

Quantenphysik: Die Identität der Quanten

Die Quantenphysik vermag grundlegende Naturvorgänge äußerst erfolgreich zu beschreiben, aber ihre Interpretation bleibt seit Max Planck umstritten. Eine neue Deutung führt das seltsame Verhalten der Quantenobjekte darauf zurück, dass gleichartige Teilchen im Mikrokosmos vollkommen identisch und ununterscheidbar sind.

Peter Pesic

Die Quantenmechanik bildet das Herzstück der modernen Physik. Sie ist der Ariadnefaden im Labyrinth der Atome und Kerne; erst sie erklärt die Stabilität der Materie. Dennoch bleibt die Quantentheorie rätselhaft, denn ihre Grundannahmen erscheinen verwirrend: Alles ist Welle und auch Teilchen; überall herrschen Ungewissheit und Wahrscheinlichkeit. Noch nach hundert Jahren sind Experten und Laien gleichermaßen ratlos. Albert Einstein nannte die Quantentheorie »spukhaft« und versuchte sie zu überwinden. Paul Dirac glaubte, sie sei mit Worten überhaupt nicht angemessen zu erklären, und darum seien die Physiker so stark auf die abstrakte mathematische Struktur der Theorie angewiesen. Doch selbst ein herausragender Physiker wie Freeman Dyson meinte, wer mühsam gelernt habe, die formale Sprache der Quantentheorie zu beherrschen, könne höchstens sagen: »Ich verstehe jetzt, dass es nichts zu verstehen gibt«. Auch Richard Feynman, ein Meister im Finden einfacher Bilder für komplexe Ideen, gab sich geschlagen. Nachdem er in seinen berühmten Physikvorlesungen die Grundprinzipien der Quantentheorie zusammengefasst hatte, bekannte er: »Man könnte noch immer fragen: ›Wie funktioniert es? Welche Maschinerie steckt hinter dem Gesetz?‹ Niemand hat irgendeine Maschinerie hinter dem Gesetz gefunden. Niemand kann mehr ›erklären‹ als das, was wir eben ›erklärt‹ haben. Niemand wird Ihnen eine tiefere Darstellung der Situation liefern. Wir haben keine Ahnung von einem grundlegenden Mechanismus, aus dem diese Resultate abgeleitet werden könnten.«

An der Schwierigkeit dieser Theorie, die trotz ihres bizarren Charakters jeden experimentellen Test glänzend bestanden hat, führt kein Weg vorbei. Doch vielleicht gibt es einen Blickwinkel, unter dem ihre Seltsamkeit klarer sichtbar wird. Seit zwanzig Jahren untersuche ich die Bedeutung von Identität und Individualität für die Geschichte und die Grundlagen der Quantenmechanik. Dabei bin ich zu folgendem Schluss gekommen: Im Mittelpunkt der Quantentheorie steht die radikale Annahme, dass Elementarteilchen keine Individualität besitzen. Ihre Identitäten verschmelzen – und dadurch kommt die seltsame Welt der Quantenphänomene zu Stande.

Gewiss stellt diese Quanten-Identität seit langem einen allgemein akzeptierten Aspekt der Theorie dar, der wesentlich zum Verständnis der chemischen Bindung und der Struktur der Elemente beigetragen hat. Doch sah man darin die Folge anderer, abstrakterer Annahmen. Ich möchte die Geschichte andersherum erzählen: Bei mir steht die Quanten-Identität ganz am Anfang. In Fachartikeln habe ich für diesen Standpunkt mathematische Argumente angeführt; hier werde ich einige allgemeinere Betrachtungen anstellen, um meine Behauptung zu stützen, dass die Seltsamkeit der Quantenmechanik sich am einfachsten als eine Konsequenz der Quanten-Identität erklären lässt.

Um eine neue Sicht der Quantentheorie zu gewinnen, geht man am besten vom Begriff der Individualität aus, denn er ist für Philosophie und Physik ein besonders schwieriges Problem, seit die alten Griechen erstmals über Atome spekulierten. Für Aristoteles war die Individualität grundlegend – ob für Personen, Objekte oder Atome. Dennoch hielt er den Begriff Individualität für weniger wichtig als die Mitgliedschaft in einer Spezies oder Gattung.

Spätere Philosophen betrachteten das Wesen der Individualität in völlig neuem Licht. Im 17. Jahrhundert argumentierte Gottfried Wilhelm Leibniz, zwei Blätter könnten niemals exakt gleich sein, selbst wenn sie von demselben Baum stammten. Nach seiner Überzeugung spiegelt diese Einzigartigkeit nicht irgendeine eigenständige Individualität des Blattes an sich wider, sondern die unterschiedliche Geschichte und den unterschiedlichen Standort jedes Blattes im gesamten Universum. Leibniz meinte, ein vernünftiger Gott würde identische Individuen nicht zulassen, denn wie könnte er eines von ihnen hier und das andere dort platzieren, wenn er sie nicht zu unterscheiden vermöchte?

Leibniz war darum überzeugt, individuelle Einzigartigkeit widerspreche der Existenz anonymer Atome. Sein Zeitgenosse Isaac Newton befürwortete zwar die Realität von Atomen, behandelte aber jedes als unterscheidbar. Für Newton ist der Unterschied zwischen der Individualität zweier Partikel so ausgeprägt, dass sie unmöglich zu verwechseln sind. Doch bei der Anwendung der Newton'schen Mechanik auf die Materie trat ein radikal anderer Aspekt der Realität zu Tage: die Kräfte zwischen Objekten. Schon Newton selbst mutmaßte, dass die Schwerkraft über riesige Entfernungen nicht direkt wirkt, sondern durch »die Vermittlung von etwas anderem, das nicht materiell ist«. Fast zwei Jahrhunderte später folgte Michael Faraday einem ähnlichen Gedankengang, als er Elektrizität und Magnetismus mittels so genannter Kraftlinien oder Felder beschrieb. Für ihn stand nicht mehr die Materie im Mittelpunkt der Physik; Kraftlinien bildeten die eigentliche Realität.

Faraday erweiterte diesen Begriff auf die unsichtbaren Felder, die dem sichtbaren Licht – das er als Wellen in den Kraftlinien interpretierte – zu Grunde liegen. Er war zutiefst überrascht, dass diese Vibrationen nicht an einem Ort verharren: Ruhende Ladungen oder Magnete sind von stationären Feldern umgeben, aber wenn diese Quellen sich beschleunigt bewegen, lösen ihre Felder sich ab und pflanzen sich als Lichtwellen durch den grenzenlosen Raum fort. Kurz zuvor hatte Thomas Young mit seinen berühmten Brechungsexperimenten gezeigt, dass Licht in der Tat aus Wellen besteht. Das Licht in Youngs Apparat konnte nur deshalb Interferenzen zeigen, weil Wellen nicht materielle Objekte sind, sondern Prozesse; darum sind sie austauschbar und können räumlich und zeitlich zusammenfallen.

Das königliche Eichsiegel Wie Faraday erkannte, rufen Atome – ob ruhend oder bewegt – Felder hervor, die voneinander völlig ununterscheidbar sind. Diese Ansicht hat Konsequenzen für die Individualität der Atome selbst, obwohl Faraday bei all seiner Radikalität noch nicht so weit gehen wollte. Wenn Ladung und Materie eigentlich nur als umgangssprachliche Bezeichnungen für die Dichte von an sich ununterscheidbaren Feldlinien existieren, dann sind materielle Partikel in Wirklichkeit ebenso wenig unterscheidbar. Faradays Vision einer Welt von Feldern macht die Individualität undurchdringlicher Teilchen fragwürdig. Mit Faradays Arbeit begann das bis heute andauernde Wechselspiel zwischen Feldern und Teilchen. Einige Jahrzehnte zuvor hatte die Entwicklung der Atomtheorie zu einem entscheidenden Fortschritt geführt: Die Atome büßten ihre Individualität ein. Schon im Jahre 1800 hatte John Dalton den Schluss gezogen, dass alle Atome des Wasserstoffs in ihren beobachteten Eigenschaften exakt übereinstimmen müssen; andernfalls wäre der Wasserstoff kein eigenes Element, sondern eine Ansammlung unterschiedlicher »Wasserstoffe«.

