Von Einzelgängern und Teamplayern

Wie sich Fermionen und Bosonen in unserer Alltagswelt bemerkbar machen

Gert-Ludwig Ingold

Ein wesentlicher Unterschied zwischen unserer Alltagswelt und der Quantenwelt besteht darin, dass sich einzelne Quantenteilchen der gleichen Sorte, zum Beispiel Elektronen, grundsätzlich nicht voneinander unterscheiden lassen. Dies hat zur Folge, dass in unserer dreidimensionalen Welt zwei fundamental verschiedene Klassen von Teilchen existieren können, Fermionen und Bosonen, deren Verhalten im ersten Fall eher an Einzelgänger und im zweiten Fall eher an Teamplayer erinnert. Wir werden sehen, dass diese Ununterscheidbarkeit von Quantenteilchen von grundlegender Bedeutung auch in unserer Alltagswelt ist. Ohne sie würde es keine chemischen Elemente geben und damit letztlich auch kein Leben, wie wir es kennen.

1 Unterscheidbar oder nicht – Ein Unterschied zwischen Alltags- und Quantenwelt

Aus unserem täglichen Leben sind wir es gewohnt, dass sich Personen, Tiere oder Gegenstände voneinander unterscheiden lassen. Wir müssen unter Umständen nur sehr genau hinsehen, zum Beispiel bei eineiigen Zwillingen.

G.-L. Ingold (✉)
Institut für Physik, Universität Augsburg, Augsburg, Deutschland
E-Mail: Gert.Ingold@physik.uni-augsburg.de

Auf einem Billardtisch können wir die einzelnen Kugeln in ihrer Bewegung auch dann verfolgen, wenn sie sich nicht farblich unterscheiden. Natürlich kann die Unterscheidung in der Praxis schwierig sein, was sich Hütchenspieler zu Nutze machen. Aber es spricht nichts dagegen, die Bewegungen auch eines geschickten Hütchenspielers nachzuvollziehen, zumindest im Prinzip.

Erst diese Unterscheidbarkeit erlaubt es auch, dass wir uns als Individuen wahrnehmen, ein Umstand, der eine zentrale Rolle für unser Selbstverständnis spielt. Dabei ist die Wahrnehmung der eigenen Person als »Ich« nicht selbstverständlich, sondern entwickelt sich üblicherweise im zweiten Lebensjahr. Auch bei bestimmten Tierarten kann diese Selbstwahrnehmung nachgewiesen werden. Im Rahmen eines Spiegeltests, bei dem sich ein Tier in einem Spiegel sehen kann, wird anhand der Reaktion darauf geschlossen, ob die betreffende Tierart in der Lage ist, das eigene Spiegelbild als solches zu identifizieren oder ob es dieses als Artgenossen begreift.

Wenn wir von der Alltagswelt in den Mikrokosmos gehen und uns mit den Bausteinen der Materie, also Elementarteilchen wie zum Beispiel den Elektronen, beschäftigen, ist es natürlich nicht sinnvoll, nach der Selbstwahrnehmung zu fragen. In der unbelebten Natur gibt es kein Bewusstsein. Wir können aber die Frage stellen, ob Elektronen so wie zuvor die Billardkugeln unterscheidbar sind. Können wir also die Frage beantworten, ob das Elektron, das bei uns daheim aus der Steckdose kommt, von einem Kernkraftwerk auf die Reise geschickt wurde oder von einem Windkraftwerk? Angesichts der schieren Zahl der fließenden Elektronen wird dies in der Praxis nicht möglich sein, aber wäre es zumindest im Prinzip denkbar?

Falls Elektronen und andere Elementarteilchen dagegen ununterscheidbar sind, stellt sich die Frage nach den Konsequenzen. Was hat es für Folgen in der atomaren Welt, wenn sich Elementarteilchen nicht unterscheiden lassen, und sind diese Auswirkungen letztlich nur für Physikerinnen und Physiker von Interesse? Oder würde unsere Alltagswelt anders aussehen, wenn Elementarteilchen unterscheidbar wären? Wir werden diese Fragen hier nicht erschöpfend diskutieren können, sondern uns auf einige Aspekte beschränken. Am Ende wird sich aber zeigen, dass es für die Welt, wie wir sie kennen, entscheidend ist, ob Elementarteilchen individuell unterscheidbar sind oder eben nicht.

