht keine sicheren Vorhersagen, sondern gibt nur Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten eines Ereignisses an.
- Sie enthält eine Vorschrift, wie festgelegt oder wie unbestimmt unsere Welt ist.
- Sie handelt von Teilchen, die sich auf keine Weise voneinander unterscheiden lassen, was zu verblüffenden Konsequenzen führt.
- Und schließlich knüpft die Quantentheorie Verbindungen zwischen Teilchen, die überraschenderweise so dicht sind, dass man die Teilchen nicht mehr als getrennte Objekte ansehen kann.

Kehren wir nach dieser Einleitung wieder zu den Atomen zurück. Zur besseren Erklärung des Linienspektrums von Wasserstoff entwickelte Erwin Schrödinger eine neuartige Gleichung. Er ersetzte dazu das Elektron im Atom durch eine Art Welle. Das feste Teilchen, das sich zuvor immer an einem bestimmten Ort befand, war nun über das ganze Atom verteilt. Was diese Welle bedeutete, war aber zunächst noch unklar. Die erste Vermutung, dass es sich um eine stehende Elektronenwelle wie bei der Schwingung einer Gitarrensaite handelt, erwies sich als nicht haltbar. Doch der Erfolg bei der Berechnung von immer mehr Details im Wasserstoffspektrum gab der sogenannten Schrödingergleichung recht. Erst Max Born (1882–1970) lieferte schließlich die entscheidende Interpretation für diese neue Art von Wellenmechanik.

Die Wellenfunktion eines Elektrons in der Schrödingergleichung gibt *nicht* den Ort für ein Elektron an. Sie liefert nur eine *Wahrscheinlichkeit* dafür, dass man das Elektron an einem bestimmten Ort tatsächlich finden wird. Der Ort des Elektrons ist nicht mehr durchgängig festgelegt wie bei einer Planetenbahn, sondern unscharf über das gesamte Atom verschmiert. Nur noch die Wahrscheinlichkeit seines Aufenthaltsorts kommt in der Gleichung vor. Diese Wahrscheinlichkeit ist zwar exakt festgelegt, aber wo sich das Teilchen wirklich befindet, ist nicht klar. Man kann zwar das Elektron des Wasserstoffatoms beispielsweise mit hochenergetischem Licht aufspüren, allerdings muss man dazu auch immer das Atom zerstören, also die Bindung zwischen Proton und Elektron lösen. Für diesen Vorgang jedoch beschreibt die Wellenfunktion des Elektrons genau, mit welcher Chance man es an einem bestimmten Ort entdecken wird.

Elektronen halten sich demnach gemäß ihrer Wellenfunktionen in Atomen in bestimmten Raumbereichen bevorzugt auf. Diese Bereiche nennt man Orbitale. Ihre Form ergibt sich als Lösung der Schrödingergleichung in Abhängigkeit von bestimmten ganzen Zahlen, die man Quantenzahlen nennt. Für jeweils eine Kombination dieser Zahlen erhält man ein Orbital, in dem sich ein Elektron aufhält. Die Form dieser Orbitale kann dabei kugelförmig, schalenartig oder auch keulenförmig sein. Genau genommen aber hat ein Orbital und damit ein Atom gar keinen festen Rand. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit verringert sich lediglich in einiger Entfernung vom Atomkern so stark, dass man ein Elektron nur noch in verschwindend geringen Fällen außerhalb dieses Bereichs antrifft.

Wir können uns heute noch lebhaft vorstellen, was die Einführung von Wahrscheinlichkeiten mitten im Atom für Verwirrung ausgelöst hat. Wieso konnte man nicht mehr sagen, wo sich ein Elektron zu einem beliebigen Zeitpunkt befindet? Wo ist es denn, wenn nicht an einem bestimmten Ort? Aber falls es sich an einem bestimmten Ort befinden sollte, warum können wir diesen Ort dann nicht berechnen? Die Schlussfolgerung liegt nun ziemlich nahe, dass wir wegen unserer



17 Wasserstofforbitale in Abhängigkeit von bestimmten Zahlen, die man Quantenzahlen nennt. Je heller der Bereich desto höher die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Elektrons.

Unfähigkeit, den Ort eines Elektrons festzulegen, wohl auch noch nicht die endgültigen Gesetze der Atomphysik entdeckt haben.

