

25 Bizarre Quantenwelt: Abschied von der objektiven Realität?

Wenn wir über Quantenphysik sprechen, stehen für gewöhnlich ihre seltsamen Phänomene im Vordergrund: Die Rede ist von Unbestimmtheit und Zufall, spukhafter Fernwirkung und Quantenverschränkung — und Schrödingers Katze. Die moderne Quantenphysik scheint ein radikal neues Weltbild zu fordern. Doch eine einst vergessene Theorie erlebt eine Renaissance und kommt ohne Vagheit, Subjektivität und Unbestimmtheit aus.

Mit der Quantenmechanik wurde Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts ein neues Zeitalter der Physik eingeläutet. Sie ist die zurzeit beste und genaueste Theorie, welche physikalische Eigenschaften auf der mikroskopischen Grössenskala von Atomen und subatomaren Teilchen beschreibt. Und das mit einer atemberaubenden Präzision. So lassen sich beispielsweise manche theoretischen Vorhersagen zum Verhalten eines Elektrons mit einer Genauigkeit von eins zu einer Milliarde experimentell überprüfen. Die Theorie gilt heute als die fundamentalste Beschreibung unserer Welt. Entdeckungen in der modernen Physik und insbesondere der Quantenmechanik beeinflussen unser tägliches Leben immer stärker, ohne dass wir es merken. Zum Beispiel sind nahezu jeder moderne Computer und jedes Smartphone auf das Verständnis der Quantentheorie angewiesen.

Bizarre Phänomene aus der Quantenmechanik lassen uns jedoch nach wie vor im Dunkeln tappen. Die populärwissenschaftliche Beschreibung der Quantenphysik nahm zudem den Charakter einer unverständlichen und unzugänglichen Beschreibung der Welt an. Demnach würde uns die moderne Physik ein radikal neues Weltbild überstülpen. Haben wir uns also vom Weltbild einer objektiven Realität zu verabschieden? Neue (und alte vergessene) Ansätze erzählen eine andere Geschichte.

Die Quantentheorie entstand schrittweise um 1900 mit Max Planck's Theorie der Schwarzkörperstrahlung, welche nicht mit den Beobachtungen der klassischen Physik vereinbar war (Planck, 1900). Albert Einstein hat ausserdem während seines «Wunderjahrs» 1905 mit dem sogenannten photoelektrischen Effekt den Zusammenhang zwischen Licht und Frequenz hergestellt (Einstein, 1905).

Diese und noch weitere Puzzleteile wurden «die alte Quantenmechanik» genannt. Mitte der 1920er-Jahre wurde die Theorie von Niels Bohr, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Max Born und einigen anderen zur Quantenmechanik weiterentwickelt, die wir heute kennen (siehe zum Beispiel Born, 1978).

Quantentheorie und brüchige Weltanschauung

Allerdings hatte die neue Physik einige ungemütliche Konsequenzen: Der Beobachter im Experiment rückte plötzlich ins Rampenlicht, denn seine Eigenschaften sind gemäss der neuen Theorie für die Messung von physikalischen Phänomenen relevant. Und dann gibt es die berühmte Katze von Schrödinger, von der man behauptet, dass sie laut der Quantenphysik tot und lebendig gleichzeitig sein muss: Da die Theorie bestimmte Zustände in Überlagerung – der sogenannten Superposition – beschreibt, könnte auch ein makroskopisches System wie ein Tier aus einer Überlagerung von Leben und Tod bestehen. Die Theorie sagt eine *unüberwindliche Unbestimmtheit* voraus und bei fehlender Beobachtung scheinen Dinge nicht mehr zu existieren: Gibt es den Mond, wenn man nicht hinsieht?

