Auf der Suche nach dem Quantenmodell

Teil 1 – Die Phänomene der Quantenwelt

Friedrich Wagner, www.frwagner.de, Oktober 2021

In diesem Aufsatz geht es um die Quantenmechanik. Diese Theorie bildet zusammen mit der Relativitätstheorie den Grundpfeiler der theoretischen Physik, und die Atom- und Festkörperphysik gehen genauso auf sie zurück wie die Elementarteilchenphysik und die Chemie. Ihre Voraussagen haben sich in unzähligen Experimenten mit geradezu fantastischer Genauigkeit bestätigt. Sie hat Technologien wie Laser, Solarzellen, Digitalkameras und elektronische Bauteile wie Transistoren hervorgebracht, die in Computern und vielen anderen Geräten zum Einsatz kommen. Man schätzt, dass über 30% des Bruttoinlandsproduktes auf Erfindungen zurückgehen, die aus der Quantenmechanik resultieren. Neue Anwendungen wie sichere Datenübertragungen und Quantencomputer, die bislang unlösbare Probleme in Sekundenbruchteilen lösen können, stehen bereits in den Startlöchern. Sie werden diese Theorie in den nächsten Jahren noch stärker ins Licht der Öffentlichkeit rücken.

Diesem beeindruckenden Erfolg steht allerdings die ebenso bemerkenswerte Tatsache gegenüber, dass diese Theorie bis heute – fast 100 Jahre nach ihrer Formulierung – keine allgemein anerkannte *Deutung* erfahren hat. Es besteht anders formuliert keine Einigung, welches konkrete *Modell* ihr zu Grunde liegt, um die von ihr vorausgesagten Effekte erklären zu können. Eines aber scheint sicher zu sein: Unser gewohntes Naturverständnis wird angesichts der Phänomene der Quantenwelt grundlegend revidiert werden müssen.

Da mich dieses Thema schon seit längerem interessiert und mich immer wieder neu fasziniert, habe ich einmal versucht, die besonderen Eigenschaften der Quantenwelt herauszustellen und die Stärken und Schwächen der derzeitigen Interpretationsversuche zusammenzutragen. Ich bin dabei überzeugt, dass sich das erstaunliche – ja geradezu schockierende! – Verhalten der quantenmechanischen Welt auch Lesern ohne physikalisches Vorwissen verdeutlichen lässt und sie (das heißt *Sie*) in die Lage versetzt, in der noch immer andauernden Deutungsdebatte selbst einen Standpunkt einnehmen zu können. Nach meinem Physikstudium mit Schwerpunkt Allgemeine Relativitätstheorie in Göttingen und anschließender Promotion in der Rostocker Informatik befasse ich mich nicht mehr beruflich mit diesen Themen, aber ich wollte meine Schlussfolgerungen teilen, die aus einem über zehnjährigen Studium der einschlägigen Bücher (am Ende waren es über hundert, nur die guten gezählt) sowie unzähliger aktueller Fachartikel entstanden sind. Das Ergebnis dieser Bemühungen ist dieser Aufsatz.

Schon jetzt sei verraten, dass sich bei dem Vergleich der Interpretationen kein echter „Sieger" küren lässt. Jeder dieser Ansätze ist auf seine ganz eigene Weise so ungewöhnlich und befremdlich, dass der Ausspruch von Niels Bohr, einer der Gründungsväter der Quantenmechanik, nichts von seiner Aktualität verloren hat:

„*Wer über die Quantentheorie nicht entsetzt ist, der hat sie nicht verstanden*."

Nehme das Entsetzen seinen Lauf...

Wie sich die Quanten ihren Weg in die Physik bahnten

Die Entstehungsgeschichte der Quantenmechanik ist ein schönes Beispiel, wie bestimmte Eigenschaften der Natur ihren Einzug in die physikalische Beschreibung *erzwingen* und jedem Versuch widerstehen, in ein bereits bestehendes und liebgewonnenes Gedankengebäude integriert zu werden. Ein kleiner Ausflug in die Geschichte ist daher lohnenswert, auch wenn er für das Verständnis der nachfolgenden Abschnitte nicht unbedingt erforderlich ist.

Die Geschichte beginnt mit einer Verzweiflungstat. Die Tatsache, dass heiße Materialien wie geschmiedetes Eisen ein temperaturabhängiges Licht von glühend rot bis grellweiß ausstrahlen, ist ein bekanntes Phänomen, das aber am Ende des 19. Jahrhunderts allen Versuchen einer genauen Erklärung widerstand. Die Anwendung der klassischen Physik ergab nämlich eine absurd falsche Vorhersage: die Lichtemission müsste für größere Frequenzen immer weiter ansteigen. Die Lösung dieses Problems lieferte im Jahre 1900 Max Planck, dem man bei seiner Ausbildung noch prophezeit hatte, die Physik wäre im Wesentlichen abgeschlossen und alle grundlegenden Entdeckungen bereits gemacht. Zu seinem eigenen Verdruss gelang ihm dies aber nur mit einer höchst ungewöhnlichen Annahme, die im Widerspruch zu den bis dahin bekannten physikalischen Theorien steht: die Elektronen geben ihre Energie nicht stetig, sondern „stoßweise" ab. Die Elektronen würden somit eine Zeitlang ohne Energieverlust vibrieren und dann augenblicklich und ohne erkennbare Außeneinwirkung einen Energiebetrag abgeben. Der Betrag ist dabei nicht beliebig, sondern entspricht dem Produkt aus der Frequenz und einer neu entdeckten Konstanten *h*, die heute als *Plancksches Wirkungsquantum* bezeichnet wird. Unter dieser Voraussetzung ergibt sich genau der beobachtete Frequenzverlauf.

Seine Zeitgenossen und auch Planck selbst glaubten trotz dieser Entdeckung weiterhin fest daran, dass sich die Natur kontinuierlich entwickelt und suchten fieberhaft nach einer alternativen Lösung, die ohne diese (Originalton Planck) „verdammte Quantenspringerei" auskommt. Der nächste Nackenschlag für die klassische Physik erfolgte aber schon fünf Jahre später in Gestalt eines Schweizer Patentbeamten dritter Klasse.

Albert Einstein veröffentlichte im Jahre 1905 nicht nur einen überzeugenden Nachweis für die Existenz von Atomen sowie die bis heute gültige Fassung der speziellen Relativitätstheorie, sondern legte in diesem Jahr auch einen entscheidenden Grundbaustein für die Quantenmechanik, für den er später den Nobelpreis bekam. Es ging um den sogenannten lichtelektrischen Effekt, bei dem Elektronen aus metallischen Materialien durch Lichteinwirkung herausgelöst werden. Dies war sehr rätselhaft, da der Effekt schon bei geringer Lichteinwirkung auftritt. Bei hochfrequentem Licht war die Energie dieser Elektronen außerdem viel größer, eine Abhängigkeit von der Amplitude (Intensität) der Lichtwellen wäre viel logischer gewesen.

Was wäre aber, dachte sich Einstein, wenn sich Licht gar nicht kontinuierlich ausbreitet, sondern in festen „Paketen" konzentriert ist, deren Energie genauso groß wie die von Planck postulierten Energiesprünge ist? Diese Pakete könnten dann ihre gesamte Energie an ein einziges Elektron übertragen. Die Energie der Elektronen wären dann proportional zur Frequenz des eingestrahlten Lichts mit dem Proportionalitätsfaktor *h*, dem Planckschen Wirkungsquantum. Eine genaue experimentelle Überprüfung gelang erst 10 Jahre später – sie zeigte einen vollen Erfolg für diese Theorie. Heute nennt man diese Lichtpakete „Photonen" und der Effekt bildet die Grundlage jeder Solarzelle und Digitalkamera.

Abb. 1: Die Helden der Quantenmechanik – Max Planck, Albert Einstein, Niels Bohr, Louis de Broglie, Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg.

Selbst viele Jahre nach diesem Nachweis war Einstein bemerkenswerterweise der Einzige, der den Teilchencharakter des Lichts ernst nahm[1]. Schließlich *wusste* man schon seit dem 17. Jahrhundert, dass sich Licht wellenförmig ausbreitet, wie kann es sich dann gleichzeitig wie ein Teilchen verhalten? Einstein hatte keine konkrete Antwort auf diese Frage, aber er erkannte, dass dieses Rätsel ein Teil der Natur ist, dem wir uns stellen müssen. Sehr überrascht hätte ihn wahrscheinlich, wie diese Frage heute, über hundert Jahre später, beantwortet wird: *Wir wissen es immer noch nicht*. Hier zeigt sich zum ersten Mal das quantenmechanische Rätsel, das in diesem Aufsatz noch ausführlich beleuchtet wird.

Das nächste Kapitel in der Geschichte der Quantenmechanik wurde 1913 von dem dänischen Physiker Niels Bohr aufgeschlagen. Man nahm zu der Zeit bereits an, dass Atome aus einem kompakten Kern bestehen, der von Elektronen umkreist wird. Da Elektronen elektrisch geladen sind, müssten sie dabei aber eigentlich Energie abstrahlen und somit innerhalb kürzester Zeit in den Kern stürzen. Bohr „löste" das Problem durch eine ad-hoc-Annahme: die für die Drehbewegung der Elektronen verantwortlichen Kräfte sind gequantelt, das heißt sie existieren nur in Vielfachen einer endlichen Größe. Als Folge sind nur ganz bestimmte Elektronenbahnen erlaubt, insbesondere eine kleinste, was die Stabilität der Atome erklärt. Wirklich bemerkenswert wurde dieser Kniff durch eine direkte Ableitung dieser Theorie: Für das Wasserstoffatom ließ sich ein Energiespektrum berechnen, das bis auf den Promille-Bereich genau die charakteristischen Lichtfrequenzen wiedergab, die ein solches Atom im angeregten Zustand abgeben kann, was bis dahin unerklärlich war.