2 Wege von Quantenteilchen an einem halbdurchlässigen Spiegel

Um uns der Frage nach der Unterscheidbarkeit von Elementarteilchen zu nähern, greifen wir erneut zu einem Spiegel und stellen ein Gedankenexperiment an. Dieses Experiment hat aber nichts mit dem zuvor genannten Spiegelexperiment zu tun, da verhaltenspsychologische Experimente an Elementarteilchen sinnlos wären. Unser Spiegel unterscheidet sich von Spiegeln, wie wir sie zum Beispiel aus dem Badezimmer kennen, insofern, als er halbdurchlässig ist. Fällt Licht auf einen solchen Spiegel, so wird die Hälfte des Lichts reflektiert und die andere Hälfte geht durch den Spiegel, wird also transmittiert.

Elementarteilchen sind allerdings Quantenobjekte und diese können sich sowohl wie eine Welle als auch wie ein Teilchen verhalten. Dies gilt auch für Licht, das unter geeigneten Bedingungen seinen Teilchencharakter offenbart. Man spricht dann von Photonen. Experimentell ist es möglich, immer nur ein Elektron oder ein Photon auf den Spiegel fallen zu lassen. Was bedeutet es dann, dass der Spiegel halbdurchlässig ist? Teilt sich das Teilchen womöglich in zwei Hälften auf? Dies kann offenbar nicht der Fall sein, da Elementarteilchen nicht halbiert werden können. Sogar für Elementarteilchen wie zum Beispiel Protonen, die aus noch kleineren Bausteinen, den Quarks, bestehen, ist eine Halbierung nicht möglich. Es gibt keine halben Protonen.

Betrachtet man ein einzelnes Elementarteilchen, so gibt es am halbdurchlässigen Spiegel nur die zwei Möglichkeiten, dass das Teilchen entweder reflektiert oder aber transmittiert wird. Diese beiden Möglichkeiten sind im linken Teil der Abb. 1 angedeutet, wobei das Elementarteilchen hier entweder von links oder von unten auf den Spiegel fallen kann. Ob ein Teilchen reflektiert oder transmittiert wird, unterliegt völlig dem Zufall. Gemittelt über sehr viele Teilchen wird aber die Hälfte der Teilchen reflektiert und die andere Hälfte transmittiert. Damit finden wir auch wieder Anschluss an unsere vorherige Aussage, dass eine Welle jeweils zur Hälfte reflektiert und transmittiert wird. Für die weiteren Überlegungen ist das Teilchenbild geeigneter, so dass wir also davon ausgehen, dass zum Beispiel das im linken Teil der Abb. 1 von links auf den Spiegel fallende Teilchen die Möglichkeit hat, entweder geradeaus nach rechts weiterzulaufen oder reflektiert zu werden und dann nach oben zu laufen.

Bis jetzt war nur von einem einzelnen Teilchen die Rede, bei dem die Frage der Unterscheidbarkeit jedoch nicht sinnvoll ist. Wir müssen uns also

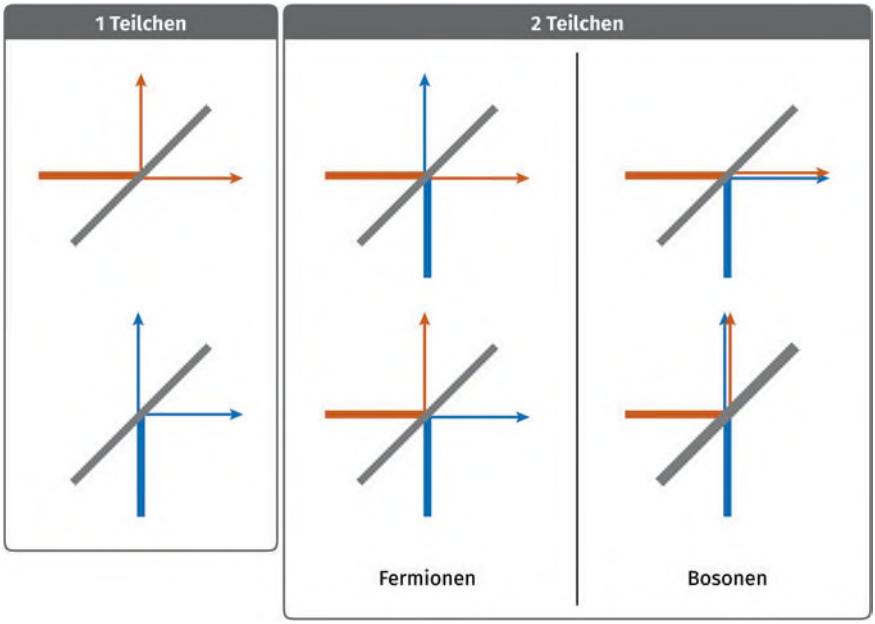

Abb. 1 Teilchen an einem halbdurchlässigen Spiegel. Fermionen laufen in unterschiedliche Richtungen, Bosonen dagegen in die gleiche Richtung.