Richard Feynman sagte einst: «Keiner versteht die Quantenmechanik» (Feynman, 1967). Und auch die internationale Zeitschrift «The Economist» schrieb 1989 von der Wunderlichkeit der Quanten: «*Es existieren keine <Dinge>. Objekte sind geisterhaft und haben keine eindeutigen Eigenschaften (wie Position oder Masse), bis sie gemessen werden. Bis dahin existieren die Eigenschaften in einem Dämmerzustand der <Überlagerung>.*» (frei übersetzt, The Economist, 1989) Aussagen wie diese klingen drastisch und kontraintuitiv. Es gibt wohl wenige Menschen die sich vorstellen können, was damit

gemeint sei. Offensichtlich gibt es ja «Dinge», und was bedeutet es, wenn verschiedene Eigenschaften «überlagert» gleichzeitig existieren? Dies wäre offenkundig ein logischer Widerspruch, denn *ein* Teilchen kann im Gegensatz zu einer Welle nur an *einem* Ort sein und nicht an mehreren gleichzeitig. Dass unsere Realität aber nicht unabhängig von der Beobachtung existiert, davon waren Bohr, Heisenberg, Born und jene Vertreter der so genannten Kopenhagen-Interpretation überzeugt (siehe zum Beispiel die geschichtliche Entwicklung in Bricmont, 2016).

Dem nordirischen Physiker John Stuart Bell stiess die Bedeutung des Beobachters in der Quantenwelt besonders auf: «*Was genau qualifiziert ein physikalisches System, diese Rolle des «Messers» zu spielen? [...] Und was ist mit den grossen Teilen des Universums, in denen es keine Beobachter gibt? [...] Wie kann eine physikalische Theorie, die die grundlegendste von allen ist, die sich mit Atomen und Elementarteilchen befasst und im Prinzip für das gesamte Universum gilt, für ihre Formulierung etwas so Kontingentes erfordern wie bestimmte Manipulationen («Messungen»), die in den letzten 100 Jahren von einigen Mitgliedern einer bestimmten Spezies, dem Homo sapiens, auf einem bestimmten Planeten irgendwo im Kosmos durchgeführt wurden?»* (frei übersetzt, Bell, 1993, p. 34).

Während die Kopenhagener Schule sich durch besagte Physiker zum Mainstream entwickelte, entstand jedoch fast gleichzeitig eine ganz andere Sichtweise. Max Born spielte 1926 mit dem Gedanken, dass die Zustände in der Quantenmechanik — also die Wellenfunktionen — als physikalisches Gesetz für die Bewegung von klassischen Teilchen dienen könnten (Born, 1926). Demnach existieren Teilchen, wie wir sie aus der klassischen Physik kennen, allerdings werden ihre Bahnen durch die neuen (nicht-klassischen) Gesetze der Quantenmechanik bestimmt. Heisenberg zeigte sich äusserst unbeeindruckt von dieser Idee (Heisenberg, 1955).

Bohm und das Antidot: Teilchen existieren doch

Kurz nach Erwin Schrödingers Beschreibung seiner Wellengleichung formulierte Louis de Broglie im Jahr 1927 einen neuen Ansatz: Er griff Borns Idee auf und war imstande, die Phänomene der Quantenmechanik durch die Bewegung von lokalisierten Teilchen zu erklären (de Broglie, 1928). Auf der Solvay-Konferenz in Brüssel präsentierte de Broglie seine Theorie, wandte sich allerdings als Reaktion auf einen Einwand durch