Zehn Jahre später erwies sich die Bohrsche Annahme als Folge einer noch fundamentaleren Eigenschaft der Natur. Wenn sich Licht wie eine Welle oder ein Teilchen verhalten kann, könnten dann nicht auch materielle Teilchen wie Elektronen oder ganze Atome einen Wellencharakter zeigen? Dieser revolutionäre und gleichzeitig bestechend einfache Gedanke führte Louis de Broglie zu einer physikalischen Erklärung der Bohrschen Elektronenbahnen: Ähnlich den Schwingungen einer Violinsaite darf eine solche Bahn nur ganze Vielfache einer Grundwellenlänge umfassen, nämlich der Wellenlänge des Elektrons. Durch eine einfache Rechnung konnte er aus diesem Modell genau die von Bohr postulierten Beziehungen ableiten. Die Wellenlänge ist dabei umso kleiner, je größer das Teilchen ist[2], weshalb der Wellencharakter normalerweise verborgen ist. Wenige Jahre später wurde de Broglies Annahme aber auch experimentell bestätigt: Ein durch einen dünnen Metallfilm geleiteter Elektronenstrahl zeigte das gleiche Interferenzmuster wie Licht- oder Wasserwellen! Mittlerweile lässt sich dieser Trick sogar für ganze Moleküle durchführen.

---

[1] Max Planck schrieb zum Beispiel in seiner Nominierung Einsteins für den Nobelpreis: „Dass er in seinen Spekulationen gelegentlich auch einmal über das Ziel hinausgeschossen haben mag, wie zum Beispiel in seiner Hypothese der Lichtquanten, wird man ihm nicht allzu schwer anrechnen dürfen."

[2] Genauer gesagt ist sie umgekehrt proportional zum Impuls des Teilchens, also dem Produkt aus Masse und Geschwindigkeit. Diese Beziehung und die kleine Wellenlänge der Elektronen ist die Grundlage der später entwickelten Elektronenmikroskope.

Im Jahre 1926 fand die Suche nach einer mathematischen Quantentheorie ihren Abschluss. Die vom deutschen Physiker Werner Heisenberg und dem Österreicher Erwin Schrödinger entdeckte Wellengleichung[3], heute *Schrödinger-Gleichung* genannt, bildet die Grundlage der bis heute gültigen Theorie der Quantenmechanik. In den unzähligen Experimenten und praktischen Anwendungen, die seit dieser Zeit durchgeführt wurden, hat sich *nicht eine* ihrer Vorhersagen als falsch erwiesen.

Diese Theorie ist nicht nur exakt, sondern auch universell: Als Grenzfall für große Objekte enthält sie die komplette klassische Mechanik und in Form der Quantenfeldtheorie lässt sie sich auch mit der Speziellen Relativitätstheorie verbinden. Wenn man mit mathematischen Begriffen wie Vektoren, Eigenwerten und Operatoren vertraut ist, lässt sich ihr Formalismus zudem auf einer einzigen DIN A4 Seite zusammenfassen. Niemand kann bis heute sagen, *warum* physikalische Theorien wie die Quantenmechanik, die Relativitätstheorie oder auch schon die Klassische Newtonsche Mechanik in ihrem Anwendungsbereich so erfolgreich sein können, das heißt warum die Welt so „einfach" beschaffen ist, dass sich ihre grundlegenden Wirkungszusammenhänge auf einige wenige mathematische Beziehungen abbilden lassen. Mir erscheint diese Einsicht mindestens so erstaunlich und unerklärlich wie die hier beschriebenen Phänomene der Quantenwelt.

Ein fundamentaler Makel der heutigen physikalischen Naturbeschreibung soll aber nicht verschwiegen werden: Die Allgemeine Relativitätstheorie, die in ihrem Anwendungsgebiet ebenfalls alle Tests ohne die geringste Abweichung bestanden hat, lässt sich nicht mit der Quantenmechanik in Einklang bringen. Diese beiden Theorien stehen somit gleichberechtigt, aber unversöhnlich nebeneinander. Ihre Vereinheitlichung zu einer einzigen fundamentalen „Quantengravitationstheorie" ist sozusagen der heilige Gral der theoretischen Physik. Ob diese Suche jemals erfolgreich sein wird, wissen wir nicht.

An dieser Stelle liegt die Frage nahe, warum man sich Gedanken um die Interpretation der Quantenmechanik machen muss, wenn sie später möglicherweise durch eine andere, noch fundamentalere Theorie ersetzt wird. Die Antwort auf diese Frage ist dreigeteilt: Zum einen mangelt es uns an einem konkreten physikalischen *Modell* für die Theorie der Quantenmechanik, die im Grunde nur eine Art von Rezept zur Vorhersage experimenteller Ergebnisse ist – die Frage, aus welchen Grundelementen unsere Welt besteht und wie diese miteinander interagieren, lässt sie vollkommen offen. Man kann außerdem zweitens erwarten, dass ein besseres Verständnis der Quantenmechanik eine wichtige – vielleicht sogar unerlässliche – Hilfe für die Suche nach der Quantengravitationstheorie darstellt. Schließlich, und das wird ein zentraler Bestandteil dieses Aufsatzes sein, zeigt sich das fundamentale Rätsel bereits in den quantenmechanischen *Phänomenen* unabhängig von jeder Theorie.

[3] Heisenberg war der erste, der den quantenmechanischen Formalismus entdeckte. Die am häufigsten verwendete Form als Wellengleichung wurde noch im gleichen Jahr von Schrödinger gefunden. Wie diese unterschiedlichen Formalismen zu bewerten sind, wird noch Thema dieses Aufsatzes sein.

Inkompatible Eigenschaften und der Zufall

Wir verlassen nun die historische Betrachtung und stürzen uns direkt in die Beschreibung und Interpretation einiger wegweisender Experimente. Es erfordert ein wenig Geduld, den Gedankengängen zu folgen, am Ende wird der Leser aber zumindest eine Ahnung davon bekommen, wie rätselhaft und fremdartig sich die quantenmechanische Welt darstellt. Vielleicht – und das würde ich als großen Erfolg dieses Aufsatzes sehen – wird es ihm dabei ähnlich wie dem großen Albert Einstein ergehen:

> „*Es war, als ob mir der Boden unter den Füßen weggezogen würde,*
> *mit keinem festen Fundament irgendwo in Sicht, auf dem man hätte bauen können*."

Man stelle sich zum Einstieg ein Elektron mit den beiden Eigenschaften Größe (groß/klein) und Farbe (schwarz/weiß) vor[4]. Natürlich sind dies keine tatsächlichen physikalischen Eigenschaften von Elementarteilchen, aber für die nachfolgenden Betrachtungen ist diese Sprechweise sehr hilfreich. Man lasse sich auch nicht täuschen: Diese Experimente sind in den letzten Jahrzehnten bezüglich Eigenschaften wie Teilchenposition oder Impuls tatsächlich mit dem hier beschriebenen Ausgang durchgeführt worden. Dabei sind niemals „mittelgroße" oder „graue" Elektronen gefunden worden, was genau der Entdeckung von Max Planck entspricht, dass für bestimmte Eigenschaften nur gequantelte, das heißt diskrete Werte erlaubt sind.

Zur Messung der beiden Eigenschaften benötigen wir zunächst einmal geeignete Messgeräte. Hierzu sollen die in Abbildung 2 dargestellten „Messboxen" verwendet werden, in die links ein Elektron geschickt wird, welches die Box über den Ausgang g (für groß) oder k (für klein) beziehungsweise s (für schwarz) oder w (für weiß) verlässt, je nachdem, welche Eigenschaft vorliegt.

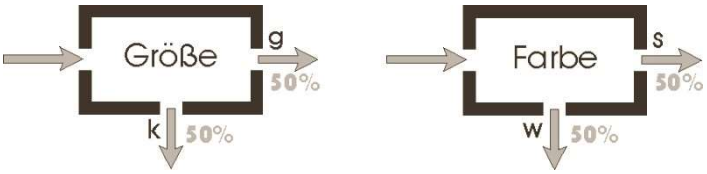

Abb. 2: Messung der Eigenschaften Größe und Farbe.

Es soll nun eine Gruppe von Elektronen betrachtet werden, die bezüglich der beiden Eigenschaften gleichverteilt sind, so dass sich sowohl bei einer Größen- als auch bei einer Farbmessung eine 50-zu-50-Verteilung der jeweiligen Eigenschaften ergibt (siehe Abbildung 2).

Um sicher zu gehen, dass die Messboxen ihre Funktion erfüllen und auf dem Weg zwischen ihnen keine Zustandsänderungen stattfinden, lässt sich direkt nach der Messung eine erneute Größe- beziehungsweise Farbmessung durchführen. Alle als groß befundenen Elektronen sollten dann die zweite Messbox durch den Ausgang g verlassen und alle kleinen durch den Ausgang k. Analoges müsste für schwarze und weiße Elektronen gelten. Das entsprechende Experiment ist in Abbildung 3 (links) dargestellt und zeigt auch tatsächlich das erwartete Ergebnis.

[4] Diese Betrachtungsweise habe ich David Z. Alberts Buch „Quantum Mechanics and Experience" entnommen, welches zwar nicht den neuesten Stand der Deutungsdebatte widerspiegelt, aber eine sehr gute Einführung in die Quantenmechanik gibt.

Eine interessante Frage ist außerdem, ob es Korrelationen zwischen den beiden Eigenschaften gibt, ob also zum Beispiel alle großen Elektronen auch schwarz sind. Mit dem Versuchsaufbau von Abbildung 3 (rechts) lässt sich dies überprüfen. Wie man sieht, bestehen in unserem Beispiel aber keine Korrelation dieser Art: Das 50-zu-50-Verhältnis bezüglich Farbe ergibt sich unabhängig von der Größe und umgekehrt.

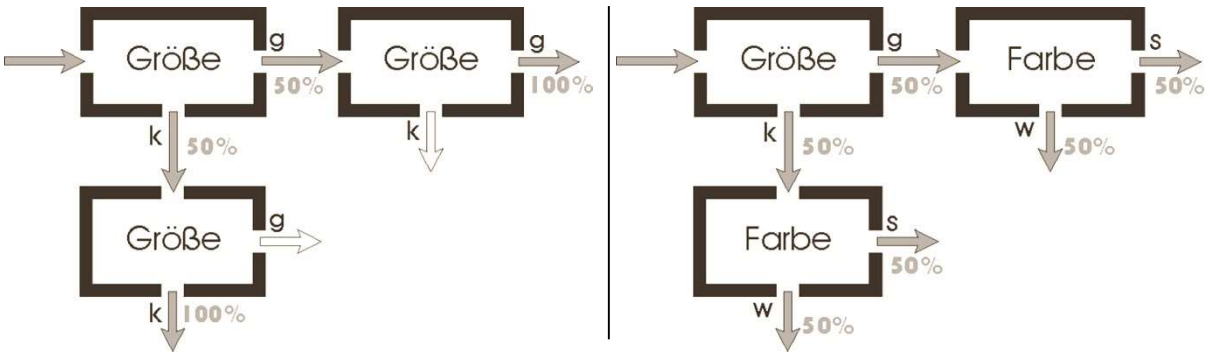

Abb. 3: Überprüfung, ob sich die gemessenen Eigenschaften zwischen den Messboxen verändern (links) oder ob Korrelationen vorliegen (rechts).