Auch Faradays jüngerer Kollege James Clerk Maxwell argumentierte, alle Moleküle seien absolut identisch, »ob sie auf der Erde, in der Sonne oder den Fixsternen gefunden werden«. Maxwell konnte diese Folgerung aus der Tatsache ziehen, dass auf der Erde dieselben Spektralmuster beobachtet wurden wie im Licht weit entfernter Sterne. Wie die Spektren dieser Sterne zudem zeigten, hatten die Atome schon zu der weit zurückliegenden Zeit, als sie das Licht emittierten, dieselben Eigenschaften. Maxwell schloss daraus, jedes Atom sei mit einem »königlichen

Eichsiegel« versehen, und dieser Einheitsstempel verleihe ihm den »wesentlichen Charakter eines Manufaktur-Artikels«.

Spätere Experimente zeigten andere Formen solcher Eichstempel, beginnend mit der Entdeckung der Kathodenstrahlen; diese leuchtenden elektrischen Entladungen in evakuierten Glasgefäßen waren Vorboten heutiger Fernsehrohren. Im Jahre 1897 erzeugte J. J. Thomson erstmals gekrümmte Kathodenstrahlen, indem er sie durch gekreuzte elektrische und magnetische Felder führte. Wie er herausfand, hatte ihr Verhältnis von Ladung zu Masse einen einzigen universellen Wert; das war leicht dadurch zu erklären, dass Kathodenstrahlen eigentlich Ströme von Teilchen sind – die wir heute Elektronen nennen –, deren jedes dieselbe Ladung und Masse hat. Zwei Jahre später fand er auch identische Werte für die Partikel, die das Licht beim so genannten photoelektrischen Effekt aus einer Metallplatte freisetzt. Thomson nannte beide »Korpuskeln«, um ihren Teilchencharakter zu betonen.

Thomsons Experimente mit Elektronen stützten zwar die Vorstellung von unteilbaren Einheiten der Materie, befassten sich aber nicht direkt mit ihrer Individualität. Doch diese Frage tauchte ungefähr zur selben Zeit in einem anderen Gebiet der Physik auf, der Thermodynamik. Im Prinzip verfolgt die Newton'sche Dynamik die Bahn jedes einzelnen Teilchens. Um die riesige Anzahl von Atomen in gewöhnlichen Objekten zu behandeln, entwickelten Ludwig Boltzmann und andere Physiker im 19. Jahrhundert die statistische Mechanik. Dennoch hielt Boltzmann daran fest, dass die Kontinuität und Unterscheidbarkeit jeder Teilchenbahn »das erste fundamentale Prinzip« der Mechanik sei. Hier geriet die wesentliche Gleichheit der Atome in Konflikt mit dem individuellen Determinismus der Newton'schen Mechanik.

Plancks »Akt der Verzweiflung«

Im Rückblick erkennt man, dass die Krise im Jahre 1900 ausbrach, als Max Plancks Arbeit die Bedeutung der Individualität stillschweigend veränderte. Planck versuchte, die reversiblen Prinzipien der Newton'schen Physik mit den irreversiblen Gesetzen der Thermodynamik zu versöhnen. Zu diesem Zweck betrachtete er einen Ofen mit einer kleinen Öffnung, durch die Strahlung austreten kann. Frühere Physiker hatten gezeigt, dass ein vollkommen schwarzer Ofen sämtliche Strahlungsfrequenzen auf eine Weise emittiert und absorbiert, die von seinem Material unabhängig ist. Die Farbe des emittierten Lichts – der so genannten Schwarzkörperstrahlung – hängt nur von der Temperatur des Ofens ab. Planck wollte die fundamentalen physikalischen Zusammenhänge entdecken, die das Spektrum dieser Strahlung bestimmen.

Zur selben Zeit maßen die Experimentalphysiker das Spektrum der Schwarzkörperstrahlung mit immer größerer Genauigkeit – inklusive der infraroten und ultravioletten Komponenten –, und Planck hoffte mit seiner Theorie ihre Beobachtungen zu erklären. Später bezeichnete er seinen Lösungsweg als einen »Akt der Verzweiflung«. Denn damit seine Theorie mit den Experimenten übereinstimmte, musste er postulieren, dass der Energieaustausch im Ofen stets in diskreten Portionen stattfindet, die Max Planck Quanten nannte.

Planck war beunruhigt, weil diese Annahme für ihn keinen Sinn ergab. Um sie zu klären, konstruierte er eine neue Ableitung seines Resultats, welche die zentrale Rolle des Atoms betonte. Obwohl die Atomtheorie am Ende des 19. Jahrhunderts weitgehend akzeptiert war, sahen bedeutende Wissenschaftler wie Wilhelm Ostwald und Ernst Mach in den Atomen nur theoretische Konstrukte und bestritten ihre physikalische Realität.

Anfangs hatte Planck selbst zu diesen Zweiflern gehört, wandelte sich aber wegen seiner Auffassung der Wahrscheinlichkeit zum überzeugten Atomisten. Er argumentierte, ohne diskrete, abzählbare Objekte könne es keine Statistik geben; auch die Wahrscheinlichkeitsverteilung der

Augenzahl mehrerer Würfel hänge schließlich von den diskreten Zuständen ab, die durch die Seiten eines einzelnen Würfels gegeben seien. Auch die mathematische Physik beruhte nach Plancks Überzeugung auf der relativen Wahrscheinlichkeit von Zuständen, die deshalb nur diskret und somit atomar sein konnten.

Diesen Ansatz erweiterte Planck nun derart, dass er nicht nur gasförmige Ansammlungen von Atomen erfasste, sondern auch das Licht selbst. Strahlung, dessen war Planck sich sicher, gehorcht, obgleich sie immateriell ist, den Gesetzen der Thermodynamik. Diese Gesetze hielt er für so allgemein, dass er sich keine Ausnahme davon vorstellen konnte. Also musste eine Grundlage für das Zählen der unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten von Strahlungszuständen existieren; es musste sozusagen »Atome« des Lichts geben – und das wiederum konnte nur diskrete Zustände der Strahlungsenergie bedeuten, also Quanten. Entscheidend war Folgendes: Um die verschiedenen Arten zu zählen, auf welche die Energie sich auf die Lichtquanten verteilen konnte, musste Planck Letztere als absolut ununterscheidbar behandeln; andernfalls erhielt er Resultate, die dem Experiment widersprachen.

An diesem Punkt kommentierte Planck seine seltsame Zählmethode nicht weiter – vielleicht, weil ihn die Notwendigkeit, diskrete Zustände einzuführen, noch viel mehr beunruhigte, das heißt der »verzweifelte« Schritt, Quantensprünge zuzulassen, deren Maß nicht null war, sondern eine endliche Zahl h . Sogar noch 1909 präsentierte er die ungewöhnliche Zählweise, offenbar ohne ihre Seltsamkeit zu erkennen, als wäre sie eine Eigentümlichkeit seines theoretischen Ansatzes und nicht des Lichtes selbst. Planck war andererseits so aufrichtig, dass er zu seiner Behauptung stand, obwohl er sich gleichzeitig alle Mühe gab, ihre Paradoxie zu überwinden.