das Verhalten von mindestens zwei Teilchen an einem halbdurchlässigen Spiegel ansehen. Dazu lassen wir eines der beiden Teilchen, wie im rechten Teil der Abb. 1 gezeigt, von links auf den Spiegel fallen, während das andere Teilchen von unten kommen soll. Falls die beiden Teilchen unterscheidbar sind, können wir die Gesamtsituation als Überlagerung der beiden zuvor beschriebenen Fälle betrachten. Wir erhalten damit vier mögliche Ausgänge unseres Gedankenexperiments. In einem Viertel der Fälle werden die beiden Teilchen einfach durch den Spiegel transmittiert und in einem anderen Viertel der Fälle werden beide Teilchen am Spiegel reflektiert. Diese Szenarien sind in der linken Spalte dargestellt. Obwohl in jedem dieser Fälle eines der Teilchen rechts des Spiegels und ein anderes Teilchen oberhalb des Spiegels gefunden wird, können wir die beiden Fälle wegen der Unterscheidbarkeit der Teilchen unterscheiden. In den verbleibenden beiden Fällen, die in der rechten Spalte gezeigt sind, wird eines der Teilchen reflektiert und das andere transmittiert. Somit werden beide Teilchen in einem weiteren Viertel der Fälle rechts des Spiegels gefunden, und in einem weiteren Viertel laufen beide Teilchen nach oben weg.

Während das Gedankenexperiment für unterscheidbare Teilchen also vier unterschiedliche Ausgänge haben kann, reduziert sich deren Zahl für ununterscheidbare Teilchen auf lediglich drei Ausgänge. Entweder nehmen die beiden Teilchen wie in der linken Spalte unterschiedliche Wege, wobei sich im Gegensatz zu den unterscheidbaren Teilchen nun nicht mehr sagen lässt, welches der Teilchen nach rechts und welches nach oben läuft. Wir dürfen die unterschiedlichen Farben in der Abbildung ja jetzt nicht mehr zur Unterscheidung heranziehen. Darüber hinaus gibt es noch zwei Möglichkeiten für die beiden Teilchen, hinter dem Spiegel in die gleiche Richtung zu laufen, wie es die rechte Spalte zeigt.

3 Zwei Sorten von Teilchen

Tatsächlich ist es aber nicht so, dass für eine gegebene Art von Elementarteilchen alle drei Möglichkeiten auftreten können. Vielmehr gibt es zwei grundsätzlich verschiedene Arten von Elementarteilchen, die als *Bosonen* und *Fermionen* bezeichnet werden. Fallen zwei Bosonen von verschiedenen Seiten auf einen halbdurchlässigen Spiegel, so bewegen sie sich anschließend gemeinsam in die gleiche Richtung. Bosonen haben die Tendenz sich zusammenzutun, sie sind gewissermaßen Teamplayer.

Ganz anders dagegen die Fermionen. Bei ihnen ist immer die dritte Möglichkeit realisiert. Nachdem sie auf den Spiegel getroffen sind, laufen sie in unterschiedliche Richtungen weiter. Man findet nie zwei Fermionen auf der gleichen Seite des Spiegels. Fermionen sind also eher Einzelgänger. Dabei haben die beiden beteiligten Fermionen die Möglichkeit, entweder beide reflektiert zu werden oder beide ungehindert durch den halbdurchlässigen Spiegel zu gehen.

Das unterschiedliche Verhalten der beiden Teilchensorten am halbdurchlässigen Spiegel können wir im Wellenbild durch eine Analogie mit unserer Alltagswelt verstehen. Regentropfen, die in eine Regenpfütze fallen, führen zu sich überlagernden Wellen. Dabei tritt das Phänomen der Interferenz auf, bei dem sich Wellenberge und Wellentäler gegenseitig verstärken oder auslöschen können, und so zu einem detailreichen Muster führen. Wie wir nachher noch sehen werden, kann Bosonen und Fermionen ein Vorzeichen zugeordnet werden, das ähnlich einem Wellenberg oder Wellental wirkt. Als Folge der Interferenz sind dann bestimmte der vier Möglichkeiten ausgeschlossen, die im rechten Teil der Abb. 1 dargestellt sind.