So weit, so gut. Was würde man aber nun erwarten, wenn die Elektronen, die die letzte Versuchsanordnung verlassen, erneut bezüglich ihrer Größe geprüft werden? Richtig, die zuvor als groß befundenen Elektronen müssten (wie in Abbildung 3 links oben) zu 100% den Ausgang g nehmen. Dies ist aber bemerkenswerterweise *nicht* das, was in den realen Experimenten passiert. Abbildung 4 zeigt ein ganz anderes Resultat: Nur die Hälfte der zuvor als groß befundenen Elektronen wird jetzt als groß gemessen, die andere Hälfte stellt sich dagegen als klein heraus! Das gleiche gilt (hier nicht dargestellt) für die Farbe der Elektronen, die zuvor einem Test der Größe unterzogen wurden. Nach den Vorüberlegungen zu diesem Experiment müsste dieses Ergebnis eigentlich unmöglich sein.

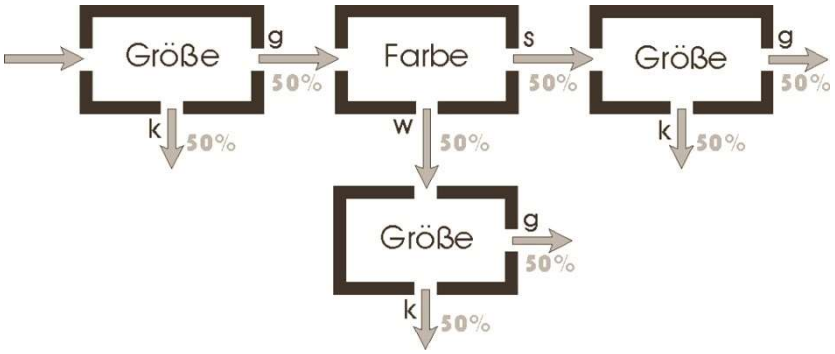

Abb. 4: Nach einer Farbmessung an großen Elektronen werden nur noch die Hälfte der Elektronen als groß erkannt.

Vielleicht liegt es doch an den Messgeräten? Aber welche Vorrichtungen in den tatsächlich durchgeführten Experimenten auch immer verwendet wurden und wie oft der Versuch mit einzelnen oder sehr vielen Elektronen wiederholt wurde – die Verteilung lag immer sehr genau bei 50-zu-50, eine Verteilung von 100-zu-0 ergab sich nicht einmal ansatzweise. Diese Experimente scheinen also auf ein ziemlich merkwürdiges Verhalten der Elektronen selbst hinzudeuten.

Tatsächlich zeigen sich schon an diesem einfachen Experiment zwei elementare Eigenheiten der mikroskopischen, durch die Quantenmechanik beschriebenen Welt: die Unschärferelation und die unvermeidliche Rolle des Zufalls. Es lohnt sich, hierauf etwas genauer einzugehen.

In dem Experiment von Abbildung 4 führt die Messung der Eigenschaft Farbe offensichtlich zu einer „Verschmierung" der Eigenschaft Größe. Dieser Sachverhalt spiegelt sich in der vielzitierten Heisenbergschen Unschärferelation wider: Es gibt miteinander inkompatible Eigenschaften, im obigen Beispiel die Größe und Farbe des Elektrons, die nicht gleichzeitig exakt bestimmt werden können. Das Produkt der Messungenauigkeiten für die Position und den Impuls eines Elektrons ist zum Beispiel selbst unter idealen Bedingungen immer größer als die Plancksche Konstante. Zwei andere miteinander inkompatible Eigenschaften sind die Energie und die Zeit. Diese Erkenntnis hat eine fundamentale Bedeutung, denn für die Zunft der Physiker offenbart sich hier zum ersten Mal eine *prinzipielle* Grenze für den Versuch einer exakten Naturbeschreibung, die nicht verbesserungsfähigen Messgeräten, sondern der Natur selbst geschuldet ist. Ein harter Schlag!

Eine besondere Rolle spielt dabei auch der Zufall. Die Hälfte der Elektronen wird in dem Experiment von Abbildung 4 nach der zweiten Größenmessung als groß erkannt, die andere Hälfte als klein. Von welchen Faktoren hängt es aber nun ab, ob ein einzelnes Elektron am Ende die Messbox bei g oder k verlässt? Von den beiden Eigenschaften des Elektrons kann diese Entscheidung nicht abgeleitet werden, denn alle Elektronen sind vor dieser Messung erst als groß und dann als schwarz befunden worden. Bei Experimenten dieser Art sind aber auch keine weiteren Eigenschaften entdeckt worden, die einen Einfluss auf den Ausgang der Messung gehabt haben könnten. Das Messergebnis für ein einzelnes Elektron ist daher komplett unbestimmt und offensichtlich dem reinen Zufall unterlegen! Auch dies ist ein grundlegender Dämpfer für das Unternehmen, Naturvorgänge möglichst exakt beschreiben und voraussagen zu können. Der große Richard Feynman schrieb dazu:

> *"A philosopher once said 'It is necessary for the very existence of science that the same conditions always produce the same result'. Well, they do not."*

Die aktive Rolle der Messung und des Zufalls ist nicht nur höchst merkwürdig, sie steht auch im Widerspruch zu den bislang bekannten physikalischen Theorien wie der Newtonschen Mechanik, der Elektrodynamik und der Relativitätstheorie.

Aber es kommt noch merkwürdiger.

Überlagerte Zustände

Ein anderes Experiment. Man nehme eine Elektronenquelle sowie einen Detektor, mit dem sich die emittierten Elektronen nachweisen lassen (zum Beispiel ein Schirm mit einer fluoreszierenden Schicht, die bei jedem auftreffenden Elektron einen Lichtblitz aussendet) und dazwischen eine Wand, die bis auf zwei schmale Spalten für die Elektronen undurchlässig ist. Die Frage lautet nun: wie sieht die Verteilung der Elektronen auf dem Detektorschirm aus?

Um einen Hinweis auf die erwartete Verteilung zu erhalten, kann man das Experiment zunächst mit nur einem Spalt durchführen, indem man zum Beispiel den jeweils anderen Spalt abdeckt. Das Ergebnis ist in Abbildung 5 dargestellt.

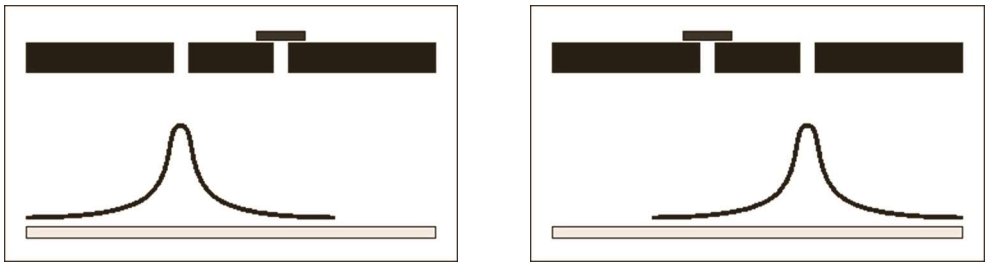

Abb. 5: Verteilung der Elektronen bei einzelnen Spalten. Die Elektronen gelangen von oben durch die Zwischenwand, das heißt durch eines der beiden Spalte, und treffen dann auf den Detektorschirm. Die dort registrierte Häufigkeitsverteilung ist als Kurve dargestellt.

Wie man sieht, ergibt sich in beiden Fällen eine charakteristische Häufigkeitsverteilung der Elektronen um den Punkt, der – wenig überraschend - direkt hinter dem jeweils offenen Spalt liegt. Wir haben nun eine gute Vorstellung von dem erwarteten Ausgang dieses Experiments: Da jedes Elektron entweder durch Spalt A oder durch Spalt B zum Schirm gelangt, müsste sich eine Verteilung wie in Abbildung 6 links ergeben.

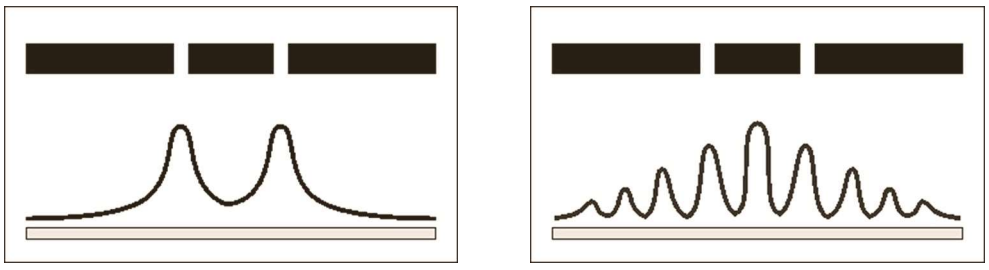

Abb. 6: Erwartete (links) und tatsächliche Verteilung (rechts) der Elektronen beim Doppelspaltversuch.

Tatsächlich ergibt sich bei den tatsächlich durchgeführten Experimenten ein *komplett anderes* Bild. Wie Abbildung 6 rechts zeigt, werden die meisten Elektronen an einer Stelle registriert, die genau zwischen den ursprünglichen Maxima liegt. Außerdem gibt es plötzlich streifenförmige Bereiche, in denen überhaupt kein Elektron mehr auftrifft.