Plancks ungewöhnliche Zählweise der Lichtquanten war nur der Anfang. Radikaler Individualitätsverlust wurde schließlich zum zentralen Bestandteil der voll entwickelten Quantentheorie. Bezüglich der Quantenpartikel betonte Erwin Schrödinger 1952, man dürfe sich nicht einmal vorstellen, irgendeines von ihnen sei quasi mit einem roten Punkt markiert, sodass man es später als dasselbe erkennen könne. Somit kann man nicht einmal theoretisch ein einzelnes Neutron herauspicken, es markieren und sein Schicksal verfolgen, wie sowohl Newton als auch Einstein angenommen hatten. Diese verblüffende Kombination von vollkommener Gleichheit mit völliger Ununterscheidbarkeit bildet das Wesen der Quanten-Identität.

Keine menschliche Sprache hat ein passendes Wort für diese Bedingung. Bezeichnet man sie als »Mangel an Individualität«, so unterstellt man fälschlich, Quantenpartikel sollten eigentlich Individualität besitzen, aber sie fehle ihnen. Stattdessen habe ich ein Wort geprägt, das diese Bedingung positiv ausdrücken soll: Identikalität. Es bedeutet, dass die Mitglieder einer Spezies nur als Beispiele für diese Spezies Identität besitzen – ohne irgendwelche Eigenschaften, die ein Individuum von einem anderen unterscheiden. Identikalität umfasst totale Ununterscheidbarkeit und völlige Gleichheit aller beobachtbaren Eigenschaften, wann und wo immer sie gemessen werden.

Diese Bedingung ist so seltsam, dass manche Philosophen Quantenteilchen lieber behandeln, als hätten sie eine Individualität, die dem Beobachter irgendwie verborgen bleibt. Dieses Verborgensein ist zwar logisch möglich, kommt mir aber unnötig kompliziert vor. Ich vertrete den einfacheren Standpunkt, dass eine total versteckte Individualität gar nicht vorhanden ist. Ich überlasse es dem Leser zu beurteilen, welcher Standpunkt letztlich zutrifft oder ob ein Urteil überhaupt möglich ist.

Über die Individualität hinaus

Ein praktisches Beispiel für Identikalität beruht auf Experimenten, die Johann Summhammer und Hermann Rauch an der Technischen Universität Wien und Anton Zeilinger am Massachusetts Institute of Technology durchgeführt haben. In einem evakuierten Gefäß wird ein Neutronenstrahl,

der aus einem Kernreaktor stammt, in zwei Strahlen aufgespalten; beide Strahlen werden durch Siliziumkristalle geführt und darin so abgelenkt, dass sie sich dahinter wieder vereinigen. Der Querschnitt der Neutronenstrahlen ist nicht größer als eine kleine Briefmarke. Da die Kristalle mehrere Zentimeter voneinander entfernt liegen, sind die beiden Pfade deutlich getrennt. Dennoch ist es unmöglich, identische Neutronen anhand des Weges, den sie nehmen, zu unterscheiden. Das charakteristische Muster, das sie erzeugen, wenn die Strahlen sich vereinigen, entsteht durch wellenförmige Interferenz zwischen den Neutronen. Darin kommt die Unmöglichkeit zum Ausdruck, ihre Individualität zu bestimmen – obwohl die Neutronen den Detektor auf der anderen Seite stets als ganze und ungeteilte Partikel erreichen. Dieses seltsame Gemisch von Phänomenen wird üblicherweise als Welle-Teilchen-Dualismus bezeichnet (Spektrum der Wissenschaft 2/1995, S. 50).

Statt zu versuchen, uns ein Neutron irgendwie als zugleich wellen- und teilchenförmig vorzustellen, können wir einfach einsehen, dass diese beiden Aspekte die Identikalität des Neutrons widerspiegeln. Um diese Idee zu prüfen, kann man das Experiment ein wenig abändern. Jedes Neutron besitzt eine bestimmte innere Quantität namens Spin. Es ist möglich, eine Quelle zu benutzen, die polarisierte Neutronen erzeugt – das heißt, ihre Spins sind alle parallel ausgerichtet und zeigen beispielsweise aufwärts. Eine solche Quelle produziert dasselbe Resultat wie zuvor, denn die Neutronen sind nach wie vor ununterscheidbar. Doch wenn man einen speziellen Magneten einführt, der den Spin der Neutronen nur längs eines Pfades kippt, so werden die Neutronen der beiden Pfade unterscheidbar – und das Interferenzmuster verschwindet!

Diese für Quanteninterferenz charakteristischen Effekte entstehen auch mit größeren Partikeln: mit Atomen, mit kleinen Molekülen und sogar mit Fullerenen, bei denen sechzig Kohlenstoffatome fußballähnliche Kügelchen bilden. In solchen Experimenten kann die Quelle so schwach sein, dass sich zu jedem Zeitpunkt nur ein einziges Teilchen im Apparat aufhält. Darum geht es nicht in erster Linie um die Ununterscheidbarkeit von zwei Teilchen, sondern vielmehr um die fortgesetzte Identität jedes Teilchens mit sich selbst im Laufe der Zeit und auf seinem Weg durch den Raum. Somit bewahrt sogar ein einzelnes Neutron seine Identikalität.

Dieser Begriff hat durchaus seine Tücken. Wir können uns auf ein Neutron im Raum A beziehen und auf ein anderes im Raum B – in unterschiedlichen Gebäuden oder gar in verschiedenen Galaxien. Doch dabei unterscheiden wir streng genommen nicht die Neutronen, sondern nur die Räume, in denen sie sich aufhalten. Falls die eingeschlossenen Partikel jemals entkommen, können sie nie mehr voneinander unterschieden werden.

Das trifft sogar auf die erstaunlichen Bilder zu, die Hans Dehmelt 1980 an der Universität von Washington in Seattle von einem einzelnen Atom herstellte; das Atom wurde in einer winzigen Falle fixiert und von anderen Atomen ferngehalten. Man kann hier also tatsächlich ein individuelles Atom anhand der von ihm emittierten Lichtblitze sehen. Sie sind ein direkter Ausdruck der Quantensprünge, die entstehen, wenn das Atom Licht absorbiert, angeregt wird und seine überschüssige Energie abstrahlt. Ein solches Atom kann monatelang gefangen bleiben; eines wurde den Experimentatoren so vertraut, dass sie ihm den Namen Astrid gaben. Dennoch bleibt es selbst nach noch so langer Gefangenschaft wild und ohne Individualität: Wenn man Astrid freilässt, ist es unmöglich, sie wieder einzufangen. Der Name ist menschlich, das Atom aber bleibt namenlos.

Dehmelts Kunststück baute auf früheren Versuchen auf, bei denen ein einzelnes Elektron bis zu zehn Monate lang gefangen blieb. Doch letzten Endes ging es immer verloren und wurde zu einem gesichtslosen Elektron in der Menge. Diese Anonymität lässt sich auch nicht verhindern, indem man die Falle immer kleiner macht. Je kleiner die Zelle, desto größer die erforderlichen Kräfte: Das Elektron bewegt sich immer regelloser und heftiger, als wehre es sich dagegen, fixiert zu werden. Dieser Anthropomorphismus ist zwar nicht korrekt – ein Elektron hat natürlich weder Gefühle noch

Willen –, aber er liefert eine lebhafte und plastische Metapher für das so genannte Heisenberg'sche Unbestimmtheitsprinzip: Je mehr man ein Teilchen räumlich lokalisiert, desto unbestimmter wird sein Impuls. Die Zelle besteht aus Elektronen, die mit dem Gefangenen identisch sind; wenn die Zelle immer enger wird, wächst die Wahrscheinlichkeit, dass der Gefangene mit einem der Wärter die Plätze tauscht.

Einsteins Protest

Genau diese Möglichkeit des Austausches verhindert, dass man ein Atom oder ein Neutron behandeln kann, als wäre es säuberlich getrennt von seinesgleichen. Wie eineiige Zwillinge führen Quantenteilchen den Beobachter durch Platztauschen an der Nase herum. Dieser Vergleich hinkt freilich, denn menschliche Zwillinge sind bei weitem nicht so identisch wie Atome.