Davon war zum Beispiel auch Einstein bis an sein Lebensende fest überzeugt. Obwohl er mit der Einführung der Lichtquanten entscheidend zum Erfolg der Quantentheorie beitrug, konnte er diesen im wahrsten Sinne des Wortes Realitätsverlust nicht akzeptieren. Er fasste seine Gefühle mit dem berühmten Satz »Gott würfelt nicht.« zusammen. Doch die experimentellen Ergebnisse zeigen ganz eindeutig in die andere Richtung. Die Natur würfelt an allen Ecken und Enden. Doch der Interpretationskrieg, was denn von all dem nun zu halten sei, dauert seit Jahrzehnten an. Wir lassen ihn hier aber zunächst einmal links liegen und widmen uns diesen Fragen später ausgiebig. Unstrittig ist jedenfalls, dass die Quantentheorie mit ihrer Wahrscheinlichkeitsdeutung bisher alle Versuchsergebnisse mit zum Teil fantastischer Genauigkeit vorhersagen und beschreiben konnte.

Im Jahr 1927 hat Werner Heisenberg die für mich wichtigste Formel der gesamten Physik aufgestellt: die *Unbestimmtheitsrelation*, die auch oft als Unschärferelation

bezeichnet wird. Diese Beziehung beinhaltet den entscheidenden Unterschied zwischen der klassischen Weltanschauung und der Quantentheorie. Bei einem Planeten, einem Zug oder einem Speer scheint eine gleichzeitige Messung seines Orts und seiner jeweiligen Geschwindigkeit immer mit einer beliebigen Genauigkeit möglich zu sein. Auch die Relativitätstheorie schränkt dies in keiner Weise ein. Deshalb lassen sich in der gesamten Mechanik auch Ort und Geschwindigkeit eines Körpers wie selbstverständlich gleichzeitig berechnen, und zwar ohne Wenn und Aber.

In der Quantentheorie ist dies aber nicht mehr für alle Messgrößen so einfach der Fall. Das bekannteste Paar von Größen, wo dies *nicht* gilt, ist gerade der Ort eines Körpers und sein Impuls, also das Produkt aus seiner Masse mal seine Geschwindigkeit. In der heisenbergschen Formel geht es dabei nicht einfach um die Ungenauigkeiten, mit denen wir sowohl den Ort x als auch den Impuls p messen können, sondern darum, wie genau sie prinzipiell bekannt sein können. Solche Ungenauigkeiten werden typischerweise mit einem vorangestellten Δ (gesprochen: delta) gekennzeichnet. Ich schreibe nun zunächst die Unbestimmtheitsbeziehung hin und erkläre sie Ihnen sogleich:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h / 4\pi = \hbar / 2.$$

In Worten heißt dies, dass die Ungenauigkeit, mit der wir den Ort eines Körpers kennen, multipliziert mit der Ungenauigkeit, mit der wir seinen Impuls kennen, immer größer oder gleich dem planckschen Wirkungsquantum h geteilt durch 4π sein muss. Dabei wird die Größe $h/2\pi$ mit \hbar (gesprochen: h quer) abgekürzt. Jetzt werden Sie sich vielleicht fragen, warum denn das so wichtig ist? Es läuft so ähnlich wie bei der speziellen Relativitätstheorie auf den Satz hinaus, dass alles seinen Preis hat.

Nehmen wir an, wir wollen versuchen, den Ort eines Elektrons zu messen, in dem wir es zum Beispiel mit Licht bestrahlen. Dabei wird ein Photon an dem Elektron ähnlich wie eine Billardkugel gestreut. Messen wir die Richtung und damit die Ablenkung des Photons, so erhalten wir Auskunft über den Ort des Elektrons. Den Ort kennen wir allerdings nicht mit beliebiger Genauigkeit. Die Verhältnisse sind hier ähnlich wie bei einem Lichtmikroskop. Man kann mit ihm keine Strukturen erkennen, die kleiner sind als die verwendete Lichtwellenlänge. So in etwa ist es auch bei einem Elektron, dessen Ort man mit Licht bestimmen will. Wir kennen den Ort des Elektrons nur mit der Genauigkeit, die der Wellenlänge unseres Lichts entspricht.