Dieser Ausgang ist nicht leicht zu verstehen. Es scheint, als wenn sich die Elektronen nach dem Durchgang durch die Spalten in irgendeiner Form gegenseitig beeinflussen und damit das Streifenmuster erzeugen. Geradezu unheimlich wird es aber durch die Tatsache, dass sich dieses Ergebnis sogar dann einstellt, wenn der Elektronenstrom so gedrosselt wird, dass jeweils immer nur *ein einzelnes Elektron* die Zwischenwand passiert und die Ergebnisse über die Zeit summiert werden, ja sogar dann, wenn man die Ergebnisse von 1000 gleichartigen

Versuchsaufbauten dieser Art mit jeweils nur einem einzigen Elektron in ein Diagramm zusammenführt! Wie könnte dieses Elektron beim Durchgang durch einen Spalt „wissen", dass es noch einen anderen (aus seiner Sicht weit entfernten) offenen Spalt gibt, oder einen alternativen Testaufbau, das heißt wie kann seine Flugbahn durch diesen Umstand in irgendeiner Form beeinflusst sein?

Fast könnte man an dem Versuchsausgang zweifeln, aber Abbildung 7 zeigt reale Bilder eines solchen Experiments, das mittlerweile unzählige Male durchgeführt wurde und jedes Mal zu genau diesem Ergebnis führte.

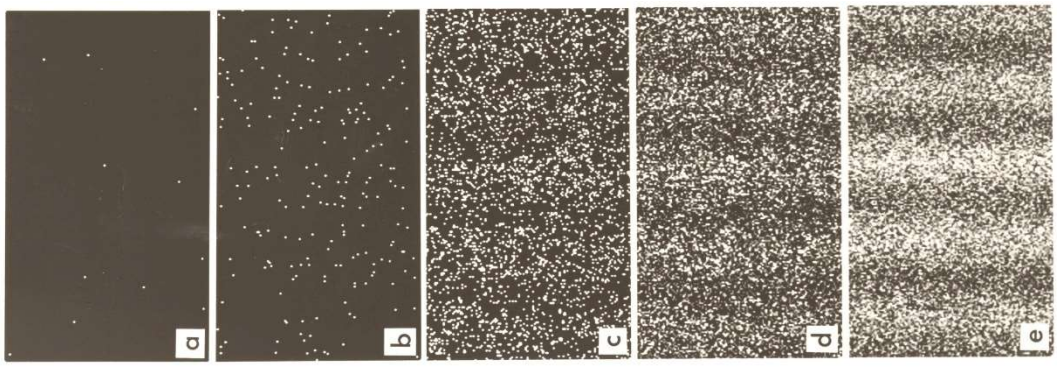

Abb. 7: Bilder aus einem realen Experiment, in dem immer nur einzelne Elektronen die Zwischenwand passieren – von links nach rechts nach Durchgang von 11, 200, 6.000, 40.000 beziehungsweise 140.000 Elektronen.

Der Ausgang dieser Versuchsanordnung lässt nur einen Schluss zu: Die selbstverständlich erscheinende Annahme, dass das Elektron jeweils durch Spalt A *oder* Spalt B zum Schirm gelangt, muss überraschenderweise falsch sein. Durch beide Spalten gleichzeitig kann das Elektron aber auch nicht fliegen – auf dem Leuchtschirm trifft immer ein komplettes Elektron auf und ein „halbes Elektron" ist auch sonst nie beobachtet worden. Zusammenfassend lässt sich also feststellen, dass der Weg des Elektrons weder durch Spalt A noch durch Spalt B noch durch beide Spalte und auch nicht durch keins der beiden Spalte führt. Und das ist nun wirklich ziemlich seltsam, denn dies stellen *alle* logischen Möglichkeiten für das Passieren der Zwischenwand dar.

Ein wissenschaftlicher Ausdruck für dieses Phänomen war schnell gefunden. Man sagt, dass sich das Elektron in einem Zustand der „Superposition" (Überlagerung) befindet, der sich aus den beiden Einzelspalt-Zuständen (nur Spalt A geöffnet oder nur Spalt B geöffnet) zusammensetzt. Was das Phänomen der Superposition *bedeutet*, weiß bis heute aber niemand genau, dies ist ein zentraler Bestandteil des quantenmechanischen Rätsels.

Abb. 8: Der an das Doppelspalt-Experiment erinnernde Quantenskiläufer

Man kann dieses Experiment auch aus einem anderen Blickwinkel sehen. Würde man das Elektron als Welle interpretieren, wären die streifenförmigen Muster als Interferenzeffekte erklärlich, wie sie für Licht- oder Wasserwellen bekannt sind. Als einzelner Punkt auf dem Leuchtschirm und in vielen anderen Experimenten zeigt das Elektron aber eindeutig seine Gestalt als Teilchen, was eine fundamental andere Beschreibungsart darstellt. Diese

Vereinigung aus zwei meinander inkompatiblen Eigenschaften ist unter dem Begriff „Welle-Teilchen-Dualismus" bekannt[5]. Es hängt letztendlich von dem Experiment ab, das heißt von der *Frage*, die wir über die Auswahl der Versuchsanordnung stellen, ob sich das Elektron als Welle oder als Teilchen zeigt.

Dieser letzte Punkt hat eine zentrale Bedeutung. Er wird besonders schön in der folgenden Versuchsanordnung deutlich, die listige Physiker ersonnen und praktisch realisiert haben. Das Ziel besteht darin, das Elektron beim Durchgang durch einen Spalt zu „ertappen". Direkt vor den beiden Spalten werden dazu Detektoren für den Durchgang des Elektrons aufgestellt, zum Beispiel über die Einstrahlung niederenergetischer Photonen, die durch das Elektron zwar abgelenkt werden, es aber selbst nicht signifikant beeinflussen. Tatsächlich lässt sich das Elektron auf diese Weise stets bei Spalt A *oder* Spalt B nachweisen. Das bemerkenswerte ist aber, dass das in Abbildung 6 rechts dargestellte Interferenzmuster bei all diesen Versuchen verschwindet! Es stellt sich stets das Muster aus Abbildung 6 links ein, selbst bei den ausgetüftelsten Versuchen, das Elektron bei dieser Messung so wenig wie möglich zu beeinflussen[6]. Nur wenn wir *prinzipiell* nicht wissen können, durch welchen Spalt die Elektronen geflogen sind, tritt das Interferenzmuster auf.

Auf die Spitze treibt es das rechts skizzierte Experiment. Mit dem Detektorschirm in Position 1 ergibt sich genau das Experiment und damit auch das Interferenzbild von Abbildung 6 rechts. Klappt man den Schirm in Position 2, können die dahinterliegenden Richtungsdetektoren A und B nachweisen, ob das Elektron jeweils durch den oberen *oder* den unteren Spalt geflogen ist. In diesem Fall verschwindet das Interferenzmuster, und zwar selbst dann, wenn der Schirm dank einer schnellen elektronischen Schaltung *erst nach dem Durchgang des Elektrons durch die Zwischenwand* umgeschaltet wurde! Dieser Versuch zeigt eindeutig, dass das Elektron selbst nach der Passage der Zwischenwand noch beide (sich gegenseitig ausschließende) Möglichkeiten in sich trägt und somit die Eigenschaft Welle oder Teilchen erst durch die Wahl der Messung *bekommt*. Mehr noch – da das Endergebnis entscheidend von der Interaktion des Elektrons mit der Zwischenwand und ihren zwei offenen Spalten abhängt, scheint die Ausrichtung des Detektorschirm eine direkte Auswirkung auf diesen Moment der Wechselwirkung zu haben *und damit auf ein Ereignis, das bereits in seiner Vergangenheit liegt*.

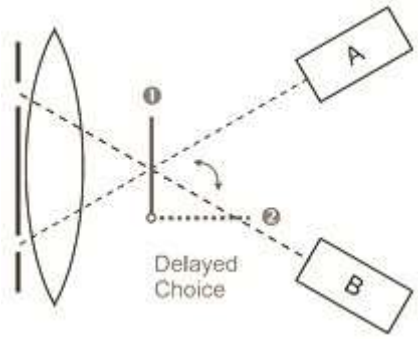

Abb. 9: Delayed Choice Experiment

Mit solchen Schlussfolgerungen sollte man allerdings sehr vorsichtig sein und es gibt auch alternative Deutungen dieses Experiments ohne vergangenheitsgerichtete Kausalwirkungen. Allerdings kommt keine von ihnen ohne dubiose Zusatzannahmen aus, wovon der zweite Teil dieses Aufsatzes berichten wird, weshalb sich bis zum heutigen Tag noch keine von ihnen durchgesetzt hat.

---

[5] Der Welle-Teilchen-Dualismus wird häufig als *das* Grundproblem der Quantenmechanik benannt. Es stellt aber letztendlich nur einen Teilaspekt des Deutungsproblems dar, was man auch daran erkennen kann, dass sich Interferenzeffekte von Mehrteilchen-Systemen nicht allein aus dem angenommenen Wellencharakter der Teilchen ableiten lassen.

[6] Besonders eindrucksvoll ist ein aktuelles Doppelspaltexperiment, in dem der Interferenzeffekt für ganze *Atome*, genauer gesagt Rubidium-Atome, sichtbar gemacht wurde. Die über einen der beiden Wege (Spalte) laufenden Atome wurden dann „markiert", indem eines ihrer Außenelektronen auf ein höheres Energieniveau angeregt wurde. Das Interferenzmuster verschwand in diesem Moment augenblicklich, obwohl die Bahn der Atome eigentlich vollständig durch ihren Kern bestimmt ist, der für Rubidium über 100.000-mal schwerer als ein Elektron ist.

Diese Erkenntnisse lassen auch die Deutung des ersten Experiments in einem anderen Licht erscheinen. Nach der Messung der Farbe stellte es sich als unmöglich heraus, die Größe der Elektronen vorherzusagen, selbst wenn sie zuvor als groß oder klein identifiziert wurden. Die implizite Annahme bestand bei diesem an sich schon merkwürdigen Verhalten natürlich darin, dass das Elektron auch nach der Farbmessung eine der beiden Eigenschaften groß oder klein *hat*, und dass uns die nachfolgende Größenmessung lediglich über den jeweiligen Fall in Kenntnis setzt. Wie die Experimente am Doppelspalt zeigen, ist diese Annahme aber offensichtlich falsch. Das Elektron befindet sich vielmehr in einem Superpositions-Zustand aus „groß und klein" (beide Spalte geöffnet), der sich wie oben gesehen *in physikalisch nachprüfbarer Weise* von dem Zustand „groß oder klein" (Spalt A oder Spalt B geöffnet) unterscheidet. Bei der nachfolgenden Größenmessung wird dieser Zustand in einen der „normalen" klassischen Zustände (entweder groß oder klein) *geändert*, ganz analog zu der Auslöschung der Interferenzeffekte durch die Ortsbestimmung der Elektronen.

