

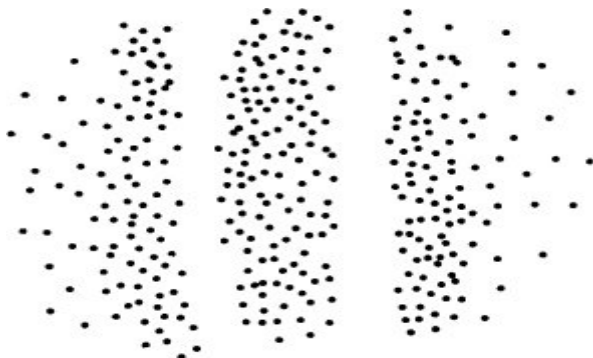
Das Doppelspaltexperiment – Was wirklich geschieht

Das Folgende ist ein Versuch, auf einfachst-mögliche Weise eine *realistische und lokale Interpretation* dessen zu präsentieren, was sich beim Doppelspaltexperiment tatsächlich ereignet. Um klarzustellen, um welche Art von Problemen es dabei geht, scheinen mir die Sätze geeignet, mit denen Richard Feynman, der selbst einige wesentliche Beiträge zur Quantenmechanik geleistet hat, seine Beschreibung des Experiments einleitet:

"In this chapter, we shall tackle immediately the basic element of the mysterious behavior in its most strange form. We choose to examine a phenomenon which is impossible, absolutely impossible, to explain in any classical way, and which has in it the heart of quantum mechanics. In reality, it contains the only mystery. We cannot explain the mystery in the sense of 'explaining' how it works. We will 'tell' you how it works. In telling you how it works we will have told you about the basic peculiarities of all quantum mechanics." (Feynman, Leighton, Sands, Lectures on Physics Vol. 1, 37–2, Addison-Wesley 1965)

Da es schon tausende Darstellungen des Experiments gibt, werde ich mich bei meiner Beschreibung auf das absolute Minimum an Fakten beschränken und technische Details zunächst völlig außer Acht lassen.

Wir schießen einzelne Elektronen aus einer "Elektronenkanone" durch einen Doppelspalt. Dabei stellen wir sicher, dass in der Versuchsanordnung jeweils nur ein einziges Elektron unterwegs ist. Hinter dem Doppelspalt befindet sich eine Detektorplatte, die das Auftreffen eines Elektrons durch einen schwarzen Punkt anzeigt. Nach einiger Zeit beobachten wir auf der Detektorplatte das folgende Muster:



Es gibt also *Interferenz*, und daraus folgt, dass das Elektron sich bei seinem Durchgang durch den Doppelspalt *wellenartig* verhalten haben muss, da aufeinanderfolgende *Teilchen* dieses Muster nicht erzeugen können. Die beobachtbare Folge des Erscheinens eines Elektrons auf der Detektorplatte – der schwarze Punkt – ist jedoch nur dadurch zu erklären, dass das Elektron, das dort aufgetroffen ist, nun wieder *teilchenartig* ist. Der formale Zusammenhang zwischen der Welle und dem beobachteten Teilchen ist ganz einfach: die Wahrscheinlichkeit, dass das Teilchen an einer bestimmten Stelle auftritt, ergibt sich aus dem Quadrat der Wellenamplitude an dieser Stelle.

Mathematisch ist also alles klar: Wir bestimmen die Gleichung der Welle und berechnen die Wahrscheinlichkeiten. Aber können wir auch *verstehen*, was sich da ereignet?

Was ist mit der Welle, nachdem das Elektron erschienen ist? Da ja nur *ein* Elektron unterwegs war und wir nun *ein* Elektron gemessen haben, muss die Welle danach offenbar verschwunden sein. Aber wie ist das möglich? Da ihr Amplitudenquadrat die Wahrscheinlichkeit des Erscheinens des Elektrons ergibt, muss die Welle ja irgendetwas mit diesem Ereignis zu tun haben – irgendwie scheint sie es ausgelöst zu haben. Wir fühlen uns also eigentlich genötigt, ihr *Existenz* zuzuschreiben, umso mehr, als ja auch die Interferenz darauf hinweist, dass da *etwas* existiert, *was*

interferiert – aber an der Annahme der Existenz der Welle hindert uns wiederum ihr Verschwinden. Außerdem sind wir ganz grundsätzlich mit der Frage konfrontiert, **wie** und **warum** es überhaupt zu diesem eigenartigen Übergang von der Welle zum Teilchen kommt.

Hören wir, was die Väter der Quantentheorie dazu sagen.