Die beiden Teilchenarten – Bosonen und Fermionen – tragen ihren Namen in Erinnerung an zwei Physiker. Der 1894 geborene indische

Physiker Satyendra Nath Bose ist Namenspatron der Bosonen. Er hatte ihre charakteristische Eigenschaft in einer Publikation, möglicherweise durch eine glückliche Fügung, vorhergesagt, ohne dabei auf die Ununterscheidbarkeit hinzuweisen. Dies fiel erst Albert Einstein bei der Lektüre des Artikels auf. Die andere Teilchenart, die Fermionen, verdanken ihren Namen Enrico Fermi, einem 1901 geborenen italienischen Physiker, der unter anderem den ersten von Menschen geschaffenen Kernreaktor in Betrieb nahm.

Alle bekannten Elementarteilchen lassen sich also einer von zwei Kategorien zuordnen. Die Bausteine der uns umgebenden Materie, Elektronen, Protonen und Neutronen, gehören zu den Fermionen. Lichtquanten, also Photonen, dagegen sind Bosonen. Interessant ist, dass bosonische Teilchen Wechselwirkungen vermitteln. So sind Photonen für die elektromagnetische Wechselwirkung, also die Kräfte zwischen geladenen Elementarteilchen, verantwortlich. Das Z^0-Boson und die beiden geladenen W-Bosonen, W^+ und W^-, vermitteln die schwache Wechselwirkung, und für die starke Wechselwirkung sind die Gluonen und in bestimmten Situationen die π-Mesonen, alles ebenfalls Bosonen, zuständig.

4 Vertauschen ununterscheidbarer Teilchen

Nun kann man sich die Frage stellen, ob es nur zwei Sorten von Teilchen gibt und an welcher Eigenschaft man sie erkennen kann. Wenden wir uns zunächst der ersten Frage zu. Schon bei der Diskussion des Verhaltens von Teilchen an halbdurchlässigen Spiegeln hatten wir gesehen, dass das unterschiedliche Verhalten von Fermionen und Bosonen erst deutlich wird, wenn man mindestens zwei gleiche Teilchen betrachtet. Stellen wir uns also vor, dass wir zwei identische Teilchen vorliegen haben.

Dann können wir die beiden Teilchen miteinander vertauschen, ohne dass sich der Unterschied in einer messbaren Weise feststellen ließe. In der Quantentheorie, die wir zur Beschreibung der Teilchen benötigen, wird der Zustand der beiden Teilchen durch eine so genannte Wellenfunktion festgelegt, die üblicherweise mit dem Buchstaben ψ bezeichnet wird. In Abb. 2 charakterisieren die Argumente der Wellenfunktion die Anordnung der Teilchen, wobei wir so tun, als könnten wir die Teilchen unterscheiden. Im Ausgangszustand ganz links befindet sich das erste Teilchen links vom zweiten Teilchen, so dass der Zustand durch die Wellenfunktion $\psi(1, 2)$ angegeben wird.

Nun vertauschen wir die beiden Teilchen, indem wir das zweite Teilchen um das erste Teilchen herumführen. Der in Abb. 2 gezeigte Faden, der das

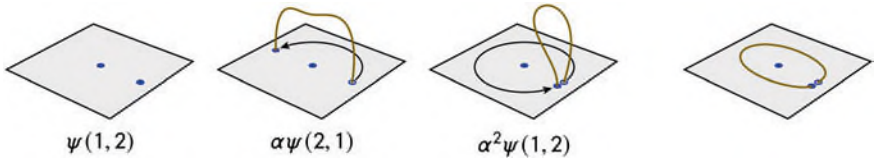

Abb. 2 Beim zweimaligen Vertauschen zweier Teilchen entsteht ein Faktor α^2, der in drei Dimensionen gleich eins sein muss. In zwei Dimensionen lässt sich der Anfangszustand vom Zustand nach zweimaligem Vertauschen unterscheiden.

zweite Teilchen in Gedanken mit dem Ausgangspunkt verbindet, wird nachher noch eine Rolle spielen. Im zweiten Bild der Abb. 2 befindet sich das zweite Teilchen nun links des ersten Teilchens. Dieser Zustand wird dementsprechend durch die Wellenfunktion $\psi(2, 1)$ beschrieben. Allerdings lässt es die Quantentheorie zu, dass dabei zusätzlich noch ein konstanter Faktor auftreten kann, den wir hier mit α bezeichnen wollen. Nach dem ersten Vertauschungsschritt lautet unsere Wellenfunktion also $\alpha\psi(2, 1)$.

In einem zweiten Vertauschungsschritt führen wir das zweite Teilchen vollständig um das erste Teilchen herum. Dabei ändert sich die Anordnung der Teilchen wiederum, und wir erhalten einen weiteren Faktor α. Der neue Zustand wird also durch die Wellenfunktion $\alpha^2\psi(1, 2)$ beschrieben. Wenn wir uns den Faden, der das zweite Teilchen mit dem Anfangspunkt verbindet, als Gummifaden vorstellen, so kann sich dieser vollständig zusammenziehen. Wir können damit den Zustand nach zweimaliger Vertauschung nicht vom Ausgangszustand unterscheiden und dürfen den neuen Zustand auch einfach durch die Wellenfunktion $\psi(1, 2)$ angeben. Damit muss aber das Quadrat von α gleich 1 sein. Es gibt demnach genau zwei Möglichkeiten: α kann entweder gleich 1 sein oder es kann, wegen Minus mal Minus gleich Plus, gleich -1 sein. Wir haben es also mit zwei Klassen von Teilchen zu tun, den Bosonen, für die α gleich 1 ist, und den Fermionen, für die α gleich -1 ist. Dieser Unterschied im Vorzeichen hat direkt das unterschiedliche Verhalten von zwei Fermionen oder zwei Bosonen an einem halbdurchlässigen Spiegel zur Folge.

Der Vergleich der beiden rechten Bilder in Abb. 2, die den Zustand nach zweimaligem Vertauschen der beiden Teilchen darstellen, deutet darauf hin, dass das Ergebnis in drei Dimensionen nicht auf eine Welt übertragbar ist, die nur zwei räumliche Dimensionen besitzt. In drei Dimensionen konnten wir nämlich argumentieren, dass sich der Faden, der das zweite Teilchen mit dem Ausgangspunkt verbindet, über das erste Teilchen hinweg zusammenziehen lässt. In einem zweidimensionalen Raum ist dies jedoch

nicht möglich. Der Zustand nach zweimaligem Vertauschen lässt sich von dem ursprünglichen Zustand durch eine Windungszahl unterscheiden, die angibt, wie oft der Faden um das erste Teilchen herumgeführt wurde. Damit ist unsere vorige Argumentation dafür, dass es nur Bosonen und Fermionen geben kann, in einer zweidimensionalen Welt hinfällig. Dort kann es weitere Teilchen geben, die man zusammenfassend als Anyonen vom Englischen *any* für „irgendein" bezeichnet.

Auch in unserer dreidimensionalen Welt können diese Anyonen unter bestimmten Umständen eine Rolle spielen, wenn auch nicht als echte Teilchen, sondern als so genannte Quasiteilchen. Zwingt man Elektronen dazu, sich in geeignet geschichteten Halbleiteranordnungen in einer Ebene zu bewegen, so kann die Vorstellung von Anyonen zum Beispiel helfen, das Verhalten solcher Systeme in einem senkrecht zur Ebene stehenden Magnetfeld beim fraktionalen Quanten-Hall-Effekt zu verstehen.

5 Fermionen, Bosonen und ihr Spin

Nachdem uns diese eher formale Betrachtung gezeigt hat, dass es in unserer dreidimensionalen Welt nur Fermionen und Bosonen geben kann, wollen wir uns der Frage zuwenden, ob es eine experimentell zugängliche Eigenschaft gibt, an der man schon an einem einzigen Teilchen erkennen kann, ob es sich um ein Fermion oder ein Boson handelt. Dies ist in der Tat der Fall: Fermionen haben einen halbzahligen Spin, während der Spin von Bosonen immer ganzzahlig ist. Der Spin kann als Drehimpuls verstanden werden, wie wir ihn beispielsweise von einem sich um seine Achse drehenden Ball kennen. Allerdings weist der Spin als Quanteneigenschaft ein paar Besonderheiten auf.

So besitzen Elektronen einen Spin, obwohl sie nach allem, was wir wissen, punktförmig sind und sich daher nicht um sich selbst drehen können. Zudem kann der Spin nur halb- oder ganzzahlige Vielfache des Planck'schen Wirkungsquants betragen, wobei man üblicherweise verkürzt von einem halb- oder ganzzahligen Spin spricht. Für ein klassisches Objekt wie den angesprochenen, sich drehenden Ball dagegen kann der Drehimpuls beliebige Werte annehmen, indem man seine Drehgeschwindigkeit entsprechend einstellt. Eine solche Einstellung ist beim Spin nicht möglich, da es sich um eine feste Eigenschaft des betreffenden Teilchens handelt, genauso wie seine Masse oder seine Ladung. Man spricht daher auch gerne von einem Eigendrehimpuls.

Bei geladenen Elementarteilchen wie dem Elektron oder dem Proton, aber auch bei dem aus geladenen Quarks bestehenden, aber elektrisch neutralen Neutron, geht der Spin mit einem magnetischen Moment einher. Dieses kann man sich wie einen Elementarmagneten vorstellen, der sich relativ zu einem Magnetfeld in einer von mehreren, von der Größe des Spins abhängigen Anzahl von Richtungen einstellen kann. Damit wird der Spin in diesen Fällen experimentell zugänglich.

Auch wenn wir bei unseren Betrachtungen zunächst in erster Linie an Elementarteilchen gedacht haben, lassen sich diese Ideen auch auf zusammengesetzte Quantenobjekte, zum Beispiel Atomkerne, übertragen. Zur Illustration betrachten wir den einfachsten zusammengesetzten Atomkern, den des Heliumatoms. Es gibt zwei stabile Isotope des Heliums. Weitaus am häufigsten ist das Isotop, das aus zwei Protonen und zwei Neutronen besteht, das Helium-4. Da sowohl Protonen als auch Neutronen einen halbzahligen Spin tragen, ist der Spin des Helium-4 ganzzahlig. Es handelt sich damit um ein Boson. Das seltenere Isotop, Helium-3, besitzt ein Neutron weniger und ist damit ein Fermion. Dieser Unterschied macht sich in den unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften von Helium-3 und Helium-4 bei tiefen Temperaturen bemerkbar.

6 Fermionen und Bosonen besetzen Quantenzustände verschieden

Um besser zu verstehen, was für fundamentale Auswirkungen die Existenz von Fermionen und Bosonen und damit die Ununterscheidbarkeit der Bausteine der Materie zur Folge haben, müssen wir uns das unterschiedliche Verhalten von unterscheidbaren Teilchen einerseits und Fermionen sowie Bosonen andererseits ansehen. Um die Diskussion möglichst einfach zu halten, betrachten wir zwei Teilchen und verteilen sie auf zwei Quantenzustände. Wir können uns dabei auch vorstellen, dass wir zwei Murmeln auf zwei Schachteln verteilen, wobei wir es aber auch mit Quantenmurmeln zu tun haben, die sich wie Fermionen oder wie Bosonen verhalten.

Abb. 3 zeigt, wie unterschiedlich sich die drei verschiedenen Teilchenarten verhalten. Beginnen wir mit zwei unterscheidbaren Teilchen, also Objekten, wie wir sie aus unserem Alltag gewohnt sind. Um die Unterscheidbarkeit zu verdeutlichen, verwenden wir unterschiedlich gefärbte Punkte. Die waagrechten Linien deuten die beiden Zustände an, auf die wir die Teilchen verteilen können. Da wir jedes der beiden Teilchen beliebig einem der beiden

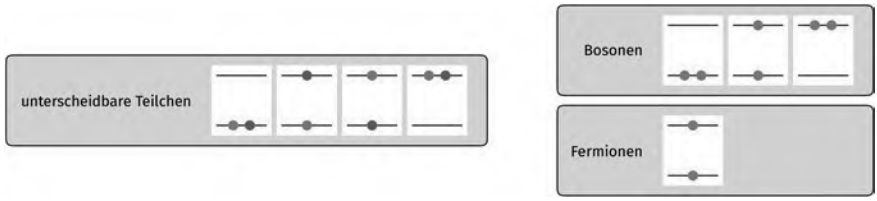

Abb. 3 Besetzungsmöglichkeiten für zwei Zustände in der klassischen Physik (links) und der Quantenphysik (rechts) für Bosonen und Fermionen.

Zustände zuordnen können, ergeben sich insgesamt die vier dargestellten Möglichkeiten.

Rechts in der Abb. 3 sind die Besetzungsmöglichkeiten für ununterscheidbare Teilchen dargestellt. Die zweite und dritte Möglichkeit für unterscheidbare Teilchen lassen sich nun nicht mehr unterscheiden, und so erhalten wir für Bosonen nur noch drei verschiedene Möglichkeiten, zwei Bosonen auf zwei Zustände zu verteilen.

Für Fermionen reduziert sich die Zahl der Möglichkeiten weiter. Von unseren Überlegungen zum Verhalten ununterscheidbarer Teilchen an einem halbdurchlässigen Spiegel wissen wir, dass sich Fermionen wie Einzelgänger verhalten. Dies hat zur Folge, dass wir in jeden der beiden Zustände höchstens ein Fermion setzen können. Damit bleibt uns von ursprünglich vier denkbaren Möglichkeiten eine einzige übrig. Das nach dem Physiker Wolfgang Pauli benannte *Pauli-Prinzip* besagt, dass ein Quantenzustand höchstens von einem Fermion besetzt werden kann. Eine der Konsequenzen hiervon wollen wir uns nun ansehen.

7 Von den ununterscheidbaren Elektronen zu chemischen Elementen

Schon lange vor der Entwicklung der Quantenphysik, die erst ein Verständnis des Aufbaus von Atomen ermöglichte, wurde versucht, die bekannten chemischen Elemente in einem Schema sinnvoll anzuordnen. Diese Bemühungen gipfelten in einer Publikation von Dmitri Mendelejew aus dem Jahre 1869, in der er sein Periodensystem der Elemente vorstellte. Die ersten drei Perioden sind in einer modernen Anordnung oben in Abb. 4 dargestellt. Die untereinander angeordneten Elemente gehören jeweils zu einer Gruppe. Die kleine Lücke zwischen der zweiten und dritten Gruppe soll andeuten, dass bei den schwereren, hier nicht dargestellten Elementen

weitere Gruppen in dieser Lücke eingefügt werden. Für unsere Zwecke genügt jedoch die Beschränkung auf drei Perioden.

Für das chemische Verhalten der Atome sind die negativ geladenen Elektronen relevant, die an den positiv geladenen Atomkern gebunden sind und sich in bestimmten Quantenzuständen befinden können. Diese Zustände sind, wie schon in Abb. 3, im unteren Teil der Abb. 4 durch die waagrechten Striche dargestellt. Rechts ist die räumliche Struktur der zugehörigen Elektronenverteilung angedeutet. Dabei unterscheiden wir hier zwischen den kugelsymmetrischen s-Zuständen und den p-Zuständen, die eine Ebene besitzen, in der das Elektron nie anzutreffen ist.

Von unten nach oben nimmt die Energie der Zustände zu, wobei die Darstellung hier nicht maßstabsgetreu, sondern lediglich schematisch ist. Farblich angedeutet sind die drei Schalen, die mit den Zahlen 1 bis 3 durchnummeriert sind. In höheren Schalen befindet sich das Elektron weiter vom Atomkern entfernt als in den niedrigeren Schalen.

Im so genannten Grundzustand befinden sich die Elektronen in einem energetisch möglichst niedrigen Zustand. Hier ist es nun entscheidend, ob es sich bei Elektronen um Fermionen oder Bosonen handelt. Wären Elektronen Bosonen, würden sie einfach das niedrigste Energieniveau, den 1s-Zustand, bevölkern. Wir wissen aber bereits, dass Elektronen Fermionen sind und für sie das Pauli-Prinzip gilt, nach dem jeder Zustand höchstens von einem Fermion besetzt werden kann. Allerdings müssen wir noch berücksichtigen, dass Elektronen einen Spin tragen, der zwei verschiedene Einstellungen zulässt, die als unterschiedliche Zustände zählen. Wir können also in jedem Energiezustand bis zu zwei Elektronen mit unterschied-

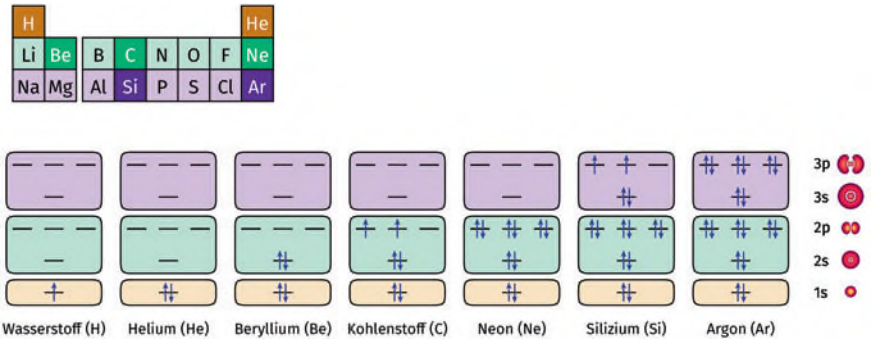

Abb. 4 Ausschnitt aus dem Periodensystem der Elemente und Besetzung der Energieniveaus für ausgewählte Elemente.

licher Spineinstellung, die wir durch nach oben und unten gerichtete Pfeile andeuten, unterbringen.

Nun können wir beginnen, die Zustände mit Elektronen zu besetzen. Das Wasserstoffatom besitzt ein einziges Elektron, das wir in den 1s-Zustand setzen, um eine möglichst geringe Energie zu erzielen. Gehen wir in der ersten Periode nach rechts zum Helium, so müssen wir zwei Elektronen verteilen. Wegen des Spins kommen beide im 1s-Zustand unter. Da es keine 1p-Zustände gibt, ist die erste Schale damit gefüllt. Dies hat zur Konsequenz, dass das Heliumatom keine chemische Bindung eingehen kann.

Gehen wir im Periodensystem eine Zeile weiter, so haben wir vier weitere Orbitale zur Verfügung, die wir mit insgesamt acht Elektronen besetzen können. In dieser Periode finden wir also acht verschiedene chemische Elemente, vom Lithium bis zum Neon. Bewegt man sich entlang dieser Periode, so wird zunächst der 2s-Zustand sukzessive gefüllt, der beim Beryllium die maximal erlaubten zwei Elektronen enthält. Danach werden die 2p-Zustände aufgefüllt. Das für die belebte Natur so wichtige Kohlenstoffatom besitzt dort zwei Elektronen. Füllt man die zweite Schale vollständig auf, kommt man bei einem weiteren Edelgas, dem Neon an, das wie das über ihm stehende Helium keine chemische Bindung eingeht.

Unter dem Kohlenstoff steht in der dritten Periode das Silizium, das in seiner äußersten, der dritten Schale die gleiche Elektronenkonfiguration aufweist wie der Kohlenstoff in der zweiten Schale. Daraus resultiert eine chemische Verwandtschaft und es wird gelegentlich spekuliert, dass Leben auch auf der Basis von Silizium möglich sein könnte. Allerdings bedeutet die übereinstimmende Elektronenkonfiguration in der äußersten Schale nicht, dass das chemische Verhalten vollkommen gleich ist. Der Weg durch die dritte Periode des Periodensystems endet mit einem weiteren Edelgas, Argon, bei dem auch die dritte Schale vollständig aufgefüllt ist.

Von der beschriebenen Elektronenstruktur der Atome und den damit verbundenen Konsequenzen für deren chemisches Verhalten bliebe nichts übrig, wenn Elektronen wie Alltagsgegenstände unterscheidbar wären oder es sich bei ihnen um Bosonen handeln würde. Dann würden sich im Grundzustand sämtliche Elektronen im 1s-Zustand befinden, und es gäbe nicht die vielfältige Chemie, die die Welt, in der wir leben, prägt. Insbesondere wäre auf Kohlenstoffverbindungen basierendes Leben unmöglich, da organische Moleküle nicht existieren würden. Wir sollten also froh sein, dass Elektronen nicht unterschieden werden können.

8 Ausblick

Die Ununterscheidbarkeit ist eine wesentliche Eigenschaft von Quantenteilchen mit erheblichen Konsequenzen für unsere Alltagswelt, wie wir gerade an der Existenz chemischer Elemente als vielleicht besonders prägnantem Beispiel gesehen haben. Es wird nicht überraschen, dass der Unterschied zwischen Fermionen und Bosonen, der sich bei der Besetzung von Quantenzuständen durch diese Teilchen äußert, Einfluss auf das Verhalten verschiedenster Quantensysteme hat. Dabei kann es sich durchaus auch um sehr große Objekte handeln wie zum Beispiel Neutronensterne. Diese eher exotischen Objekte im Kosmos bestehen aus Neutronen, also Fermionen, die aufgrund des Pauli-Prinzips den Neutronenstern stabilisieren.

Die Aufteilung der Elementarteilchen in Fermionen und Bosonen, die wir kurz angesprochen hatten, scheint für eine Art Zwei-Klassen-Gesellschaft zu sorgen. Allerdings werden schon seit etwa 50 Jahren supersymmetrische Modelle der Elementarteilchenphysik diskutiert, in denen jedes fermionische Elementarteilchen einen bosonischen Partner und umgekehrt besitzt. Ob diese supersymmetrischen Partner tatsächlich existieren, ist derzeit jedoch noch eine offene Frage und so haben Fermionen und Bosonen nicht nur Auswirkungen in unserer Alltagswelt, sondern sorgen weiterhin für spannende physikalische Fragestellungen.

Weiterführende Literatur

Gert-Ludwig Ingold und Astrid Lambrecht: *Die 101 wichtigsten Fragen – Moderne Physik,* C. H. Beck, München (2008).

Holger Lyre: Quanten-Identität und Ununterscheidbarkeit. In: Cord Friebe, Meinard Kuhlmann, Holger Lyre, Paul M. Näger, Oliver Passon und Manfred Stöckler, *Philosophie der Quantenphysik*, zweite Aufl., Springer Spektrum, Berlin (2018).