Diese „Nebenwirkung" von Messungen, Superpositionszustände in klassische Zustände zu überführen, bezeichnet man als „Kollaps" oder „Zustandsreduktion". Sie ist eine zentrale Eigenheit der quantenmechanischen Welt und ihre Deutung wird bis zum heutigen Tag kontrovers diskutiert. Die Geschichte der physikalischen Forschung enthält viele Konfrontationen mit neuartigen Phänomenen, aber nie hätte man es für möglich gehalten, dass ein *methodisches Grundkonzept* an ihnen scheitert, nämlich mit Hilfe von Messungen bestimmte bereits vorliegende Systemeigenschaften sichtbar zu machen. Spätestens an diesem Punkt dämmerte es vielen Physikern, dass sie nicht einfach auf eine neue Theorie gestoßen sind, sondern auf eine Revolution unseres wissenschaftlichen Weltbildes.

Eine andere wichtige Schlussfolgerung betrifft die zuvor angesprochene Unschärferelation und die Rolle des Zufalls. Aus dem ersten Experiment alleine konnte man noch annehmen (und tatsächlich trifft man recht häufig auf diese zu kurz greifende Interpretation), dass sich die Eigenschaften (hier „Größe" und „Farbe") nicht gleichzeitig messen lassen, weil jede Beobachtung eine *Störung* des Systems darstellt. Die Erkenntnisse aus den Doppelspaltexperimenten zeigen aber, dass Superpositionen schon vor der Messung vorliegen, das heißt die Unschärfe wird nicht durch Störungen in das System hineingetragen, sondern ist eine objektive Eigenheit von ihnen – die Eigenschaften *sind* unscharf. Auch der Zufall erhält nun eine objektive Bedeutung. Eine Messung an einem einzelnen Teilchen informiert uns nicht nur über ein bereits vorliegendes Ergebnis (die übliche Art eines subjektiven Zufalls, der seinen Ursprung in der Unkenntnis des tatsächlichen Zustands hat), sondern das System *ist* bezüglich des konkreten Ausgangs der Messung unbestimmt, es hält noch alle Möglichkeiten für die verschiedenen Messresultate bereit, nur so erklären sich die Interferenzeffekte im Doppelspaltversuch mit einzeln durchlaufenden Elektronen.

Halten wir kurz inne. Klangen diese Ausführungen so, als wären die Eigenschaften eines quantenmechanischen Systems vor ihrer Messung gar nicht real, sondern würden erst durch diese *entstehen*, das heißt durch die bewusste Wahl des Experimentators, welche Frage er dem System stellen will!? Tatsächlich gibt es keine einfache Möglichkeit, genau diesem Schluss zu entgehen. Viele der aktuell diskutierten Interpretationsversuche kreisen um diesen Punkt, der an die alte Frage „Gibt es den Mond, wenn wir ihn nicht beobachten?" erinnert.

Wie seltsam der quantenmechanische Superpositionszustand ist, zeigt sich besonders anschaulich in einem prominenten Gedankenexperiment, das ich als nächstes vorstellen möchte.

Wanted – Dead and Alive

Das von Erwin Schrödinger ersonnene Gedankenexperiment[7] funktioniert wie folgt: In einem hermetisch verschlossenen Behälter befindet sich eine lebende Katze, ein instabiles radioaktives Atom, das mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 Prozent nach genau einer Stunde zerfallen sein wird, und eine Vorrichtung, die bei einem solchen Zerfall die Katze tötet, indem ein tödliches Gift freigesetzt wird. Wie gesagt, nur ein symbolisches Gedankenexperiment!

Abb. 10: Schrödingers Katze

Wie wird sich dieses System entwickeln? Nach den Ausführungen in den vorherigen Abschnitten und auch nach der Vorhersage der mathematischen Theorie der Quantenmechanik wird der Zustand des Atoms nach einer Stunde aus einer Superposition der Zustände „zerfallen" und „nicht zerfallen" bestehen. Durch die Bedingungen des Experiments muss sich damit aber auch die Katze in einem Überlagerungszustand aus tot und lebendig befinden, sie wäre damit also weder tot noch lebendig!

Ein offensichtlich unsinniges Ergebnis. Trotzdem ist es schwer, einen Ausweg aus diesem Dilemma zu finden, wenn man nicht die ad-hoc-Annahme einführt, dass quantenmechanische Effekte nur bei mikroskopischen Systemen auftreten. So liegt es zum Beispiel nahe, die Katze selbst als Messinstrument anzusehen, wodurch sich zwar das Atom, nicht aber die Katze in einem Superpositionszustand befindet. Für diese Annahme gibt es aber keinen konkreten physikalischen Grund und es ist auch nicht klar, wo genau die Grenze zwischen „rein" quantenmechanischen Systemen und Messgeräten verlaufen soll.

Ähnliche Experimente, bei denen quantenmechanische Effekte auf eine makroskopische Ebene verstärkt werden, können mittlerweile sogar tatsächlich durchgeführt werden, wobei zum Beispiel supraleitende Magnete die Rolle der Katze spielen[8]. Die Überlagerungs-Phänomene zeigen sich dabei auch auf dieser Ebene.

Welche Lehren aus diesen Experimenten gezogen werden müssen und wie sich das offensichtlich unsinnige Ergebnis der weder toten noch lebendigen Katze vermeiden lässt, ist noch immer umstritten. Das Gedankenexperiment lässt sich sogar noch zuspitzen: Wenn die

[7] Eigentlich wollte Schrödinger hiermit die paradoxen Eigenschaften der Quantenmechanik bloßstellen. Sein eigener Versuch, den Ausgang des Doppelspaltexperiments auf klassische Weise mit Hilfe von sogenannten „Führungswellen" zu erklären, stellte sich aber als nicht erfolgreich heraus.

[8] Ein besonders beeindruckendes Experiment der Gruppe des Wiener Physikers Anton Zeilinger ist der Nachweis von Interferenzeffekten für *Fullerene* – sphärische Moleküle aus nicht weniger als 60 Kohlenstoffatomen, das heißt etwa 1000 Elementarteilchen (Protonen, Neutronen und Elektronen). Auch bei diesem Versuchsaufbau interferierte jedes Molekül nur mit sich selbst. Die noch zu besprechende Verschränkung von Zweiteilchensystemen konnte sogar auf über 1000 km ausgedehnt werden!

Quantenmechanik tatsächlich ein universeller Zug der Natur ist, würde sich ein Beobachter, der den Behälter öffnet, um sich vom Zustand der Katze zu überzeugen, ebenfalls in einem Überlagerungszustand befinden, der sich aus den Zuständen „Ich sehe eine lebendige Katze" und „Ich sehe eine tote Katze" zusammensetzt – ein unbeschreiblich seltsamer Geisteszustand, der nun wirklich der persönlichen Introspektion jedes Menschen widerspricht.

Um es noch einmal klar zu sagen: Dieses Gedankenexperiment hat nicht das Ziel, uns davon zu überzeugen, dass es gleichzeitig tote und lebendige Katzen gibt. Aber es veranschaulicht zum einen, wie fremdartig die Phänomene der quantenmechanischen Welt sind, und es erzwingt zum anderen eine Antwort auf die Frage, warum die Objekte unserer Alltagswelt sich ganz andersartig (nämlich so, wie wir es gewohnt sind) verhalten, obwohl sie doch aus mikroskopischen Systemen zusammengesetzt sind.

In weiter Ferne, so nah

Es mag kaum möglich erscheinen, aber die Quantenwelt hat noch eine weitere sensationelle Eigenschaft im Köcher. In dem folgenden dritten und letzten Experiment zeigt sich, dass die durch eine Messung bedingte Zustandsreduktion ohne jegliche Zeitverzögerung *an einem beliebig weit entfernten Ort* erzwungen werden kann.

Ein Zwei-Teilchen-Experiment

Für dieses Experiment benötigt man ein System aus zwei Elektronen, deren Eigenschaften der Einfachheit halber wieder mit „schwarz" und „weiß" bezeichnet werden sollen. Dieses System soll so präpariert sein, dass die Farben der beiden Elektronen stets unterschiedlich sind. Es hat demnach genau zwei mögliche Zustände, die mit A (Elektron 1 ist weiß, Elektron 2 ist schwarz) und B (Elektron 1 ist schwarz, Elektron 2 ist weiß) bezeichnet werden sollen. Analog zum Doppelspalt-Experiment lässt sich nun ein Systemzustand präparieren, der aus einer Superposition der Zustände A und B besteht. Wenn keine Wechselwirkung mit der Umgebung stattfindet, bleibt dieser Zustand auch erhalten, wenn sich die beiden Elektronen mit gleichbleibender Geschwindigkeit voneinander entfernen, was für dieses Experiment angenommen werden soll. Welches Ergebnis stellt sich nun ein, wenn die beiden Elektronen separat voneinander bezüglich ihrer Farbe vermessen werden? Abbildung 11 zeigt einen analogen Versuchsaufbau für zwei Photonen, deren Polarisationsausrichtung gemessen wird.