Nils Bohr: "There is no quantum world. There is only an abstract quantum mechanical description. It is wrong to think that the task of physics is to find out how Nature *is*. Physics concerns what we can say about Nature." (A. Petersen, Bulletin of the Atomic Scientist 19, 12 (1963))

Werner Heisenberg: "In the experiments about atomic events we have to do with things and facts, with phenomena that are just as real as any phenomena in daily life. But the atoms or the elementary particles are not as real; they form a world of potentialities or possibilities rather than one of things or facts." (Physics and Philosophy, p. 160, Allen and Unwin, London (1958))

Es verdient hervorgehoben zu werden, dass Bohrs und Heisenbergs Äußerungen die Sachlage nicht im geringsten klären. Es sind einfach Rückzugspositionen. Ich ziehe Richard Feynman's Standpunkt vor, der die Dinge beim Namen nennt und nichts beschönigt:

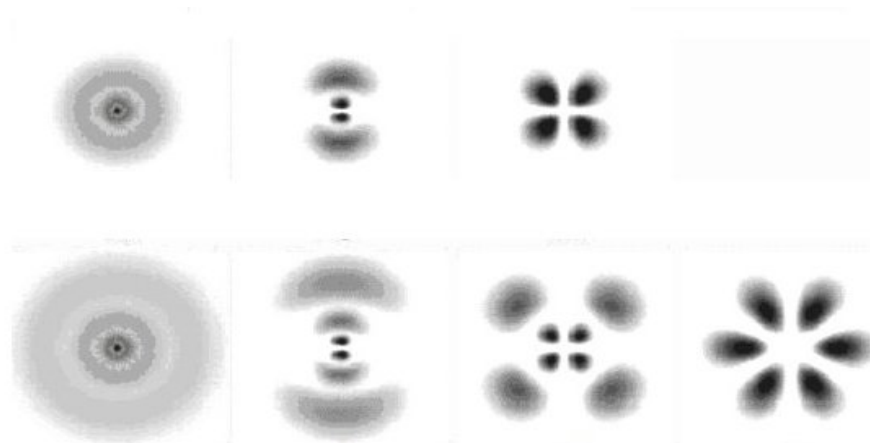
"I think it is safe to say that no one understands quantum mechanics. Do not keep saying to yourself, if you can possibly avoid it, 'but how can it be like that?' because you will go 'down the drain' into a blind alley from which nobody has yet escaped. Nobody knows how it can be like that." (Richard Feynman, The Character of Physical Law, Penguin 1992, p. 129)

Auch heute, nach hundert Jahren Quantenmechanik, gibt es noch immer Physiker, Philosophen und interessierte Laien, die sich mit der Frage quälen: *Wie ist das möglich?* Aber eigentlich ist es ein *cold case*. Da ja alles zufriedenstellend funktioniert, haben sich fast alle Physiker auf einen pragmatischen Standpunkt zurückgezogen. Wer dennoch weiter fragt, kann zwischen etlichen "möglichen Welten" wählen, die seit der Einführung der Quantenmechanik vorgeschlagen wurden. Da aber keine dieser Welten die Probleme auch nur ansatzweise löst, verzichte ich darauf, sie vorzustellen. Nur eine einzige will ich erwähnen, aber eigentlich nur deshalb, weil ich ein Fan von *Fantasy* bin: die sogenannte Vielweltentheorie. Hier verschwindet die Welle nicht, sondern es wird angenommen, dass im Augenblick der Messung (wie auch immer man diesen Zeitpunkt bestimmen mag) das Universum sich in genau so viele fast identische Kopien seiner selbst aufspaltet, wie es mögliche Messergebnisse gibt. Die Varianten des Universums unterscheiden sich dann voneinander nur hinsichtlich dieses Ergebnisses. (Das wichtigste Element der quantenmechanischen Darstellung, die *Wahrscheinlichkeit*, geht bei diesem skurrilen Vorschlag allerdings verloren.)

Jetzt aber Schluss mit der Beschreibung des *Status quo* – auch wenn er zugegebenermaßen ziemlich unterhaltsam ist. Wenden wir uns nun, wie angekündigt, unserer eigentlichen Aufgabe zu, der

Antwort auf die Frage: Was geschieht wirklich beim Doppelspaltexperiment?

Beginnen wir mit der "Elektronenkanone". "Abschuss eines Elektrons" heißt: aus einer *Elektronenhülle* löst sich ein Elektron. Was ist eine Elektronenhülle? Hier einige Bilder:



Die abgebildeten Elektronenhüllen werden *Orbitale* genannt. Es sind Zustände von Atomen. (Wer mehr darüber erfahren und schönere Bilder sehen möchte kann z.B. [auf Wikipedia](#) oder auch [hier](#) nachlesen.)

Damit sind wir bereits zu demjenigen Sachverhalt gelangt, der im Zentrum der Erklärung steht:

Bei den obigen Bildern handelt es sich offenbar um *Schwingungszustände einer Kugel*.

(Die Grauwerte entsprechen den Quadraten der Wellenamplituden.)

Das bedeutet: **Elektronenhüllen SIND dreidimensionale stehende Wellen.**

In der Standardinterpretation werden die abgebildeten Strukturen als "Dichteverteilungen" bezeichnet, d.h. das Amplitudenquadrat der Welle ergibt die Wahrscheinlichkeit, dass sich dort ein (punktförmiges) Elektron befindet. (Genau wie bei der laufenden Welle nach dem Doppelspalt.)

Wenn sich ein "Elektron ablöst", dann bleibt ein Zustand mit einer Knotenfläche weniger zurück. Aus unserer Sicht bedeutet das: *ein Teil der **stehenden** Welle hat sich gelöst und ist nun als **laufende** Welle unterwegs.*

Wie geht es weiter? Die Elektronenwelle durchquert den Doppelspalt und macht dann, wie erwartet, genau das, was Wellen tun: sie läuft auseinander und interferiert mit sich selbst. Danach trifft sie auf die Detektorplatte.

Die Detektorplatte ist aber wiederum nichts anderes als die Ansammlung einer ungeheuren Zahl von Objekten der Art, wie sie in der Skizze oben abgebildet sind. Die *laufende Elektronenwelle* trifft also überall dort, wo ihre Amplitude nicht Null ist, auf eine *stehende Elektronenwelle*.

Und dann? Ganz einfach: dann addiert sich die ankommende laufende Welle zu den lokalen stehenden Wellen.

Um nun verstehen zu können, was weiter geschieht, müssen wir uns kurz ein wenig mit stehenden Wellen beschäftigen. Betrachten wir etwa stehende Luftwellen in einem Rohr. Sie können nur in einer diskreten Folge von Zuständen existieren, nämlich in genau denjenigen, bei denen die Länge des Rohrs ein ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge ist. Mit dem Rohr können daher nur bestimmte Töne erzeugt werden, der sogenannte Grundton und die zugehörigen Obertöne. Wenn man also beispielsweise das Rohr so anbläst, dass der vierte Oberton zu hören ist und dann die Lippenspannung allmählich erhöht, dann wird der hörbare Ton nicht etwa auch allmählich höher, sondern er "springt" plötzlich um eine kleine Terz nach oben, also auf den fünften Oberton. *Bis dahin muss sich die stehende Welle im Rohr aufgrund der veränderten Anregungsbedingungen – der zunehmenden Lippenspannung – zwar schon verändert haben, aber die Zahl der Wellenlängen und Knotenflächen ist gleich geblieben.* Erst nach dem Sprung hat die Welle im Rohr einen Schwingungsbereich (eine halbe Wellenlänge) und eine Knotenfläche *mehr* als vorher.

Dasselbe erwarten wir also auch bei stehenden Elektronenwellen (den Orbitalen), d.h. wir nehmen an, dass sie nur in einer diskreten Folge von Zuständen existieren, die durch die Anzahl und Art der Schwingungsbereiche (bzw. der zwischen diesen Bereichen liegenden Knotenflächen) definiert sind, und erst wenn sich die Anregungsbedingungen über ein bestimmtes Maß hinaus verändern, oder sagen wir: wenn eine gewisse Grenze überschritten ist, dann wird die stehende Elektronenwelle in den nächsten Zustand – denjenigen mit einem Schwingungsbereich und einer Knotenfläche *mehr* – "springen" – eben genauso wie das beim Anblasen des Rohrs der Fall ist.

Wenden wir uns nun wieder dem Doppelspaltexperiment zu. Nehmen wir der Einfachheit halber an, dass die stehenden Elektronenwellen, auf die die laufende Elektronenwelle trifft, alle *im selben Zustand* sind, dass also die Anzahl und Art ihrer Knotenflächen bei allen gleich ist. Bedeutet das nun auch, dass die stehenden Elektronenwellen alle *identisch* sind? Keineswegs! Es bedeutet nur, dass sie sich zwischen den Grenzen zum nächsthöheren bzw. nächstniedrigeren Schwingungszustand befinden. Manche werden nahe an der unteren Grenze sein, viele im mittleren Bereich,

etliche aber auch so nahe an der oberen Grenze, dass schon ein geringer Anstoß genügt, um sie zum "Sprung" in den nächsthöheren Zustand zu veranlassen.

(Genau dasselbe ist der Fall, wenn wir eine große Zahl gleicher Töne aus identischen Rohren hören. Wie wir zuvor festgestellt haben, folgt ja aus der Gleichheit der Töne keineswegs, dass auch die Wellen gleich sind. Manche werden nahe daran sein, in den nächstniedrigeren Oberton zu kippen, andere wiederum werden nahe am nächsthöheren Oberton liegen. Die stehenden Wellen in den Rohren stimmen also zwar in der Anzahl ihrer Knoten überein – sie sind (sozusagen) alle "im selben Zustand" – aber sie sind nicht identisch.)

Jetzt sind wir hinreichend darauf vorbereitet, zu verstehen, was sich ereignet:

Die ausgedehnte laufende Elektronenwelle trifft auf die stehenden Elektronenwellen, die auf der Oberfläche der Detektorplatte angeordnet sind. Die Amplitude der laufenden Welle ist überall sehr klein – es ist ja nur ein einziges "Elektron" unterwegs, aber vielleicht ist eine der stehenden Elektronenwellen so nahe an der Grenze zum nächsthöheren Zustand, dass der winzige Anstoß durch die laufende Welle ausreicht, um den "Sprung" in diesen Zustand auszulösen. In der üblichen Sichtweise würde das bedeuten: ein "Elektron" ist erschienen.

Was ist mit dem Rest der laufenden Welle? Nun, sie verschwindet natürlich nicht, sondern addiert sich zu all den anderen stehenden Elektronenwellen. Zwar reicht das für einen "Sprung" noch nicht aus, aber es bringt alle diese Wellen näher an die Sprunggrenze heran und erhöht dadurch die Wahrscheinlichkeit für das "Erscheinen eines Elektrons" beim Auftreffen der nächsten Welle oder irgendeiner später folgenden Welle.

Damit sind wir nun ans Ende unserer Erklärung gelangt, und es ist Zeit für einige Anmerkungen und ein erstes, kurzes Resümee.

Der Vorteil des soeben präsentierten Szenarios ist offenbar, dass es völlig frei von all den Absurditäten ist, die sowohl in der Standardinterpretation als auch bei allen Alternativ-Varianten unvermeidlich sind. Außerdem lässt sich das Erklärungsschema verallgemeinern und führt direkt zu einer [lokalen und realistischen Interpretation der Quantenmechanik](#). (Das stimmt mit der oben erwähnten Aussage Feynmans zum Doppelspaltexperiment überein: "... which has in it the heart of quantum mechanics. In reality, it contains the only mystery.")

Einer lokalen Interpretation scheint jedoch der Bellsche Beweis der Nichtlokalität im Weg zu stehen. Es lässt sich aber ganz einfach zeigen, dass dieser [Beweis nicht mehr durchführbar](#) ist, wenn das Erklärungsschema des Doppelspaltversuchs auf das sogenannte Einstein-Podolski-Rosen-Szenario übertragen wird.

Das Modell der "Elektronenhülle", das meiner Erklärung zugrunde liegt, ist allerdings unvollständig. Es fehlen vor allem zwei wichtige Elemente der quantenmechanischen Darstellung: Bahndrehimpuls und Spin. Der Bahndrehimpuls lässt sich mit Hilfe der Vorstellung ergänzen, dass die in der Skizze abgebildeten Kugelwellen in Drehung versetzt werden. Die Integration des Spins erfordert eine etwas aufwendigere Analyse. Eine geometrische Rekonstruktion des quantenmechanischen Atommodells habe ich im *Begriff der Wirklichkeit* durchgeführt ([hier](#) nachzulesen).

Ist meine Erklärung des Doppelspaltexperiments mit dem bewährten Formalismus der Quantenmechanik kompatibel? Die Antwort ist *ja*. Die quantenmechanische Voraussage, dass die Häufigkeit der detektierten Elektronen proportional zum Amplitudenquadrat der Welle ist, die die Detektorplatte erreicht, bleibt offenbar erhalten.

Für eine vollständige realistische Interpretation des Geschehens beim Doppelspaltversuch müssen noch folgende Fragen geklärt werden: *Was schwingt bei Elektronenwellen?* und, da der Versuch auch mit "Photonen" durchgeführt werden kann (wobei die Erklärung jedoch gleich bleibt): *Was schwingt bei Photonen?* Ferner: *Was haben Lichtwellen und Elektronenwellen gemeinsam, was unterscheidet sie?* Hier kann ich darauf nicht eingehen. Für die gewünschten Antworten muss eine weite gedankliche Reise unternommen werden, zurück bis zum Ursprung alles Seienden; Erst aus

der fundamentalen Gleichung, die den Prozess beschreibt, der die Wirklichkeit hervorbringt, lassen sich die dafür notwendigen Schlüsse ziehen.

Seit ich meine Erklärung des Doppelspaltversuchs gefunden habe, hat mich die Frage beschäftigt, warum es diese Erklärung – die ich vom ersten Augenblick an für so einfach und selbstverständlich hielt, dass sie mir fast unabweisbar schien – bisher noch nicht gab. Die Schwierigkeiten, die sich ihr in den Weg stellen, sind doch den Absurditäten der üblichen Interpretation bei weitem vorzuziehen!

Ich glaube, dass der Grund für ihr Fehlen vor allem in der Art liegt, wie die Physik sich entwickelt hat. Die Newtonsche Physik beruhte fast ausschließlich auf der Vorstellung von Teilchen, die miteinander wechselwirken. Diese Vorstellung war so dominant, dass z.B. Christiaan Huygens große Schwierigkeiten hatte, sich mit seinem Beweis für die Wellennatur des Lichts durchzusetzen. Als sich schließlich neben der Teilchenmathematik doch die Wellenmathematik gleichberechtigt etabliert hatte, stieß man bei der Beschreibung der Wechselwirkung von Wellen (Licht) und Teilchen (Elektronen) auf Probleme. Die Lösungen, die Einstein und Compton fanden, führten dann zum sogenannten Welle-Teilchen-Dualismus, der die Grundlage der gegenwärtigen Interpretation bildet. (Ich habe diese Wechselwirkung auf Basis der hier präsentierten Modellvorstellung beschrieben und bin zu denselben Ergebnissen gelangt wie Einstein und Compton (siehe [hier](#) und [hier](#))).

Die Teilchenvorstellung ist also aus der Physik kaum wegzudenken. Tatsächlich ist der Teilchenbegriff jedoch völlig vage. Seine einzigen beiden klaren Charakteristika sind *Diskretheit und räumliche Begrenztheit* der Ereignisse – das sind aber genau die Eigenschaften stehender Wellen und der Übergänge zwischen ihren Zuständen. (Messereignisse sind *immer* solche Übergänge!)

Schließlich ist es aber wohl auch unser alltägliches Welterleben, das uns die Teilchenvorstellung suggeriert. Wir leben in einer Welt von Objekten, die sich uns überwiegend als feste Körper präsentieren. Der erste Weg in die Abstraktion führt also fast zwangsläufig zur Annahme von "Teilchen" als Basis der Wirklichkeit.

Auch die übliche Art der Präsentation des Doppelspaltexperiments steht ganz im Bann dieser Suggestion. Die Modellvorstellung: "Ein Elektron wird erzeugt, durchquert den Doppelspalt, verhält sich dabei irgendwie wellenartig und erscheint schließlich auf der Detektorplatte" entspricht im Grunde der Vorstellung eines Ballwurfs: "A wirft einen Ball, dann fliegt der Ball eine Zeitlang, schließlich fängt B ihn auf" – natürlich abgesehen davon, dass der Ball, anders als das Elektron, immer ein Ball bleibt und nicht unterwegs vorübergehend in einen wellenartigen Zustand übergeht.

Vom hier eingenommenen Standpunkt aus ist diese Modellvorstellung vollkommen ungeeignet. Schon das Verständnis des Elektrons als "Objekt" ist problematisch: ist der Schwingungsbereich einer stehenden Welle, der sich zwischen zwei Knotenflächen befindet, ein Objekt? Es mag irgendwie gerechtfertigt oder zumindest verständlich erscheinen, ihn als Objekt aufzufassen, und dasselbe gilt für die nach dem Doppelspalt auseinander laufende Welle, die dann das "Elektron" repräsentiert. Aber es ist völlig falsch, anzunehmen, dass das *gemessene Elektron* in irgendeinem Sinn *dasselbe Elektron* ist wie dasjenige, das kurz zuvor erzeugt worden ist: Unseren Annahmen zufolge ist die laufende Elektronenwelle zwar die Ursache dafür, dass irgendwo auf der Detektorplatte eine stehende Elektronenwelle in den nächsthöheren Zustand springt, aber der Anteil, den die laufende Welle am dort neu entstandenen Schwingungsbereich hat, ist verschwindend gering.

Kurz gesagt: Das erzeugte Elektron *ist nicht* das gemessene Elektron.

Heinz Heinzmann

Wien, Juli 2021