Die Verwechslung der Identität führt zu verblüffenden Quanteneffekten – insbesondere zu den »spukhaften« Korrelationen, die Einstein so unannehmbar fand, als wären sie der ärgerliche Schabernack boshafter Zwillinge. Er bestand darauf, dass die Physik eine vollständige Beschreibung des individuellen Systems geben müsse, damit wir der Bahn individueller Atome folgen und ihre Aktivitäten vorhersagen können. Doch diese Fähigkeit würde die Identifikation jedes Teilchens als eines einzigartigen Individuums erfordern – und das ist unmöglich.

Einsteins Einwände folgten aus seinem Glauben, dass die physikalischen Gesetze letztlich die Bahn jedes individuellen Partikels vollständig determinieren, genau wie Newton sich das vorgestellt hatte: Jedes Teilchen hat seine beobachtbare Position und Geschwindigkeit, die einer mathematischen Gleichung gehorchen. Aber die Identikalität zwingt uns, über die Newton'sche Beschreibung identifizierbarer Teilchen hinauszugehen. So entstand ein völlig neuartiges Bild der Quantentheorie, das Max Born 1928 formulierte.

Um die Individualität zu verbergen, unterteilte Born die Welt in zwei Schichten: eine äußere Schicht positiver Zahlen, welche die Wahrscheinlichkeit angeben, ein Teilchen irgendwo in Raum und Zeit zu beobachten, und eine innere Schicht, die der Beobachtung nicht zugänglich ist, aber die beobachtbaren Wahrscheinlichkeiten steuert. Auf dieser inneren Ebene gibt es Amplituden in Form komplexer Zahlen – das heißt, sie enthalten die Quadratwurzeln negativer Zahlen. Sie sind nicht beobachtbar, denn unsere Messgeräte registrieren nur reelle Zahlwerte. Für diese Amplituden gelten strenge Regeln wie die Schrödinger- oder die Dirac-Gleichung, die ihre zeitliche Entwicklung ohne Unbestimmtheit determinieren.

Doch die Wahrscheinlichkeiten, die man beobachtet, erweisen sich als das Absolutquadrat dieser Amplituden – und diese Wahrscheinlichkeiten entwickeln sich nicht auf deterministische Weise. Zum Beispiel legt die Wahrscheinlichkeit, ein Neutron an einem bestimmten Ort und zu einer bestimmten Zeit zu finden, nicht eindeutig die Wahrscheinlichkeit dafür fest, es später an einem anderen Ort und zu einem anderen Zeitpunkt anzutreffen, denn das würde eine Identifikation des Teilchens bedeuten. Darum existiert keine Gleichung, die jedes Auftreten des Neutrons mit Sicherheit vorhersagt, sondern nur eine Gleichung, die angibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit man das Neutron hier oder da antreffen würde.

Die Mathematik liefert zwar nur eine abstrakte Darstellung der physikalischen Wirklichkeit, bietet aber einen tiefen Einblick in das Wesen dieser Wirklichkeit und vertreibt weit verbreitete Missverständnisse. In der Quantentheorie geht es letztlich gar nicht um Unbestimmtheit und Indeterminismus. Auf der inneren Ebene ist die Quantentheorie ebenso bestimmt und determiniert wie die Theorien von Newton und Maxwell. Die beobachtete Unbestimmtheit entsteht erst, wenn wir diese innerlich determinierten Dinge von außen zu betrachten versuchen.

Die Bestimmtheit der Quanten

Wir selbst sind aus einer immensen Anzahl von Elektronen und Quarks – den Bausteinen unserer Protonen und Neutronen – zusammengesetzt, die extrem komplexe Zustände bilden können. Erst diese Zustände machen aus, was wir sind – das heißt unsere individuelle Eigenart –, und sie charakterisieren all unsere Versuche, die Welt zu betrachten. Wenn wir ein einzelnes Atom untersuchen wollen, gebrauchen wir vergleichsweise riesige Apparate, die an unsere enorme Größe und unsere groben Sinne angepasst sind, und wir beobachten nur Wahrscheinlichkeitsereignisse. Dennoch vermag unser Geist mit Hilfe der mathematischen Gleichungen zu einer tieferen Ebene der Gewissheit vorzudringen.

Freilich ist ein solches Doppelbild der Welt beunruhigend. Nach Einsteins Überzeugung gab die Quantenmechanik das zentrale Anliegen der Physik preis: vollständiges Verstehen beobachtbarer Daten durch mathematische Theorie. Er weigerte sich, Borns Ansicht zu teilen: Was beobachtbar ist, ist nicht gewiss, und was gewiss ist, ist nicht beobachtbar.

Einstein erkannte die Wirksamkeit und Gültigkeit der Quantentheorie durchaus an, aber er hielt sie für unvollständig. Seine Vorstellung von Verstehen erforderte, über diese scheinbaren Grenzen des Wissens hinauszugehen. Er glaubte, jedes Neutron habe wirklich seine eigene Individualität, über die wir uns zwar im Unklaren sein mögen – aber Gott kenne sie ganz und gar.

Doch kein Beobachter, nicht einmal Gott, vermag ein Neutron vom anderen zu unterscheiden. Kein Wunder, dass Einstein diese Idee widerstrebte, denn sie ist wirklich seltsam. Aber wie schon Francis Bacon vor fast 300 Jahren schrieb, gibt es keine auffallende Schönheit, die in ihrem Übermaß nicht etwas Seltsames hat. Vielleicht gilt das auch umgekehrt: Die Seltsamkeit der Identikalität könnte uns lehren, ihre Schönheit zu erkennen.

Literaturhinweise

Identity and the Foundations of Quantum Theory. Von Peter Pesic in: Foundations of Physics Letters, Bd. 13, S. 55 (2000).

The Principle of Identicality and the Foundations of Quantum Theory. I. The Gibbs Paradox. II. The Role of Identicality in the Formation of Quantum Theory. Von Peter Pesic in: American Journal of Physics, Bd. 59, S. 971 (1991).

Quantum Physics and the Identity of Indiscernibles. Von S. French und M. Redhead in: British Journal for the Philosophy of Science, Bd. 39, S. 233 (1988).

Individuality: An Essay on the Foundations of Metaphysics. Von J. J. E. Gracia. State University of New York Press, Albany 1988. Direct Observation of Fermion Spin Superposition by Neutron Interferometry. Von J. Summhammer et al. in: Physical Review A, Bd. 27, S. 2523 (1983).

[Anmelden](#)

Falls Sie schon Kunde bei uns sind, melden Sie sich bitte hier mit Ihrer E-Mail-Adresse und Ihrem Passwort an.

E-Mail

Passwort

angemeldet bleiben

[Passwort vergessen?](#)

Wichtige Info für Abonnenten

Sie beziehen ein Digital- oder Kombiabonnement? Wir haben unser Anmeldeverfahren geändert.

Falls Sie in den vergangenen Wochen als registrierter Kunde ein Einzelprodukt in unserem neuen Spektrum.de-Shop erworben haben, können Sie diese Anmeldedaten verwenden.

Sie sind Abonnent und noch kein registrierter Kunde? Bitte geben Sie Ihre E-Mail-Adresse ein und fordern mit Hilfe der "Passwort vergessen"-Funktion ein Passwort an.