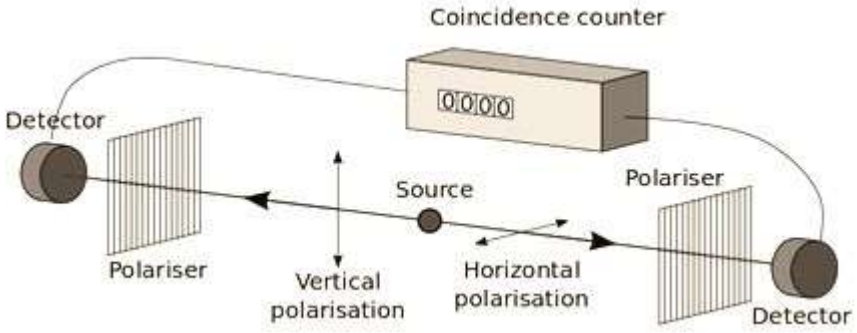

Abb. 11: Vermessung eines Zwei-Teilchen-Systems

Mit Hilfe der Erkenntnisse, die wir aus den ersten beiden Experimenten gewonnenen haben, lässt sich die Frage nach dem Ausgang beantworten. Eine Messung an Elektron 1 wird in der Hälfte der Fälle das Ergebnis „weiß" liefern und in der anderen Hälfte das Ergebnis „schwarz". Betrachten wir als Beispiel den ersten Fall, das heißt Elektron 1 ist weiß. Aufgrund der vorausgesetzten Eigenschaften des Gesamtsystems kann Elektron 2 dann nur noch schwarz sein. Eine nachfolgende Messung an diesem Elektron, auch wenn sie schon augenblicklich nach der Vermessung des ersten Elektrons durchgeführt wird, müsste demnach in 100 % der Fälle zum Ergebnis „schwarz" führen. Dieses Resultat, das sich auch tatsächlich beobachten lässt, klingt zunächst nicht ungewöhnlich, da wir mit Hilfe der Messung an Elektron 1 lediglich herausgefunden haben, dass der Fall A vorliegt (Elektron 1 weiß und 2 schwarz). Der entscheidende Punkt ist hierbei aber, dass das Gesamtsystem vor der Messung nicht in dem Zustand A, sondern in dem Überlagerungszustand aus A und B vorlag, der sich – wie das Doppelspalt-Experiment zeigt – physikalisch von dem Zustand A unterscheidet. Die Messung an Elektron 1 muss somit zu einem augenblicklichen Zustandswechsel des Elektrons 2 geführt haben.

Für die Unmöglichkeit des Auswegs, dass die Eigenschaften bereits *vor* ihrer Messung vorlagen, gibt es noch einen weiteren, vom Doppelspalt-Experiment unabhängigen Beleg. Der Ausgangszustand lässt sich nämlich auch so präparieren, dass er sowohl eine Überlagerung der Zustände weiß und schwarz als auch der Zustände groß und klein bildet. Entscheidet sich der Experimentator dann für eine Messung der Größe und misst zum Beispiel groß, stellt sich das andere Elektron zu 100 % als klein heraus, während für seine Farbe weiterhin die 50-zu-50-Verteilung gilt. Da erst der Experimentator entscheidet, welche der beiden Eigenschaften er messen will, kann das zweite Elektron vor der ersten Messung nicht bereits den Zustand klein gehabt haben. In echten Experimenten mit Photonen kann zum Beispiel eine Seite frei entscheiden, für welche Polarisationsrichtung (die Schwingungsebene des Lichts) seine Messung durchgeführt werden soll. Diese Wahl ist der anderen Seite unbekannt, sie würde daher Messungen für unterschiedliche Ausrichtungen durchführen. Bringt man beide Ergebnisse später wieder zusammen, zeigen sich trotzdem Übereinstimmungen, die weit über das Maß von Zufallstreffern hinausgehen.

Das unheimliche an diesem Effekt ist, dass der Aufenthaltsort der Elektronen zum Zeitpunkt der Messung überhaupt keine Rolle spielt. Wenn man also genügend lange wartet (der Abstand der Elektronen wird in diesem Experiment ja stetig größer), kann das zweite Elektron somit beliebig weit entfernt sein, ohne dass sich etwas an der augenblicklichen Zustandsreduktion des anderen Systems ändert, selbst wenn es mittlerweile in einem anderen Sonnensystem angekommen sein sollte!

Diese sich jeder raumzeitlichen Beschreibung entziehende Verbindung zweier Systeme ist wohl die rätselhafteste Eigenheit der quantenmechanischen Welt. Man bezeichnet sie als „Verschränkung“. Abbildung 12 fasst dieses Experiment noch einmal schön zusammen.

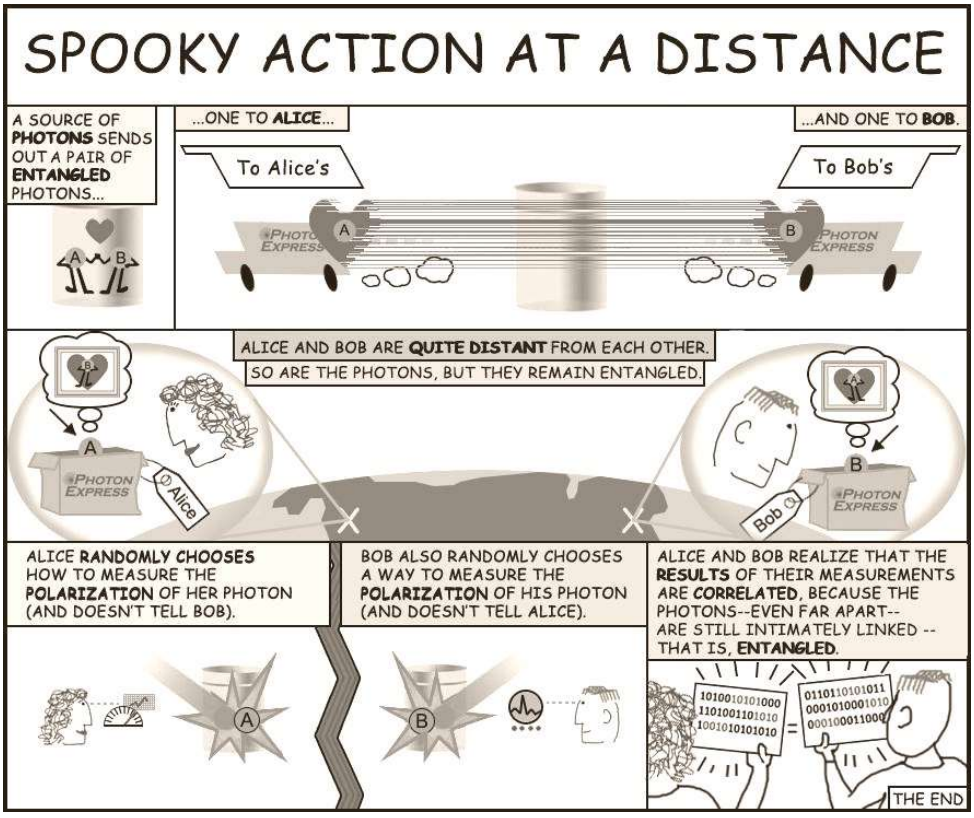

Abb. 12: Das quantenmechanische Phänomen der Verschränkung. (Credits: NASA/JPL-Caltech)

Der Nachweis dieses Effekts ist dabei keineswegs auf mikroskopische Größenordnungen begrenzt. Der aktuelle Längenrekord, realisiert über eine Satellitenverbindung, beträgt 1.203 km! In einem früheren berühmt gewordenen Experiment wurde es für verschränkte Photonenpaare nachgewiesen, von denen sich eine Hälfte auf der Kanareninsel La Palma und die andere auf der Insel Teneriffa befand, siehe Abbildung 13.

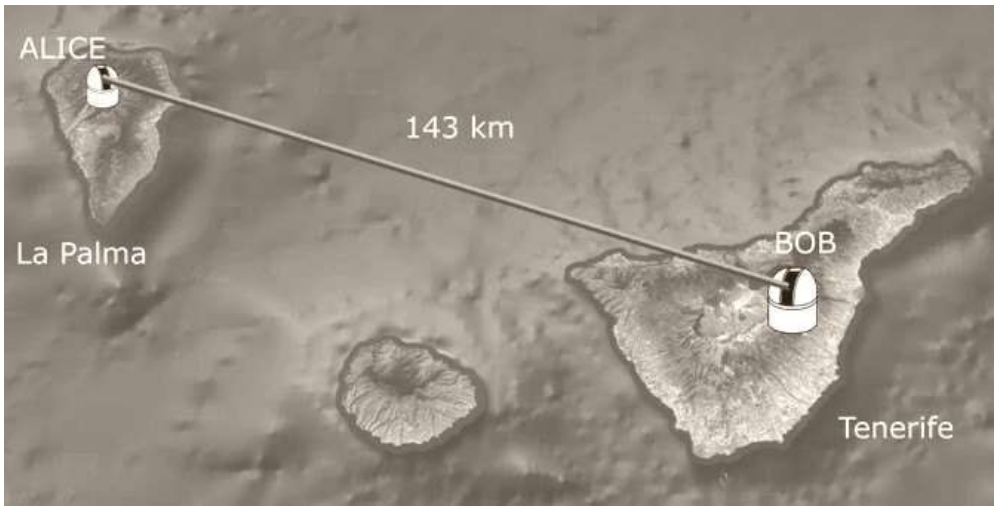

Abb. 13: Verschränkte Photonenpaare in einem Experiment der Universität Wien aus dem Jahr 2007 über eine Entfernung von 143 km.

An den beiden Photonen wurden zeitgleich Messungen durchgeführt, die im allerletzten Moment durch ein Zufallsprinzip ausgewählt wurden, um jegliche Kommunikation oder Vorherbestimmtheit auszuschließen. Trotzdem zeigte die nachträgliche Analyse der Messungen eindeutige Korrelationen. Wurde zum Beispiel die Polarisationsrichtung eines Photons bezüglich einer zufällig ausgewählten Ebene gemessen, zeigte das andere Photon bezüglich dieser Ebene *immer* das komplementäre Verhalten. Diese Eigenschaft kann das Photon nicht schon vor der Messung gehabt haben, denn die Polarisationsebene wurde erst unmittelbar davor ausgewählt. Da die Versuchsanordnung auch keine Kommunikation der beiden Photonen zuließ, ist das Ergebnis dieses Experiments nach der klassischen und relativistischen Physik eigentlich vollkommen unmöglich.

Es ist daher auch kein Zufall, dass es der Begründer der Relativitätstheorie war, der sich in den 1930er Jahren dieser Erschütterung des Weltbildes vehement entgegenstemmte.

Die Einstein - Bohr - Debatte

Für Albert Einstein war die Vorstellung unannehmbar, dass es solche (wie er es nannte) „spukhafte Fernwirkungen" schneller als die Lichtgeschwindigkeit geben könnte[9]. Zusammen mit zwei Mitstreitern veröffentlichte er den folgenden Gedankengang, der als Einstein-Podolsky-Rosen-Argument bekannt wurde: Geht man davon aus, dass sich zwei Systeme wie die beiden Elektronen voneinander separieren lassen, so dass die Manipulation des einen keinen Einfluss auf das jeweils andere haben kann, lässt sich bei dem oben beschriebenen Zwei-Elektronen-Experiment nach der Messung an Elektron 1 eine hundertprozentige Vor-

[9] Einstein erkannte den empirischen Erfolg der Quantenmechanik, zu der er ja auch selbst maßgeblich beigetragen hatte, vollständig an. Bis zu seinem Lebensende hatte er aber die Hoffnung, dass sie eines Tages durch eine andere, noch fundamentalere Theorie ohne Fernwirkungen und intrinsische Zufallselemente ersetzt werden könnte.

hersage für den Messausgang an Elektron 2 treffen, ohne dieses beeinflusst zu haben. Einstein sah dies als hinreichendes Kriterium dafür, dass die entsprechende Eigenschaft des zweiten Elektrons schon vor dessen Messung vorhanden, das heißt *real* ist. Da die Theorie der Quantenmechanik dem Elektron aber diese Eigenschaft abspricht (erinnern wir uns, sie entsteht erst durch die messbedingte Zustandsreduktion), war für Einstein der Nachweis erbracht, dass diese Theorie unvollständig ist.

Niels Bohr widersprach diesem Argument umgehend. Für ihn ist es gar nicht die Aufgabe einer physikalischen Theorie, Aussagen über irgendwelche Eigenschaften *vor* ihrer Messung zu machen. Entscheidend sind nur die Resultate der Messungen, und diese werden von der Quantenmechanik vollständig beschrieben, was sie in seinen Augen zu einer vollständigen Theorie macht.

Einstein war von dieser Antwort nicht überzeugt, die der Frage nach der Welt hinter den Phänomenen auch tatsächlich eher ausweicht, statt sie zu beantworten. Lange Zeit sah es so aus, als wäre es eine philosophische Geschmackssache, welcher Standpunkt der beiden Geistesgrößen überzeugender erscheint. Völlig überraschend wurde 10 Jahre nach Einsteins Tod aber ein Theorem gefunden, welches eine experimentelle Überprüfung der klassischen Weltsicht ermöglicht – mit einem eindeutigen Ergebnis!

Die Bellsche Ungleichung

Einstein hatte die Hoffnung, dass die quantenmechanischen Phänomene eines Tages durch einen lokalen Mechanismus erklärt werden können, der keine überlichtschnellen Fernwirkungen enthält. Für das oben beschriebene Experiment bedeutet die Einschränkung der Lokalität, dass die Korrelationen zwischen den beiden Elektronen ausschließlich an der Quelle entstehen, was aus physikalischer Sicht auch vollkommen sinnvoll erscheint. Der nordirische Physiker John Bell stellte sich aber nun die Frage, welche Aussagen sich über einen *beliebigen* lokalen Mechanismus treffen lassen, der imstande ist, die experimentell ermittelten Korrelationen zwischen weit voneinander entfernten Systemen zu reproduzieren. Er definierte hierzu ein statistisches Maß S für den Grad von Korrelationen und konnte mathematisch ableiten, dass solche klassischen Mechanismen stets zu einem Wert $S \leq 2$ führen. Diese Beziehung ist an sich noch nicht bemerkenswert. Bemerkenswerterweise fand er aber heraus, dass die Theorie der Quantenmechanik für bestimmte Versuchsaufbauten Werte bis zu $S = 2 \cdot \sqrt{2} \approx 2{,}8284$ und damit eine Verletzung dieser Ungleichung zulässt. Damit macht sie eine Voraussage, die mit *keinen* der lokalen Mechanismen in Einklang gebracht werden kann – Bell hatte einen grundsätzlichen, experimentell überprüfbaren Widerspruch zwischen quantenmechanischer und klassischer Weltsicht aufgedeckt.

Es dauerte weitere 15 Jahre, bis sich diese Größe S tatsächlich experimentell ermitteln ließ. Am bekanntesten wurden dafür die Versuche von Alain Aspect und seinem Team, die 1982 den Polarisationszustand zweier Photonen vermaßen, die weit genug voneinander entfernt waren, um sich nicht schnell genug durch lokale Wirkungen beeinflussen zu können. Das Ergebnis[10] war eine eindeutige Verletzung der Bellschen Ungleichung und ein voller Erfolg für die Quantenmechanik!

[10] Für den darin verwendeten Versuchsaufbau sagt die Theorie der Quantenmechanik eine Maßzahl von 2,70 voraus, während der klassische Limit bei 2,0 liegt. Der gemessene Wert betrug $S = 2{,}697 \pm 0{,}015$.

Wie heute übereinstimmend geurteilt wird, gibt es somit keine Hoffnung, die beobachteten quantenmechanischen Korrelationen jemals durch eine klassische Theorie mit lokalen (nicht überlichtschnellen) Wirkungen erklären zu können. Die in diesen Experimenten offenkundige Nichtlokalität ist somit viel mehr als eine kuriose Eigenheit unser aktuellen Theorie der Quantenmechanik – sie stellt einen Wesenszug *unserer Welt* dar, zumindest auf mikroskopischer Ebene. Auch eine mögliche zukünftige Quantengravitationstheorie kann diese Erkenntnis nicht ändern.

Quantenholismus und Überlichtgeschwindigkeit

Das Bellsche Theorem zeigt, dass zwei beliebig weit voneinander entfernte Teilchen in klassisch unerklärlicher Weise miteinander verbunden sein können. Die Messung an einem Teilchen wirkt sich augenblicklich auf das Gesamtsystem aus, als wäre dieses gar nicht in einzelne Bestandteile aufspaltbar, sondern könnte nur als Ganzes gesehen werden. Dieser „Quanten-Holismus" stellt eine besonders häufig zitierte Eigenschaft der Quantenmechanik dar. Er scheint zu zeigen, dass tatsächlich „alles mit allem zusammenhängt", wie es der Volksmund schon länger wusste. Eine wichtige Einschränkung besteht allerdings darin, dass dieses Phänomen nur für speziell präparierte Systeme auftritt, die zudem gegen jeglichen äußeren Einfluss geschützt sein müssen. Schon die Wechselwirkung mit einem einzelnen Photon kann den Effekt zunichtemachen. Für diese speziellen Systeme erscheint der Holismus-Begriff aber nicht unangebracht.

Aber noch einmal zurück zur augenblicklichen Auswirkung der Messung. Widerspricht dieser Effekt nicht der Relativitätstheorie, nach der sich nichts schneller als das Licht bewegen kann? Die Antwort ist ein klares Nein, zumindest was die beobachtbaren Phänomene angeht. Mit der messbedingten Zustandsreduktion lässt sich nämlich kein *Signal*, das heißt keine Information, an das jeweils andere Elektron übertragen und nur für diese stellt die Lichtgeschwindigkeit eine absolute Grenze dar. Die Messung an Elektron 2 – egal ob sie die Eigenschaft weiß oder schwarz anzeigt – gibt schließlich für sich genommen noch keinen Aufschluss darüber, ob Elektron 1 bereits vermessen wurde. Erst durch einen nachträglichen Abgleich lässt sich feststellen, ob eine Korrelation der Messergebnisse vorlag. Für die *Deutung* der Quantenmechanik und den Versuch ihrer konkreten Modellierung stellt die endliche Signalgeschwindigkeit aber ein großes Problem dar, denn wie die Experimente zeigen, wirken sich die Messungen an den einzelnen Elektronen ja tatsächlich über große Distanzen ohne die geringste Zeitverzögerung aus.

Die Macht des Möglichen

Zum Abschluss dieses ersten Teils möchte ich noch ein weiteres quantenmechanisches Phänomen erwähnen, das nicht nur unglaublich klingt, sondern auch praktische Anwendungen hat: Allein die *Möglichkeit* mikroskopischer Systeme, bestimmte Auswirkungen zu zeigen, kann zu experimentell sichtbaren Effekten führen, selbst wenn diese Möglichkeiten überhaupt nicht realisiert wurden.

Das bekannteste Aufbau zu diesem Thema ist das in der folgenden Abbildung dargestellte „Quantum Bomb" Gedankenexperiment. Es enthält „Bomben" (im echten Experiment speziell präparierte Atome), die schon bei Eintreffen eines einzelnen Photons detonieren. Einige von ihnen könnten aber funktionsunfähige Blindgänger sein. Wie lässt sich nun herausfinden, ob eine Bombe funktionstüchtig ist, ohne sie bei dieser Ermittlung explodieren zu lassen und damit unbrauchbar zu machen?

Das klingt nach einer Fangfrage, denn die klassische Antwort darauf ist einfach: Gar nicht, denn jede Interaktion mit dem Lichtteilchen würde sie zur Detonation bringen. In der in Abbildung 14 gezeigten quantenmechanischen Variante ist das aber faszinierenderweise dennoch möglich!

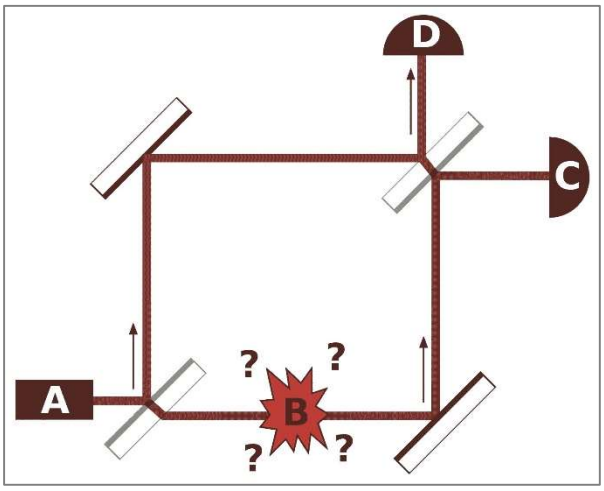

Abb. 14: Das „Quantum Bomb" Gedankenexperiment. Von der Quelle A werden einzelne Photonen durch einen halbdurchlässigen Spiegel in die Anordnung geschickt, die nach dem Durchgang durch einen zweiten halbdurchlässigen Spiegel von den Detektoren C und D aufgefangen werden. Das Ergebnis hängt erstaunlicherweise davon ab, ob sich im unteren Pfad eine funktionsfähige Bombe befindet, selbst wenn diese gar nicht ausgelöst wurde.