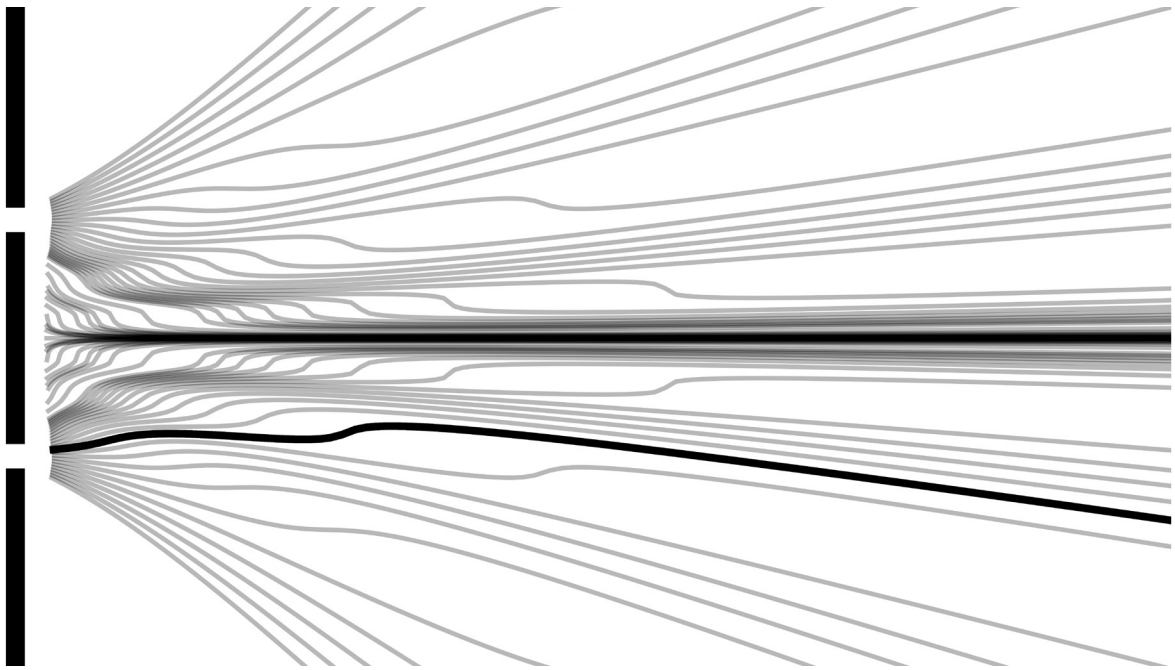
Wolfgang Pauli wieder von ihr ab (Solvay, 1927). Born und de Broglie wurden indes Verfechter der Kopenhagener Deutung.

Es dauerte bis 1952 bis David Bohm die von de Broglie entwickelte Theorie wiederentdeckte und zur De-Broglie-Bohm-Theorie weiterentwickelte (Bohm, 1952). Es war abermals John Stuart Bell, der ihre weitreichende Bedeutung betonte: «*Doch im Jahr 1952 sah ich das Unmögliche vollbracht. Es war in den Arbeiten von David Bohm. Bohm zeigte explizit, wie Parameter in die nicht-relativistische Wellenmechanik eingeführt werden können, mit deren Hilfe die indetermunistische Beschreibung in eine deterministische umgewandelt werden kann. Noch wichtiger ist meiner Meinung nach, dass die Subjektivität der orthodoxen Version, der notwendige Bezug auf den «Beobachter», beseitigt werden konnte. [...] Warum wird das Bild der Pilotwelle [s. dazu Grafik, Anm. des Autors] in Lehrbüchern ignoriert? Sollte es nicht gelehrt werden, nicht als einziger Weg, sondern als Gegenmittel gegen die vorherrschende Selbstgefälligkeit? Um zu zeigen, dass Vagheit, Subjektivität und Indeterminismus uns nicht durch experimentelle Fakten aufgezwungen werden, sondern durch bewusste theoretische Entscheidungen?»* (Bell, 1993, p. 160)

Die Abbildung zeigt beispielsweise das berühmte Doppelspaltexperiment in der Beschreibung von de Broglie-Bohm. Demnach bewegen sich Teilchen stets auf wohldefinierten Bahnen, haben wohldefinierte Eigenschaften und müssen nur durch einen Spalt fliegen, nicht durch beide «gleichzeitig», wie es wegen der Überlagerung der Wellenzustände angenommen wurde. → **Abbildung**

Die neue Teilchentheorie hat jedoch auch Tücken. Sie ist eine sogenannte «Nicht-Lokale Versteckte-Variablen-Theorie» und sagt voraus, dass sich Teilchen über beliebig lange Strecken gegenseitig beeinflussen können. Nicht-Lokalität wird von vielen Physiker*innen als Ausschlusskriterium für eine physikalische Theorie genannt. Doch genaueres Hinschauen zeigt, dass die Quantenmechanik unabhängig von der De-Broglie-Bohm-Theorie einen unüberwindbaren nicht-lokalen Charakter aufweist (Maudlin, 2014). Und da die De-Broglie-Bohm-Theorie nicht die Lokalität verletzt, die wir aus der Relativitätstheorie kennen, kann sich auch hier nichts schneller als das Licht ausbreiten.