- Magazine
- Archiv
- [Shop/Abo](#)
- [Newsletter](#)
- [Lexika](#)
- Info & Service



- [Astronomie](#)
- [Biologie](#)
- [Chemie](#)
- [Erde/Umwelt](#)
- [IT/Tech](#)
- [Kultur](#)
- [Mathematik](#)
- [Medizin](#)
- [Physik](#)
- [Psychologie/Hirnforschung](#)

[Startseite](#) »

Quantenphysik: Die Identität der Quanten

Magazin | 01.01.2003 | [Teilen](#)

Quantenphysik: Die Identität der Quanten

Die Quantenphysik vermag grundlegende Naturvorgänge äußerst erfolgreich zu beschreiben, aber ihre Interpretation bleibt seit Max Planck umstritten. Eine neue Deutung führt das seltsame Verhalten der Quantenobjekte darauf zurück, dass gleichartige Teilchen im Mikrokosmos vollkommen identisch und ununterscheidbar sind.

Peter Pesie

Die Quantenmechanik bildet das Herzstück der modernen Physik. Sie ist der Ariadnefaden im Labyrinth der Atome und Kerne; erst sie erklärt die Stabilität der Materie. Dennoch bleibt die Quantentheorie rätselhaft, denn ihre Grundannahmen erscheinen verwirrend: Alles ist Welle und auch Teilchen; überall herrschen Ungewissheit und Wahrscheinlichkeit. Noch nach hundert Jahren sind Experten und Laien gleichermaßen ratlos. Albert Einstein nannte die Quantentheorie »spukhaft« und versuchte sie zu überwinden. Paul Dirac glaubte, sie sei mit Worten überhaupt nicht angemessen zu erklären, und darum seien die Physiker so stark auf die abstrakte mathematische Struktur der Theorie angewiesen. Doch selbst ein herausragender Physiker wie Freeman Dyson meinte, wer mühsam gelernt habe, die formale Sprache der Quantentheorie zu beherrschen, könne höchstens sagen: »Ich verstehe jetzt, dass es nichts zu verstehen gibt«. Auch Richard Feynman, ein Meister im Finden einfacher Bilder für komplexe Ideen, gab sich geschlagen. Nachdem er in seinen berühmten Physikvorlesungen die Grundprinzipien der Quantentheorie zusammengefasst hatte, bekannte er: »Man könnte noch immer fragen: ›Wie funktioniert es? Welche Maschinerie steckt hinter dem Gesetz?‹ Niemand hat irgendeine Maschinerie hinter dem Gesetz gefunden. Niemand kann mehr ›erklären‹ als das, was wir eben ›erklärt‹ haben. Niemand wird Ihnen eine tiefere Darstellung der Situation liefern. Wir haben keine Ahnung von einem grundlegenden Mechanismus, aus dem diese Resultate abgeleitet werden könnten.«

An der Schwierigkeit dieser Theorie, die trotz ihres bizarren Charakters jeden experimentellen Test glänzend bestanden hat, führt kein Weg vorbei. Doch vielleicht gibt es einen Blickwinkel, unter dem ihre Seltsamkeit klarer sichtbar wird. Seit zwanzig Jahren untersuche ich die Bedeutung von Identität und Individualität für die Geschichte und die Grundlagen der Quantenmechanik. Dabei bin ich zu folgendem Schluss gekommen: Im Mittelpunkt der Quantentheorie steht die radikale Annahme, dass Elementarteilchen keine Individualität besitzen. Ihre Identitäten verschmelzen – und dadurch kommt die seltsame Welt der Quantenphänomene zu Stande.

Gewiss stellt diese Quanten-Identität seit langem einen allgemein akzeptierten Aspekt der Theorie dar, der wesentlich zum Verständnis der chemischen Bindung und der Struktur der Elemente beigetragen hat. Doch sah man darin die Folge anderer, abstrakterer Annahmen. Ich möchte die Geschichte andersherum erzählen: Bei mir steht die Quanten-Identität ganz am Anfang. In Fachartikeln habe ich für diesen Standpunkt mathematische Argumente angeführt; hier werde ich einige allgemeinere Betrachtungen anstellen, um meine Behauptung zu stützen, dass die Seltsamkeit der Quantenmechanik sich am einfachsten als eine Konsequenz der Quanten-Identität erklären lässt.

Um eine neue Sicht der Quantentheorie zu gewinnen, geht man am besten vom Begriff der Individualität aus, denn er ist für Philosophie und Physik ein besonders schwieriges Problem, seit die alten Griechen erstmals über Atome spekulierten. Für Aristoteles war die Individualität grundlegend – ob für Personen, Objekte oder Atome. Dennoch hielt er den Begriff Individualität für weniger wichtig als die Mitgliedschaft in einer Spezies oder Gattung.

Spätere Philosophen betrachteten das Wesen der Individualität in völlig neuem Licht. Im 17.

Jahrhundert argumentierte Gottfried Wilhelm Leibniz, zwei Blätter könnten niemals exakt gleich sein, selbst wenn sie von demselben Baum stammten. Nach seiner Überzeugung spiegelt diese Einzigartigkeit nicht irgendeine eigenständige Individualität des Blattes an sich wider, sondern die unterschiedliche Geschichte und den unterschiedlichen Standort jedes Blattes im gesamten Universum. Leibniz meinte, ein vernünftiger Gott würde identische Individuen nicht zulassen, denn wie könnte er eines von ihnen hier und das andere dort platzieren, wenn er sie nicht zu unterscheiden vermöchte?

Leibniz war darum überzeugt, individuelle Einzigartigkeit widerspreche der Existenz anonymer Atome. Sein Zeitgenosse Isaac Newton befürwortete zwar die Realität von Atomen, behandelte aber jedes als unterscheidbar. Für Newton ist der Unterschied zwischen der Individualität zweier Partikel so ausgeprägt, dass sie unmöglich zu verwechseln sind. Doch bei der Anwendung der Newton'schen Mechanik auf die Materie trat ein radikal anderer Aspekt der Realität zu Tage: die Kräfte zwischen Objekten. Schon Newton selbst mutmaßte, dass die Schwerkraft über riesige Entfernungen nicht direkt wirkt, sondern durch »die Vermittlung von etwas anderem, das nicht materiell ist«. Fast zwei Jahrhunderte später folgte Michael Faraday einem ähnlichen Gedankengang, als er Elektrizität und Magnetismus mittels so genannter Kraftlinien oder Felder beschrieb. Für ihn stand nicht mehr die Materie im Mittelpunkt der Physik; Kraftlinien bildeten die eigentliche Realität.

Faraday erweiterte diesen Begriff auf die unsichtbaren Felder, die dem sichtbaren Licht – das er als Wellen in den Kraftlinien interpretierte – zu Grunde liegen. Er war zutiefst überrascht, dass diese Vibrationen nicht an einem Ort verharren: Ruhende Ladungen oder Magnete sind von stationären Feldern umgeben, aber wenn diese Quellen sich beschleunigt bewegen, lösen ihre Felder sich ab und pflanzen sich als Lichtwellen durch den grenzenlosen Raum fort. Kurz zuvor hatte Thomas Young mit seinen berühmten Brechungsexperimenten gezeigt, dass Licht in der Tat aus Wellen besteht. Das Licht in Youngs Apparat konnte nur deshalb Interferenzen zeigen, weil Wellen nicht materielle Objekte sind, sondern Prozesse; darum sind sie austauschbar und können räumlich und zeitlich zusammenfallen.

Das königliche Eichsiegel Wie Faraday erkannte, rufen Atome – ob ruhend oder bewegt – Felder hervor, die voneinander völlig ununterscheidbar sind. Diese Ansicht hat Konsequenzen für die Individualität der Atome selbst, obwohl Faraday bei all seiner Radikalität noch nicht so weit gehen wollte. Wenn Ladung und Materie eigentlich nur als umgangssprachliche Bezeichnungen für die Dichte von an sich ununterscheidbaren Feldlinien existieren, dann sind materielle Partikel in Wirklichkeit ebenso wenig unterscheidbar. Faradays Vision einer Welt von Feldern macht die Individualität undurchdringlicher Teilchen fragwürdig. Mit Faradays Arbeit begann das bis heute andauernde Wechselspiel zwischen Feldern und Teilchen. Einige Jahrzehnte zuvor hatte die Entwicklung der Atomtheorie zu einem entscheidenden Fortschritt geführt: Die Atome büßten ihre Individualität ein. Schon im Jahre 1800 hatte John Dalton den Schluss gezogen, dass alle Atome des Wasserstoffs in ihren beobachteten Eigenschaften exakt übereinstimmen müssen; andernfalls wäre der Wasserstoff kein eigenes Element, sondern eine Ansammlung unterschiedlicher »Wasserstoffe«.