Wollen wir den Ort genauer messen, so müssen wir die Wellenlänge verkürzen oder mit anderen Worten die Energie des Lichts erhöhen. Damit vergrößern wir aber auch den Impuls des Lichts. Und genau dieser Lichtimpuls ist nun der Übeltäter. Er verpasst dem Elektron einen Stoß, sodass es sich nicht mehr so bewegt wie vorher. Unsere Ortsmessung hat also den Impuls des Elektrons verändert. Dabei

können wir aber nicht feststellen, in welche Richtung das passiert. Und nun haben wir den Salat. Je genauer wir den Ort des Elektrons messen wollen, desto stärker verändern oder stören wir seinen Impuls. Genau diesen Zusammenhang stellt die heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation in einer Formel dar. Je genauer der Ort eines Körpers bekannt ist desto ungenauer kennen wir seinen Impuls und umgekehrt.

Da allerdings das plancksche Wirkungsquantum eine sehr kleine Größe ist, merken wir im Alltag nichts davon. Es hat in unseren handelsüblichen Einheiten wie Meter, Kilogramm und Sekunde die Größe von lediglich $6,6 \times 10^{-34}$ Joule mal Sekunde, wobei Joule die Einheit der Energie ist. Das plancksche Wirkungsquantum ist damit geradezu erschreckend winzig. Allerdings ist ein Elektron mit $9,1 \times 10^{-31}$ kg auch so dermaßen leicht, dass es sich sein Bewegungszustand durch eine Messung relativ leicht beeinflussen lässt. In atomaren Größenordnungen diktiert daher die Unbestimmtheitsrelation das Verhalten der Elektronen.

Ein zweites Paar von Größen, die ebenfalls durch eine Unbestimmtheitsbeziehung gekoppelt sind, ist die Energie E eines Körpers und die Zeitdauer t , die wir für die Messung dieser Energie aufwenden müssen. Um beispielsweise die Energie von Licht zu bestimmen, müssen wir seine Schwingungsfrequenz messen. Wir können dazu seine Schwingungen einfach zählen. Dies wird aber um so genauer, je mehr Zeit wir dafür zur Verfügung haben. Die Umkehrung dieser Feststellung gilt ebenfalls. Je kürzer eine Messung andauert, desto ungenauer wird eine Energiebestimmung:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar.$$

Diese anschaulichen Erklärungen der Unbestimmtheitsrelationen sind jedoch mit äußerster Vorsicht zu genießen. Wir haben die Unschärfe einer Messung mit der damit verbundenen Störung des Messobjekts erklärt. Dies stellt aber nur einen Versuch dar, den wirklichen Sachverhalt erst einmal begreifbar zu machen. Die Schwäche der obigen Argumentation liegt darin, dass wir stillschweigend davon ausgegangen sind, dass ein Messobjekt zu jedem Zeitpunkt auch immer einen Ort und eine Geschwindigkeit *besitzt*.

Wir haben ein Elektron quasi wie eine kleine Kugel behandelt, die von einer anderen Kugel getroffen wird und dabei abgelenkt wird. Diese Sichtweise werden wir aber noch völlig aufgeben müssen. Die heisenbergsche Beziehung beschreibt *nicht* die Unschärfe von Messungen, sondern den Grad, mit dem Messgrößen überhaupt festgelegt, also bestimmt sind. Sie setzt gerade *nicht* voraus, dass diese Größen *vor* der Messung schon irgendeinen Wert haben, der sich dann nur unsharp feststellen lässt. Genau deshalb ziehe ich den Begriff der Unbestimmtheitsrelation der geläufigeren Bezeichnung Unschärfere relation vor.

Die Teilchen, mit denen die Quantentheorie arbeitet, sind absolut *ununterscheidbar*. Jedes Proton, Elektron oder andere Elementarteilchen hat jeweils exakt die gleichen Eigenschaften wie alle anderen. Seine Masse, elektrische Ladung und andere wichtige Eigenschaften, die man auch als Quantenzahlen bezeichnet, sind immer die gleichen. Genau durch diese Eigenschaften und durch nichts anderes ist ein solches Teilchen charakterisiert. Sie geben dem Teilchen seine Identität. Die Gleichheit zweier dieser Teilchen geht aber weit über jeden Gleichheitsbegriff hinaus, den wir normalerweise kennen. Zwei Elektronen sind also nicht nur so gleich wie zwei Teller oder zwei Billardkugeln, sondern absolut gleich. Daher gibt es auch keine praktische denkbare Möglichkeit, eines dieser Teilchen zu markieren und damit wiedererkennbar zu machen.