Detektor B misst in diesem Aufbau eine konstruktive Interferenz und schlägt daher immer dann an, wenn dem Photon hinter der Photonenquelle A beide Pfade (oben und unten) zur Verfügung stehen, in Analogie zum Auftreffmuster der Elektronen im Doppelspalt-Experiment hinter den beiden geöffneten Spalten (rechte Seite von Abbildung 6). Ohne Bombe oder mit einer defekten Bombe wird daher *immer* Detektor B ausgelöst. Was passiert aber nun bei einer aktiven Bombe? Das Photon nimmt dann entweder den unteren Pfad (50%), um darin samt „Knall" absorbiert zu werden, oder den oberen. Oben würde es mit einer Wahrscheinlichkeit von 50%, also in insgesamt 25% der Fälle, an dem halbdurchlässigen Spiegel oben rechts reflektiert werden, was wieder Detektor C aktiviert. Interessant wird es bei Detektor D. Wie die Experimente zeigen (in dem ursprünglichen Gedankenversuch war es eine Ableitung aus der Theorie der Quantenmechanik), wird er in den verbliebenen 25% der Fälle aktiviert. Seine Ausrichtung führt zu einer Aktivierung bei

destruktiven Überlagerungen der beiden Pfade. Dafür muss das Photon über den oberen Pfad gekommen sein, ohne die *Möglichkeit* zum Durchlaufen des unteren Pfades gehabt zu haben. Die Doppelspalt-Analogie hierfür ist das Ergebnis von Abbildung 5, in dem einer der beiden Spalte geschlossen ist. Eine Reflektion dieses Ergebnisses zeigt, wie merkwürdig es ist. Diese von Detektor D erkannten Fälle sind nur dann möglich, wenn das Photon nicht mit der Bombe interagiert hat (sonst wäre sie explodiert), aber gleichzeitig *von ihrer Möglichkeit zu explodieren* beeinflusst wurde! Ein Blindgänger hätte nämlich stattdessen jedes Mal Detektor C aktiviert. Dieser Effekt ist auch unter dem Oberbegriff „Interaktionsfreie Messung" bekannt.

Es ist eine alte philosophische Frage, ob man *potentielle* Eigenschaften als ebenso real wie tatsächlich realisierte Eigenschaften betrachten sollte, worauf ich in diesem Aufsatz nicht eingehen werde. Aber egal wie man den genauen Ablauf dieses Versuchs auch immer interpretieren mag, bleibt am Ende in Form der herausfilterbaren funktionsfähigen Bomben ein konkretes Ergebnis, das sich in nachprüfbarer Weise von den Vorhersagen der klassischen Physik unterscheidet.

Dieser Effekt lässt sich auch praktisch anwenden, was zum Glück keine Bomben betrifft: Man kann Objekte abbilden, ohne dass die dafür verwendeten Photonen jemals mit dem Fotomotiv in Kontakt standen! In der folgenden Abbildung ist ein solcher tatsächlich durchgeführter Versuch dargestellt.

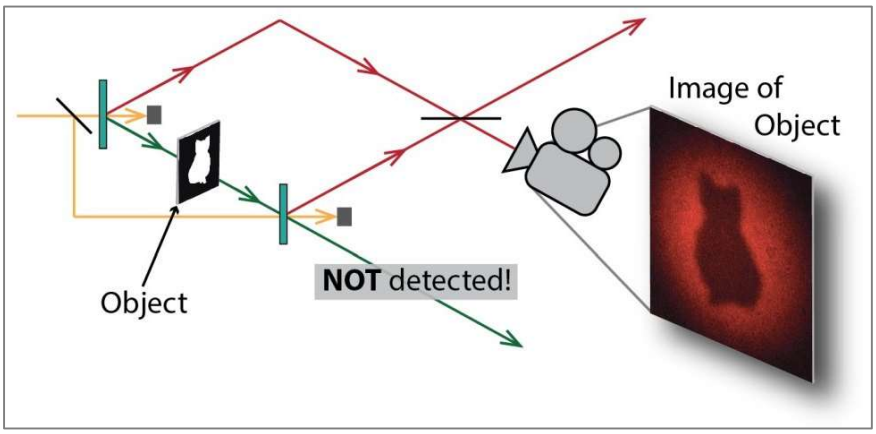

Abb. 15: Ein Foto mit Lichtteilchen, die nicht mit dem abgebildeten Objekt interagiert haben. Das Fotomotiv im grünen Photonenpfad stört die Superposition der Photonenpaare, die vom gelben Pfad im ersten und zweiten Kristall erzeugt werden. Das führt über den roten Pfad zu einer Abbildung mit Photonen, die nicht aus dem grünen Pfad stammen und somit niemals mit dem Objekt in Kontakt standen.

Das klingt unglaublich, ist aber im Grunde nur eine konsequente Weiterführung der oben gewonnenen Erkenntnisse. Dieser Effekt hat auch ein konkretes Anwendungspotential: Er funktioniert auch dann, wenn die Photonen aus dem grünen und roten Pfad vollkommen unterschiedliche Wellenlängen haben, und lässt sich wahrscheinlich auch auf Elektronen und sogar ganze Atome anwenden, was faszinierende neue Bildgebungs-Möglichkeiten eröffnet.

Zwischenfazit: Die Phänomene der Quantenmechanik

Was können wir abschließend zu dem merkwürdigen Verhalten der Welt der kleinsten Teilchen sagen? Wie hoffentlich klar geworden ist, sind die beschriebenen Phänomene nicht einfach einer Theorie entnommen, von der man noch annehmen könnte, dass sie sich irgendwann durch eine „vernünftige" Theorie ersetzen ließe. Sie stellen vielmehr experimentell erfassbare Eigenschaften der Natur selbst dar. Dabei ist diese quantenmechanische Welt, die sich nicht einmal auf subatomare Systeme beschränkt, so mysteriös und fremdartig, dass sie bislang jedem Versuch widerstanden hat, in ein wenigstens halbwegs vertrautes Denkmuster gebracht zu werden. Die Quantenmechanik ist nicht nur unanschaulich – das hätte sie noch mit der Relativitätstheorie und vielen anderen physikalischen Theorien gemeinsam – sondern stellt eine echte Revolution dar, die fundamentale Annahmen wie exakte Messbarkeit, Determinismus, Lokalität und stetige raumzeitliche Wechselwirkungen in Frage stellt – aus Sicht mancher Physiker sogar die Realität der Welt.

Trotzdem ist die Lage nicht hoffnungslos. Im zweiten Teil dieses Aufsatzes möchte ich die überaus erfolgreiche Theorie der Quantenmechanik umreißen und die prominentesten Ansätze für ihre Deutung vorstellen. Die durch sie nahegelegten Weltsichten werden sich dabei allerdings als mindestens ebenso fantastisch wie die hier beschriebenen Phänomene herausstellen.

Es ist daher keine Alternative in Sicht: Unsere bisherige Sichtweise der Welt – wie sehr wir uns auch an sie gewöhnt haben – wird sich radikal ändern müssen. Man darf gespannt sein, wie dieser Umbruch ausgehen wird. Um es mit T. S. Eliot zu sagen:

Not fare well, but fare forward, voyagers!

Bildreferenzen

Abb. 1:
- https://de.wikipedia.org/wiki/Max_Planck#/media/Datei:Max_Planck_(1858-1947).jpg / Autor unbekannt / Public domain
- https://en.wikipedia.org/wiki/Albert_Einstein#/media/File:Einstein_patentoffice.jpg / Autor: The Albert Einstein Archives / Public Domain
- https://de.wikipedia.org/wiki/Niels_Bohr#/media/Datei:Niels_Bohr.jpg / Autor: AB Lagrelius & Westphal / Public domain
- http://www.physics.umd.edu/courses/Phys420/Spring2002/Parra_Spring2002/Images/Physicists_Big/Broglie_Big.jpg Autor unbekannt / Public domain
- https://de.wikipedia.org/wiki/Erwin_Schrödinger#/media/Datei:Erwin_Schrödinger_(1933).jpg / Autor: Nobel foundation / Public domain
- https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Heisenberg,Werner_1926.jpeg / Autor: Friedrich Hund / CC Attribution 3.0 Unported

Abb. 7:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Double-slit_experiment_results_Tanamura_2.jpg
Description: "Results of a double-slit-experiment performed by Dr. Tonomura showing the build-up of an interference pattern of single electrons."
Autor: Belsazar / Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported

Abb. 8:
Autor: Charles Addams (The New Yorker, January 13, 1940, page 13)

Abb. 10:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Katze.jpg
Autor: Sloyment / Creative Commons CC0 1.0 Universal Public Domain Dedication

Abb. 12:
https://www.nasa.gov/feature/jpl/particles-in-love-quantum-mechanics-explored-in-new-study
Autor: NASA/JPL-Caltech / "You may use this material for educational or informational purposes"

Abb. 13:
Quelle: S. Ecker, B. Liu, J. Handsteiner et al: *Strategies for achieving high key rates in satellite-based QKD*. npj Quantum Inf 7, 5 (2021)
Creative Commons Attribution 4.0 International License

Abb. 14:
https://en.wikipedia.org/wiki/Elitzur%E2%80%93Vaidman_bomb_tester#/media/File:E-V_bomb-testing_2.svg
Autor: Gizm0steve / Creative Commons BY-SA 4.0
Inhaltliche Quelle: A. Elitzur and L. Vaidman: *Quantum mechanical interaction-free measurements*, Found Phys 23, 987–997 (1993)

Abb. 15:
https://arxiv.org/abs/2101.02431
Quelle: A. Hochrainer et al: *Quantum Indistinguishability by Path Identity: The awakening of a sleeping beauty*, Jan 2021

Internetfundstücke ohne Quellenangaben:
Abb. 9 (Delayed Choice Experiment), Abb. 11 (Zweiteilchen-System)

Bilder von selbst erstellten Graphiken:
- Abb. 2, 3, 4, 5, 6
- Autor: Friedrich Wagner, www.frwagner.de
- Nutzung via Creative Commons BY-NC-ND 3.0 License