Auch Faradays jüngerer Kollege James Clerk Maxwell argumentierte, alle Moleküle seien absolut identisch, »ob sie auf der Erde, in der Sonne oder den Fixsternen gefunden werden«. Maxwell konnte diese Folgerung aus der Tatsache ziehen, dass auf der Erde dieselben Spektralmuster beobachtet wurden wie im Licht weit entfernter Sterne. Wie die Spektren dieser Sterne zudem zeigten, hatten die Atome schon zu der weit zurückliegenden Zeit, als sie das Licht emittierten, dieselben Eigenschaften. Maxwell schloss daraus, jedes Atom sei mit einem »königlichen Eichsiegel« versehen, und dieser Einheitsstempel verleihe ihm den »wesentlichen Charakter eines Manufaktur-Artikels«.

Spätere Experimente zeigten andere Formen solcher Eichstempel, beginnend mit der Entdeckung der Kathodenstrahlen; diese leuchtenden elektrischen Entladungen in evakuierten Glasgefäßen waren Vorboten heutiger Fernsehrohren. Im Jahre 1897 erzeugte J. J. Thomson erstmals gekrümmte Kathodenstrahlen, indem er sie durch gekreuzte elektrische und magnetische Felder führte. Wie er herausfand, hatte ihr Verhältnis von Ladung zu Masse einen einzigen universellen Wert; das war leicht dadurch zu erklären, dass Kathodenstrahlen eigentlich Ströme von Teilchen sind – die wir heute Elektronen nennen –, deren jedes dieselbe Ladung und Masse hat. Zwei Jahre später fand er auch identische Werte für die Partikel, die das Licht beim so genannten photoelektrischen Effekt aus einer Metallplatte freisetzt. Thomson nannte beide »Korpuskeln«, um ihren Teilchencharakter zu betonen.

Thomsons Experimente mit Elektronen stützten zwar die Vorstellung von unteilbaren Einheiten der Materie, befassten sich aber nicht direkt mit ihrer Individualität. Doch diese Frage tauchte ungefähr zur selben Zeit in einem anderen Gebiet der Physik auf, der Thermodynamik. Im Prinzip verfolgt die Newton'sche Dynamik die Bahn jedes einzelnen Teilchens. Um die riesige Anzahl von Atomen in gewöhnlichen Objekten zu behandeln, entwickelten Ludwig Boltzmann und andere Physiker im 19. Jahrhundert die statistische Mechanik. Dennoch hielt Boltzmann daran fest, dass die Kontinuität und Unterscheidbarkeit jeder Teilchenbahn »das erste fundamentale Prinzip« der Mechanik sei. Hier geriet die wesentliche Gleichheit der Atome in Konflikt mit dem individuellen Determinismus der Newton'schen Mechanik.

Plancks »Akt der Verzweiflung«

Im Rückblick erkennt man, dass die Krise im Jahre 1900 ausbrach, als Max Plancks Arbeit die Bedeutung der Individualität stillschweigend veränderte. Planck versuchte, die reversiblen Prinzipien der Newton'schen Physik mit den irreversiblen Gesetzen der Thermodynamik zu versöhnen. Zu diesem Zweck betrachtete er einen Ofen mit einer kleinen Öffnung, durch die Strahlung austreten kann. Frühere Physiker hatten gezeigt, dass ein vollkommen schwarzer Ofen sämtliche Strahlungsfrequenzen auf eine Weise emittiert und absorbiert, die von seinem Material unabhängig ist. Die Farbe des emittierten Lichts – der so genannten Schwarzkörperstrahlung – hängt nur von der Temperatur des Ofens ab. Planck wollte die fundamentalen physikalischen Zusammenhänge entdecken, die das Spektrum dieser Strahlung bestimmen.

Zur selben Zeit maßen die Experimentalphysiker das Spektrum der Schwarzkörperstrahlung mit immer größerer Genauigkeit – inklusive der infraroten und ultravioletten Komponenten –, und Planck hoffte mit seiner Theorie ihre Beobachtungen zu erklären. Später bezeichnete er seinen Lösungsweg als einen »Akt der Verzweiflung«. Denn damit seine Theorie mit den Experimenten übereinstimmte, musste er postulieren, dass der Energieaustausch im Ofen stets in diskreten Portionen stattfindet, die Max Planck Quanten nannte.

Planck war beunruhigt, weil diese Annahme für ihn keinen Sinn ergab. Um sie zu klären, konstruierte er eine neue Ableitung seines Resultats, welche die zentrale Rolle des Atoms betonte. Obwohl die Atomtheorie am Ende des 19. Jahrhunderts weitgehend akzeptiert war, sahen bedeutende Wissenschaftler wie Wilhelm Ostwald und Ernst Mach in den Atomen nur theoretische Konstrukte und bestritten ihre physikalische Realität.

Anfangs hatte Planck selbst zu diesen Zweiflern gehört, wandelte sich aber wegen seiner Auffassung der Wahrscheinlichkeit zum überzeugten Atomisten. Er argumentierte, ohne diskrete, abzählbare Objekte könne es keine Statistik geben; auch die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Augenzahl mehrerer Würfel hänge schließlich von den diskreten Zuständen ab, die durch die Seiten eines einzelnen Würfels gegeben seien. Auch die mathematische Physik beruhte nach Plancks

Überzeugung auf der relativen Wahrscheinlichkeit von Zuständen, die deshalb nur diskret und somit atomar sein konnten.

Diesen Ansatz erweiterte Planck nun derart, dass er nicht nur gasförmige Ansammlungen von Atomen erfasste, sondern auch das Licht selbst. Strahlung, dessen war Planck sich sicher, gehorcht, obgleich sie immateriell ist, den Gesetzen der Thermodynamik. Diese Gesetze hielt er für so allgemein, dass er sich keine Ausnahme davon vorstellen konnte. Also musste eine Grundlage für das Zählen der unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten von Strahlungszuständen existieren; es musste sozusagen »Atome« des Lichts geben – und das wiederum konnte nur diskrete Zustände der Strahlungsenergie bedeuten, also Quanten. Entscheidend war Folgendes: Um die verschiedenen Arten zu zählen, auf welche die Energie sich auf die Lichtquanten verteilen konnte, musste Planck Letztere als absolut ununterscheidbar behandeln; andernfalls erhielt er Resultate, die dem Experiment widersprachen.

An diesem Punkt kommentierte Planck seine seltsame Zählmethode nicht weiter – vielleicht, weil ihn die Notwendigkeit, diskrete Zustände einzuführen, noch viel mehr beunruhigte, das heißt der »verzweifelte« Schritt, Quantensprünge zuzulassen, deren Maß nicht null war, sondern eine endliche Zahl h . Sogar noch 1909 präsentierte er die ungewöhnliche Zählweise, offenbar ohne ihre Seltsamkeit zu erkennen, als wäre sie eine Eigentümlichkeit seines theoretischen Ansatzes und nicht des Lichtes selbst. Planck war andererseits so aufrichtig, dass er zu seiner Behauptung stand, obwohl er sich gleichzeitig alle Mühe gab, ihre Paradoxie zu überwinden.