Man mag sich nun fragen, wie es mit der vorhin erwähnten Wunderlichkeit der Quantenwelt in der De-Broglie-Bohm-Theorie bestellt ist? Wie Bell zum



Ausdruck bringt, gibt es diese dort eben nicht. Trotzdem erzeugt sie die gleichen Quanten-Phänomene. Die Theorie löst nicht nur das Messproblem der Quantenmechanik, sondern beschreibt gleichzeitig auch, was wir im Alltag beobachten, nämlich Punktteilchen.

Die De-Broglie-Bohm-Theorie ist als Alternativweg zu verstehen: Sie zeigt auf, dass wir uns keineswegs von der Idee verabschieden müssen, dass die Physik uns ein Bild der materiellen Realität liefern kann. Auch wenn dies üblicherweise an den meisten Physik-Institutionen so akzeptiert, ja sogar gelehrt wird, ist die Quantenmechanik nicht das Ende einer solchen Physik. De Broglie-Bohms Theorie erfährt zurzeit eine Renaissance und wird nach langer Stille wieder Forschungsthema in mehreren Bereichen der Physik und Philosophie.

Ich selbst bin agnostisch was die existierenden Theorien oder so genannten «Interpretationen» der Quantenmechanik betrifft. Weder würde ich mich als Bohmianer bezeichnen noch als Verfechter einer anderen Interpretation, wie zum Beispiel der Viele-Welten-Theorie. Wahrscheinlich ist keine von den uns bekannten Theorien die *eine*, die sich einmal als wahr herausstellt. Trotzdem kann man von jeder Theorie etwas über die Quantenmechanik lernen. Insbesondere von der de Broglie-Bohmschen, da sie ein konkretes Beispiel einer Versteckte-Variablen-Theorie ist. Sie zeigt, dass die bizarre Quantenwelt uns nicht zwingt, unser Bild der Realität aufzugeben.

Johannes Fankhauser

Abbildung

Beim berühmten Doppelspaltexperiment von Thomas Young (Young, 1804) werden Teilchen (z.B. Elektronen oder Photonen) durch zwei Spalten geschickt. Obwohl unser klassisches Verständnis davon ausgeht, dass einzelne Teilchen nur durch einen einzigen Spalt hindurchfliegen können, werden Wellenphänomene beobachtet. Selbst wenn das Experiment mit relativ grossen Molekülen durchgeführt wird, entsteht auf dem Schirm dahinter ein Interferenzmuster, wie man es von Wasserwellen kennt. Das deutet auf einen Wellencharakter von Teilchen hin, wie er seither angenommen und durch Heisenberg und Schrödinger mathematisch beschrieben wurde.

Die Ergebnisse des Doppelspaltexperimentes werden oft als bizarr interpretiert, mit fundamentaler Auswirkung auf unser Verständnis der Realität. Aussagen wie «das Teilchen geht durch beide Spalten gleichzeitig» oder «nur wenn es nicht beobachtet wird, ist das Teilchen eine Welle» finden in populärwissenschaftlichen Artikeln regen Einzug. Doch wie das Beispiel der De-Broglie-Bohm-Theorie zeigt, sind solche kontraintuitiven Überzeugungen nicht notwendig. Laut der Theorie ist der Quantenzustand eine Führungswelle und das Teilchen hat zu jedem Zeitpunkt eine eindeutige Position. Trifft es auf den Doppelspalt, durchquert es immer nur einen Spalt und wird von der Führungswelle gelenkt. Dadurch entstehen dieselben Interferenzmuster auf dem Schirm rechts wie sie die Quantenmechanik vorhersagt. Das Bild oben zeigt die Bahn eines einzelnen Teilchens in schwarz. Die grauen Linien sind mögliche andere Bahnen von Teilchen.
(Graphik erstellt durch den Autor)