Als Beispiel betrachten wir zwei Elektronen, die wir in einen bestimmten Raumbereich einsperren. Wenn wir beispielsweise nach einer Sekunde wieder nach den Elektronen schauen, so ist niemand in der Lage zu sagen, welches der beiden nun vorher das eine oder das andere war. Um dies festzustellen, müssten wir die Teilchen schon lückenlos beobachten. Aber selbst eine schnelle Folge von Beobachtungen ist keine durchgängige Überwachung, wie wir dies zum Beispiel von der Flugbahn eines Speeres her kennen. Außerdem ist jede Beobachtung den Regeln der Unbestimmtheitsrelation unterworfen, was bedeutet, dass sie niemals mit beliebiger Genauigkeit erfolgen kann. Wenn wir also mehrmals hintereinander ununterscheidbare Teilchen beobachten, so ist es prinzipiell nicht möglich zu sagen, wie sich jedes *einzelne* von ihnen verhalten hat. Eine solche Aussage macht gar keinen Sinn.

Dies ist alles andere als bloße Haarspalterei, sondern hat handfeste praktische Konsequenzen. Die Ununterscheidbarkeit von Teilchen führt zusammen mit einer anderen Größe, die wir gleich kennenlernen werden, dazu, dass es zwei fundamental verschiedene Sorten von Teilchen gibt. Die eine Sorte baut unsere Materie auf, wie beispielsweise das Proton oder das Elektron, und von der anderen Sorte haben wir bislang nur das Photon kennengelernt. Viele Teilchen dieser anderen Sorte vermitteln die Wirkungen von Kräften zwischen Teilchen, in dem sie zwischen diesen Teilchen ausgetauscht werden, was wir uns noch genauer ansehen werden. Die erste Sorte werde ich daher im Folgenden als Materieteilchen bezeichnen und die zweite Sorte als Austauschteilchen.

Die Größe, um die sich diese zwei Teilchensorten unterscheiden, bezeichnen die Physiker als *Spin*, was im Deutschen so viel heißt wie Eigendrehung. Doch mit der Vorstellung von einem sich drehenden Elektron kommen wir leider nicht besonders weit, obwohl solch ein Bild oftmals in der Literatur verwendet wird. Denn ein Elektron ist nach allem, was wir wissen, ein punktförmiges Teilchen oder etwas vornehmer ausgedrückt, es besitzt keine innere Struktur. Und da ein Punkt keine Ausdehnung hat, kann er sich auch nicht drehen.

Obwohl der Spin sich mathematisch wie eine Drehbewegung verhält und auch die Einheit eines Drehimpulses besitzt, so ist er doch etwas wesentlich Abstrakteres, aber trotzdem eine messbare Größe. Man kann beispielsweise den Spin von Elektronen messen, in dem man sie durch ein spezielles Magnetfeld fliegen lässt. Dabei zeigt sich, dass ein Elektron genau zwei Möglichkeiten besitzt, sich in solch einem Feld auszurichten. Es kann sich in Richtung des Feldes orientieren oder entgegengesetzt dazu. Mehr als diese beiden Möglichkeiten besitzt ein Elektron nicht, auch wenn dies vielleicht schwer vorstellbar ist. Der Spin eines Elektrons verhält sich demnach genauso wie ein Bit in einem Computer. Fragen wir das Bit, ob es An oder Aus ist, so erhalten wir genau eine Antwort aus zwei möglichen. Wenn ein Elektron durch ein Magnetfeld fliegt und wir es damit fragen, wie es orientiert ist, so bekommen wir ebenfalls nur zwei mögliche Ergebnisse: mit dem Feld orientiert oder entgegengesetzt.

Dabei ist es entscheidend, dass wir die Ausrichtung des Elektrons auch wirklich messen, denn erst dadurch wird sein Spin festgelegt. Zuvor hatte der Spin des Elektrons zwar zwei Antwortmöglichkeiten, dafür aber gar keinen definierten Wert. Wie sich die Natur bei Messungen entscheidet und wann der Wert einer Größe vorhanden ist, sehen wir uns in aller Ausführlichkeit erst im zweiten Buchteil. Doch möchte ich so viel schon vorwegnehmen: Jedes Experiment ist im wahrsten Sinne des Wortes ein Frage-und-Antwort-Spiel. Auf jede unserer Fragen bekommen wir von der Natur die passende Antwort. Dabei wird immer Information zwischen den beteiligten Partnern übertragen, und dies bleibt nie folgenlos. Das heißt aber auch, dass ein Elektron, nachdem es uns eine Frage beantwortet hat, nicht mehr dasselbe ist wie vorher.

Der Messwert des Elektronenspins beträgt genau die Hälfte von \hbar , und der Spin eines Photons ist exakt \hbar . Dies ist kein Zufall, denn alle Messungen von Spins haben stets entweder einen halbzahligen oder einen ganzzahligen Wert in der Einheit \hbar ergeben. Dabei besitzen alle Materieteilchen immer einen halbzahligen Spin wie beispielsweise $3/2$ oder $1/2$ und alle Austauschteilchen stets einen ganzzahligen Spin wie 2, 1 oder 0. Andere Werte von Spins kommen in der Natur nicht vor. Sie geben daher immer die Antwortmöglichkeiten auf eine Ausrichtungsanfrage an.

Kombiniert man nun den Spin mit der Ununterscheidbarkeit der Teilchen, so zeigt sich, dass sich die Materieteilchen, die man auch als Fermionen bezeichnet, nicht beliebig dicht zusammenpacken lassen. Für Austauschteilchen, die auch Bosonen genannt werden, stellt dies jedoch kein Problem dar. Wir schauen uns gleich die dramatischen Folgen dieser scheinbar harmlosen Formulierung an.

In den Atomen führt diese Regel dazu, dass sich die Elektronen als Materieteilchen nicht beliebig nahe kommen können. Tatsächlich dürfen sich in einem Orbital immer nur genau zwei Elektronen mit entgegengesetztem Spin aufhalten. Mehr Elektronen pro Orbital sind nicht erlaubt. Dieses sogenannte Pauli-Prinzip wurde

1925 von Wolfgang Pauli (1900–1958) erstmals aufgestellt. Aus ihm leiten sich die Festigkeit unserer Materie und die Chemie her.

Das Pauli-Prinzip beschreibt, warum sich verschiedene Atome nicht einfach überlappen dürfen. Könnte man ihre Orbitale einfach unter Druck ineinanderschieben, so würden sich dann innerhalb der Grenzen eines Atoms mehr als zwei Elektronen innerhalb eines Orbitals befinden. Und gerade dies ist nach dem Pauli-Prinzip verboten. Wir haben somit das korrekte Bild für sich berührende Atome gefunden, also auch für die Atome meiner Hand, die einen Tisch berühren. Das Pauli-Prinzip verhindert das Überlappen von gefüllten Atomorbitalen, sodass wir nicht einfach durch einen Tisch hindurch greifen können oder gar durch die Decke fallen.

Auch chemische Verbindungen lassen sich nun relativ leicht verstehen. Wenn sich Atome berühren, die jeweils nur ein einfach besetztes Orbital besitzen, so können diese Orbitale sehr wohl miteinander überlappen. Die Elektronen dieser Orbitale bilden nun ein neues, voll besetztes Orbital und lassen sich nun nicht mehr eindeutig einem Atom zuordnen. Sie gehören vielmehr zu beiden Atomen, die sich damit zu einem Molekül mittels einer chemischen Bindung vereint haben.

Ein gegenteiliges Verhalten finden wir stattdessen bei Photonen, die sich als Austauschteilchen beliebig nahe kommen dürfen. Erst durch diese Liebe zur Nähe wird die Funktionsweise eines Lasers mit seiner konzentrierten Strahlung möglich. Jeder CD-Player mit seinem Laser funktioniert nur, weil Photonen ununterscheidbare Teilchen mit ganzzahligem Spin sind, die sich deshalb beliebig annähern können.

Die wohl verblüffendste Eigenschaft eines Atoms ist die, dass es sich um eine *Einheit* handelt. Schauen wir uns dazu noch einmal das einfachste Atom an: Wasserstoff besteht landläufig gesprochen aus einem Proton und einem Elektron. Doch schon bei dem Wort *bestehen* fangen die eigentlichen Schwierigkeiten an. Wie soll man sich dies vorstellen, wenn man doch nicht weiß, wo sich das Elektron zu einer bestimmten Zeit im Atom aufhält? Wie kann ein Objekt aus einem anderen bestehen, wenn sich sein Bestandteil nirgendwo mit Sicherheit befindet?

Normalerweise sind wir gewohnt, dass wir es mit gut trennbaren Gegenständen zu tun haben. Wenn wir einen Apfel in eine Schale legen, so können wir die beiden Objekte auch zusammen bewegen, beispielsweise hochheben. Trotzdem liegt der Apfel jederzeit und für alle gut sichtbar als separates Objekt in der Schale. Wir können ihn, so oft wir wollen, wieder in die Hand nehmen und nochmals hinein legen. Was wir auch tun, es bleiben immer zwei einzelne Gegenstände: ein Apfel und eine Schale.

Ganz anders sind die Verhältnisse beim Wasserstoff. Hier verbinden sich ein Proton und ein Elektron zu einem Atom. Doch ab jetzt haben wir es nur noch mit diesem Wasserstoffatom zu tun. Das Elektron können wir erst dann wieder nach-

weisen, wenn wir das Atom unter genügend hoher Energiezufuhr zerstören. Es konnte aber noch niemals ein Elektron innerhalb eines intakten Wasserstoffatoms gefunden werden, *ohne* das Atom durch diese Beobachtung wieder in ein Proton und ein Elektron zu zerlegen.

Dieses Beispiel zeigt, dass die Quantentheorie das Atom als ein ganzheitliches Objekt beschreibt. Die Verbindung zwischen dem Proton und dem Elektron bewirkt, dass diese Teilobjekte nun nicht mehr vorliegen. Es gibt sie nicht mehr, denn wir können sie nicht ausfindig machen, ohne die Einheit kaputtzumachen.

Genau in diesem Sinne möchte ich ebenfalls in den folgenden Kapiteln verstanden werden, wenn ich feststelle, dass sich Atomkerne aus Protonen und Neutronen aufbauen und dass Protonen aus Quarks bestehen. Auch diese Objekte müssen eigentlich als Einheit betrachtet werden. Sie sind zwar aus anderen Objekten gebildet worden, aber die Beziehungen zwischen ihnen sind anderer Natur, als wir dies kennen. Das liegt nicht nur an der Stärke der beteiligten Kräfte, sondern vor allem an der Art der Verknüpfungen, mit denen die Quantentheorie arbeitet. Sie verkoppelt die Teilchen so ähnlich, wie das beim Weben mit den Fäden geschieht. Wir nehmen nicht mehr die einzelnen Fäden wahr, sondern nur noch ein miteinander verschränktes Webmuster. Diese *Verschränkungen* werden wir später noch näher kennenlernen, und sie werden uns zwingen, unseren Realitätsbegriff gehörig zu überdenken.

Die Quantentheorie möchte ich nun als neue und zentrale Theorie erneut mit einem Geschehen auf einer Bühne vergleichen. Bisher hatte ich die klassische Mechanik und die spezielle Relativitätstheorie in den Kapiteln 4 und 8 charakterisiert. In der Quantentheorie sieht nun alles ganz anders aus. Aus dem klar festgelegten Ablauf ist ein Zufallsreigen geworden.

Quantentheorie:

Das Geschehen im Universum ist im Vorhinein überhaupt nicht festgelegt. Lediglich Wahrscheinlichkeiten für bestimmte Ereignisse sind bekannt. Alle Ereignisse werden durch Würfeln mithilfe eines Regelwerks bestimmt, das nach jedem Wurf Ergebnis wieder angepasst werden muss. Manche Paare von Größen sind wechselseitig nur bis zu einem bestimmten Grad festgelegt. Einfache Teilchen lassen sich nicht voneinander unterscheiden und verbinden sich bei einer Wechselwirkung zu einer gemeinsam wirkenden Einheit. Ansonsten gelten auch alle Effekte der speziellen Relativitätstheorie.