Plancks ungewöhnliche Zählweise der Lichtquanten war nur der Anfang. Radikaler Individualitätsverlust wurde schließlich zum zentralen Bestandteil der voll entwickelten Quantentheorie. Bezüglich der Quantenpartikel betonte Erwin Schrödinger 1952, man dürfe sich nicht einmal vorstellen, irgendeines von ihnen sei quasi mit einem roten Punkt markiert, sodass man es später als dasselbe erkennen könne. Somit kann man nicht einmal theoretisch ein einzelnes Neutron herauspicken, es markieren und sein Schicksal verfolgen, wie sowohl Newton als auch Einstein angenommen hatten. Diese verblüffende Kombination von vollkommener Gleichheit mit völliger Ununterscheidbarkeit bildet das Wesen der Quanten-Identität.

Keine menschliche Sprache hat ein passendes Wort für diese Bedingung. Bezeichnet man sie als »Mangel an Individualität«, so unterstellt man fälschlich, Quantenpartikel sollten eigentlich Individualität besitzen, aber sie fehle ihnen. Stattdessen habe ich ein Wort geprägt, das diese Bedingung positiv ausdrücken soll: Identikalität. Es bedeutet, dass die Mitglieder einer Spezies nur als Beispiele für diese Spezies Identität besitzen – ohne irgendwelche Eigenschaften, die ein Individuum von einem anderen unterscheiden. Identikalität umfasst totale Ununterscheidbarkeit und völlige Gleichheit aller beobachtbaren Eigenschaften, wann und wo immer sie gemessen werden.

Diese Bedingung ist so seltsam, dass manche Philosophen Quantenteilchen lieber behandeln, als hätten sie eine Individualität, die dem Beobachter irgendwie verborgen bleibt. Dieses Verborgensein ist zwar logisch möglich, kommt mir aber unnötig kompliziert vor. Ich vertrete den einfacheren Standpunkt, dass eine total versteckte Individualität gar nicht vorhanden ist. Ich überlasse es dem Leser zu beurteilen, welcher Standpunkt letztlich zutrifft oder ob ein Urteil überhaupt möglich ist.

Über die Individualität hinaus

Ein praktisches Beispiel für Identikalität beruht auf Experimenten, die Johann Summhammer und Hermann Rauch an der Technischen Universität Wien und Anton Zeilinger am Massachusetts Institute of Technology durchgeführt haben. In einem evakuierten Gefäß wird ein Neutronenstrahl, der aus einem Kernreaktor stammt, in zwei Strahlen aufgespalten; beide Strahlen werden durch Siliziumkristalle geführt und darin so abgelenkt, dass sie sich dahinter wieder vereinigen. Der

Querschnitt der Neutronenstrahlen ist nicht größer als eine kleine Briefmarke. Da die Kristalle mehrere Zentimeter voneinander entfernt liegen, sind die beiden Pfade deutlich getrennt. Dennoch ist es unmöglich, identische Neutronen anhand des Weges, den sie nehmen, zu unterscheiden. Das charakteristische Muster, das sie erzeugen, wenn die Strahlen sich vereinigen, entsteht durch wellenförmige Interferenz zwischen den Neutronen. Darin kommt die Unmöglichkeit zum Ausdruck, ihre Individualität zu bestimmen – obwohl die Neutronen den Detektor auf der anderen Seite stets als ganze und ungeteilte Partikel erreichen. Dieses seltsame Gemisch von Phänomenen wird üblicherweise als Welle-Teilchen-Dualismus bezeichnet (Spektrum der Wissenschaft 2/1995, S. 50).

Statt zu versuchen, uns ein Neutron irgendwie als zugleich wellen- und teilchenförmig vorzustellen, können wir einfach einsehen, dass diese beiden Aspekte die Identikalität des Neutrons widerspiegeln. Um diese Idee zu prüfen, kann man das Experiment ein wenig abändern. Jedes Neutron besitzt eine bestimmte innere Quantität namens Spin. Es ist möglich, eine Quelle zu benutzen, die polarisierte Neutronen erzeugt – das heißt, ihre Spins sind alle parallel ausgerichtet und zeigen beispielsweise aufwärts. Eine solche Quelle produziert dasselbe Resultat wie zuvor, denn die Neutronen sind nach wie vor ununterscheidbar. Doch wenn man einen speziellen Magneten einführt, der den Spin der Neutronen nur längs eines Pfades kippt, so werden die Neutronen der beiden Pfade unterscheidbar – und das Interferenzmuster verschwindet!

Diese für Quanteninterferenz charakteristischen Effekte entstehen auch mit größeren Partikeln: mit Atomen, mit kleinen Molekülen und sogar mit Fullerenen, bei denen sechzig Kohlenstoffatome fußballähnliche Kügelchen bilden. In solchen Experimenten kann die Quelle so schwach sein, dass sich zu jedem Zeitpunkt nur ein einziges Teilchen im Apparat aufhält. Darum geht es nicht in erster Linie um die Ununterscheidbarkeit von zwei Teilchen, sondern vielmehr um die fortgesetzte Identität jedes Teilchens mit sich selbst im Laufe der Zeit und auf seinem Weg durch den Raum. Somit bewahrt sogar ein einzelnes Neutron seine Identikalität.

Dieser Begriff hat durchaus seine Tücken. Wir können uns auf ein Neutron im Raum A beziehen und auf ein anderes im Raum B – in unterschiedlichen Gebäuden oder gar in verschiedenen Galaxien. Doch dabei unterscheiden wir streng genommen nicht die Neutronen, sondern nur die Räume, in denen sie sich aufhalten. Falls die eingeschlossenen Partikel jemals entkommen, können sie nie mehr voneinander unterschieden werden.

Das trifft sogar auf die erstaunlichen Bilder zu, die Hans Dehmelt 1980 an der Universität von Washington in Seattle von einem einzelnen Atom herstellte; das Atom wurde in einer winzigen Falle fixiert und von anderen Atomen ferngehalten. Man kann hier also tatsächlich ein individuelles Atom anhand der von ihm emittierten Lichtblitze sehen. Sie sind ein direkter Ausdruck der Quantensprünge, die entstehen, wenn das Atom Licht absorbiert, angeregt wird und seine überschüssige Energie abstrahlt. Ein solches Atom kann monatelang gefangen bleiben; eines wurde den Experimentatoren so vertraut, dass sie ihm den Namen Astrid gaben. Dennoch bleibt es selbst nach noch so langer Gefangenschaft wild und ohne Individualität: Wenn man Astrid freilässt, ist es unmöglich, sie wieder einzufangen. Der Name ist menschlich, das Atom aber bleibt namenlos.

Dehmelts Kunststück baute auf früheren Versuchen auf, bei denen ein einzelnes Elektron bis zu zehn Monate lang gefangen blieb. Doch letzten Endes ging es immer verloren und wurde zu einem gesichtslosen Elektron in der Menge. Diese Anonymität lässt sich auch nicht verhindern, indem man die Falle immer kleiner macht. Je kleiner die Zelle, desto größer die erforderlichen Kräfte: Das Elektron bewegt sich immer regelloser und heftiger, als wehre es sich dagegen, fixiert zu werden. Dieser Anthropomorphismus ist zwar nicht korrekt – ein Elektron hat natürlich weder Gefühle noch Willen –, aber er liefert eine lebhaft und plastische Metapher für das so genannte Heisenberg'sche Unbestimmtheitsprinzip: Je mehr man ein Teilchen räumlich lokalisiert, desto unbestimmter wird

sein Impuls. Die Zelle besteht aus Elektronen, die mit dem Gefangenen identisch sind; wenn die Zelle immer enger wird, wächst die Wahrscheinlichkeit, dass der Gefangene mit einem der Wärter die Plätze tauscht.

Einsteins Protest

Genau diese Möglichkeit des Austausches verhindert, dass man ein Atom oder ein Neutron behandeln kann, als wäre es säuberlich getrennt von seinesgleichen. Wie eineiige Zwillinge führen Quantenteilchen den Beobachter durch Platztauschen an der Nase herum. Dieser Vergleich hinkt freilich, denn menschliche Zwillinge sind bei weitem nicht so identisch wie Atome.

Die Verwechslung der Identität führt zu verblüffenden Quanteneffekten – insbesondere zu den »spukhaften« Korrelationen, die Einstein so unannehmbar fand, als wären sie der ärgerliche Schabernack boshafter Zwillinge. Er bestand darauf, dass die Physik eine vollständige Beschreibung des individuellen Systems geben müsse, damit wir der Bahn individueller Atome folgen und ihre Aktivitäten vorhersagen können. Doch diese Fähigkeit würde die Identifikation jedes Teilchens als eines einzigartigen Individuums erfordern – und das ist unmöglich.

Einsteins Einwände folgten aus seinem Glauben, dass die physikalischen Gesetze letztlich die Bahn jedes individuellen Partikels vollständig determinieren, genau wie Newton sich das vorgestellt hatte: Jedes Teilchen hat seine beobachtbare Position und Geschwindigkeit, die einer mathematischen Gleichung gehorchen. Aber die Identikalität zwingt uns, über die Newton'sche Beschreibung identifizierbarer Teilchen hinauszugehen. So entstand ein völlig neuartiges Bild der Quantentheorie, das Max Born 1928 formulierte.

Um die Individualität zu verbergen, unterteilte Born die Welt in zwei Schichten: eine äußere Schicht positiver Zahlen, welche die Wahrscheinlichkeit angeben, ein Teilchen irgendwo in Raum und Zeit zu beobachten, und eine innere Schicht, die der Beobachtung nicht zugänglich ist, aber die beobachtbaren Wahrscheinlichkeiten steuert. Auf dieser inneren Ebene gibt es Amplituden in Form komplexer Zahlen – das heißt, sie enthalten die Quadratwurzeln negativer Zahlen. Sie sind nicht beobachtbar, denn unsere Messgeräte registrieren nur reelle Zahlwerte. Für diese Amplituden gelten strenge Regeln wie die Schrödinger- oder die Dirac-Gleichung, die ihre zeitliche Entwicklung ohne Unbestimmtheit determinieren.

Doch die Wahrscheinlichkeiten, die man beobachtet, erweisen sich als das Absolutquadrat dieser Amplituden – und diese Wahrscheinlichkeiten entwickeln sich nicht auf deterministische Weise. Zum Beispiel legt die Wahrscheinlichkeit, ein Neutron an einem bestimmten Ort und zu einer bestimmten Zeit zu finden, nicht eindeutig die Wahrscheinlichkeit dafür fest, es später an einem anderen Ort und zu einem anderen Zeitpunkt anzutreffen, denn das würde eine Identifikation des Teilchens bedeuten. Darum existiert keine Gleichung, die jedes Auftreten des Neutrons mit Sicherheit vorhersagt, sondern nur eine Gleichung, die angibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit man das Neutron hier oder da antreffen würde.

Die Mathematik liefert zwar nur eine abstrakte Darstellung der physikalischen Wirklichkeit, bietet aber einen tiefen Einblick in das Wesen dieser Wirklichkeit und vertreibt weit verbreitete Missverständnisse. In der Quantentheorie geht es letztlich gar nicht um Unbestimmtheit und Indeterminismus. Auf der inneren Ebene ist die Quantentheorie ebenso bestimmt und determiniert wie die Theorien von Newton und Maxwell. Die beobachtete Unbestimmtheit entsteht erst, wenn wir diese innerlich determinierten Dinge von außen zu betrachten versuchen.

Die Bestimmtheit der Quanten

Wir selbst sind aus einer immensen Anzahl von Elektronen und Quarks – den Bausteinen unserer Protonen und Neutronen – zusammengesetzt, die extrem komplexe Zustände bilden können. Erst diese Zustände machen aus, was wir sind – das heißt unsere individuelle Eigenart –, und sie charakterisieren all unsere Versuche, die Welt zu betrachten. Wenn wir ein einzelnes Atom untersuchen wollen, gebrauchen wir vergleichsweise riesige Apparate, die an unsere enorme Größe und unsere groben Sinne angepasst sind, und wir beobachten nur Wahrscheinlichkeitsereignisse. Dennoch vermag unser Geist mit Hilfe der mathematischen Gleichungen zu einer tieferen Ebene der Gewissheit vorzudringen.

Freilich ist ein solches Doppelbild der Welt beunruhigend. Nach Einsteins Überzeugung gab die Quantenmechanik das zentrale Anliegen der Physik preis: vollständiges Verstehen beobachtbarer Daten durch mathematische Theorie. Er weigerte sich, Borns Ansicht zu teilen: Was beobachtbar ist, ist nicht gewiss, und was gewiss ist, ist nicht beobachtbar.

Einstein erkannte die Wirksamkeit und Gültigkeit der Quantentheorie durchaus an, aber er hielt sie für unvollständig. Seine Vorstellung von Verstehen erforderte, über diese scheinbaren Grenzen des Wissens hinauszugehen. Er glaubte, jedes Neutron habe wirklich seine eigene Individualität, über die wir uns zwar im Unklaren sein mögen – aber Gott kenne sie ganz und gar.

Doch kein Beobachter, nicht einmal Gott, vermag ein Neutron vom anderen zu unterscheiden. Kein Wunder, dass Einstein diese Idee widerstrebte, denn sie ist wirklich seltsam. Aber wie schon Francis Bacon vor fast 300 Jahren schrieb, gibt es keine auffallende Schönheit, die in ihrem Übermaß nicht etwas Seltsames hat. Vielleicht gilt das auch umgekehrt: Die Seltsamkeit der Identikalität könnte uns lehren, ihre Schönheit zu erkennen.

Literaturhinweise

Identity and the Foundations of Quantum Theory. Von Peter Pesic in: Foundations of Physics Letters, Bd. 13, S. 55 (2000).

The Principle of Identicality and the Foundations of Quantum Theory. I. The Gibbs Paradox. II. The Role of Identicality in the Formation of Quantum Theory. Von Peter Pesic in: American Journal of Physics, Bd. 59, S. 971 (1991).

Quantum Physics and the Identity of Indiscernibles. Von S. French und M. Redhead in: British Journal for the Philosophy of Science, Bd. 39, S. 233 (1988).

Individuality: An Essay on the Foundations of Metaphysics. Von J. J. E. Gracia. State University of New York Press, Albany 1988. Direct Observation of Fermion Spin Superposition by Neutron Interferometry. Von J. Summhammer et al. in: Physical Review A, Bd. 27, S. 2523 (1983).

In Kürze

- Die Quantentheorie weicht in zentralen Punkten von der klassischen Physik Newtons und Einsteins ab:
- Welle-Teilchen-Dualismus: Quantenobjekte lassen sich nur vollständig beschreiben, wenn sie bald als Welle, bald als Teilchen betrachtet werden.
- Nichtlokalität: Zwei Quantenteilchen können über makroskopische Entfernungen hinweg

»verschränkt« sein und ein untrennbares Quantenobjekt bilden.

- Indeterminismus: Die Gesetze der Quantenphysik erlauben keine Vorhersage eindeutiger Messresultate, sondern treffen nur statistische Aussagen über beobachtbare Größen.

– All diese seltsamen Eigenschaften der Theorie lassen sich – so der Autor – auf die so genannte Quanten-Identität zurückführen: Teilchen derselben Art verfügen über keinerlei Individualität. Ob Lichtquanten, Neutronen oder Atome – sie sind jeweils absolut ununterscheidbar.

Aus: Spektrum der Wissenschaft 1 / 2003, Seite 56

© Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH