

## 23 Hier fliegt nichts

Ein »Paradoxon« ist nur ein Konflikt zwischen der Wirklichkeit und Ihrem Gefühl, wie die Wirklichkeit »sein sollte«.<sup>1</sup>

*Richard P. Feynman, Physiker*

Was zeichnet den *Doppelspaltversuch* aus? Und warum ist er so geeignet, uns das Wesen der Quantentheorie vor Augen zu führen? Zum einen, weil wir dazu keine komplizierten Messapparaturen benötigen, sondern erst einmal nur unsere Augen. Zum anderen zeigt er uns klar, dass die Quantenwelt sich radikal anders verhält, als wir es gewohnt sind. Er vermittelt uns mit fast minimalistischem Aufwand einen direkten Blick auf die Gesetzmäßigkeiten der Quantentheorie.

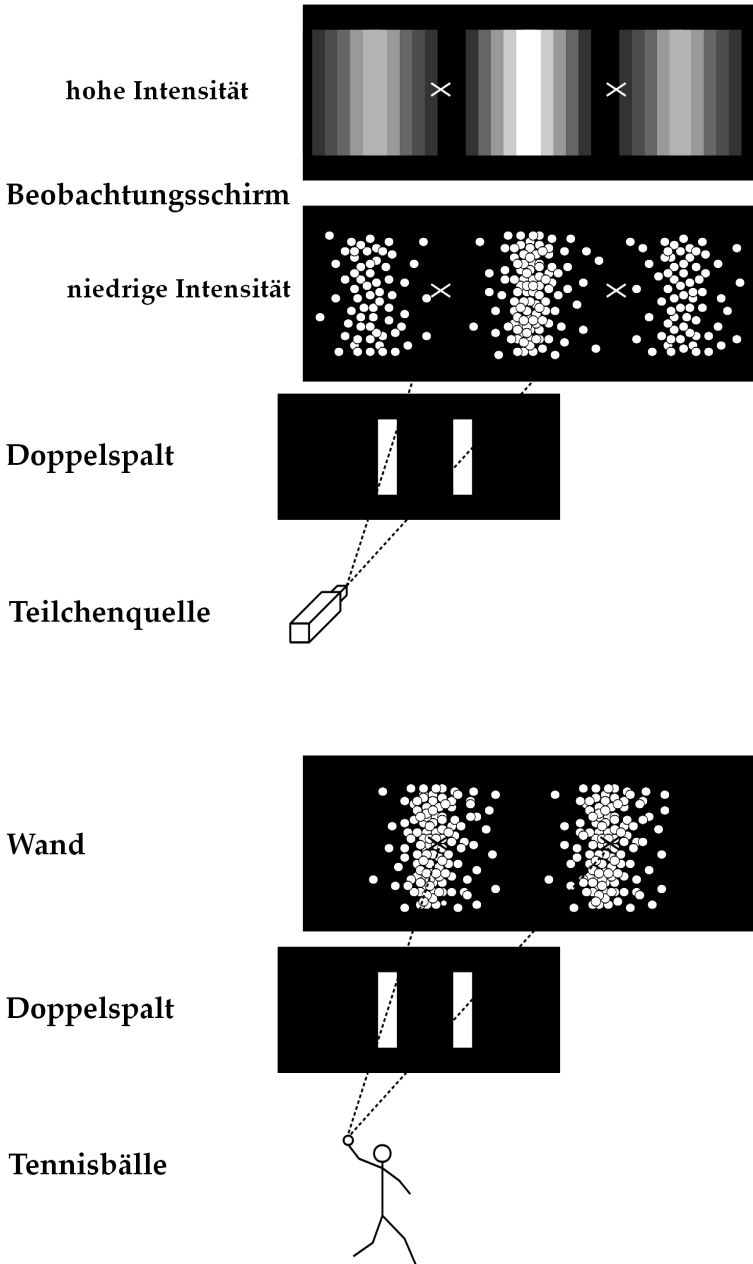
Wir beginnen unseren Versuch genauso wie in Kapitel 6 und ändern ihn dann schrittweise ab. Zwei nebeneinanderliegende Spalte in einer Wand werden von einer Lichtquelle beleuchtet, die möglichst Licht einer einzigen Wellenlänge abgibt (Abbildung 9 auf Seite 44 und Abbildung 44). Wir verwenden dafür heutzutage einen Laser, dessen Intensität wir über die Lichterzeugung und mithilfe von Filtern über einen weiten Bereich sehr fein regeln können. Das Licht, das die Spalte passiert, erzeugt auf einem dahinterliegenden Beobachtungsschirm ein charakteristisches Überlagerungsmuster, das man auch *Interferenzmuster* nennt.

Dieses Muster besteht aus einem hellen Streifen in der Mitte und weniger hellen Streifen am Rand, die zur Seite hin schnell dunkler werden. In den Abbildungen habe ich jeweils nur das sogenannte Hauptmaximum in der Mitte und die ersten Nebenmaxima am Rand eingezeichnet. Alle weiteren Streifen habe ich vernachlässigt. Streng genommen aber setzt sich dieses Muster immer weiter fort, wobei die Helligkeit der Streifen bald unsere Nachweisgrenze erreicht. Die Lage der Streifen auf dem Schirm hängt von der verwendeten Wellenlänge ab, vom Abstand der Spalte untereinander und vom Abstand der Spalte zum Schirm.

Wenn man diese Größen geeigneten wählt, so kann erhält man einen Versuchsaufbau, bei dem sich die ersten dunklen Streifen genau dort zeigen, wo das Licht auf seinem direkten Weg durch einen Spalt auf dem Schirm treffen würde (Abbildung 44 ganz oben). Hier fällt nahezu kein Licht auf den Beobachtungsschirm, obwohl sich die dunklen Streifen von der Lichtquelle aus gesehen in direkter Linie hinter den Spalten befinden. Der Schirm bleibt dort dunkel, obwohl man vom Strahlen-

---

<sup>1</sup> Eigene Übersetzung, Original: The »paradox« is only a conflict between reality and your feeling of what reality »ought to be«.



44 Doppelspaltversuch mit einer Teilchenquelle (Laser, Elektronen, Atome, Moleküle) und mit Tennisbällen. Die Teilchenquelle wird wahlweise mit hoher und niedriger Intensität betrieben. Die Kreuze markieren den direkten Weg durch die Spalte.

gang her auf den ersten Blick erwarten könnte, dass er stattdessen hell erleuchtet sein müsste.

Dasselbe Überlagerungs- oder Interferenzmuster erhält man übrigens auch, wenn man Wasserwellen statt Licht durch entsprechende Spalte schickt. Dies kann man sich folgendermaßen vor Augen führen: Wir ersetzen unsere Lichtquelle durch gleichmäßige Meereswellen, die auf eine breite Mauer treffen. Diese Mauer habe zwei enge Öffnungen von etwa einem Meter Breite und einem Abstand von vielleicht 10 Metern. Diese Öffnungen entsprechen unseren Spalten beim Doppelspaltversuch. Die Mauer soll bis auf die Öffnungen einen kleinen Jachthafen völlig umschließen.

Zu Anfang unseres Versuchs sind die Öffnungen geschlossen, weshalb das Wasser in dem Hafenbecken völlig ruhig ist. Öffnen wir nun diese Spalte, so werden die Wellen in das Becken eindringen und das Wasser in Bewegung versetzen. Ausgehend von beiden Spalten bilden sich Wellen innerhalb des Beckens aus, die schließlich auch an der gegenüberliegenden Kaimauer ankommen. Dort schwappt das Wasser nach einer gewissen Zeit ebenfalls gleichmäßig auf und ab. Diese Mauer entspricht unserem Beobachtungsschirm und die dortige Wellenhöhe der Lichtintensität auf dem Schirm. Nun messen wir die Wellenhöhe an verschiedenen Punkten der Mauer und zeichnen sie in ein Diagramm. Für eine große Wellenhöhe verwenden wir die Farbe weiß, für mittlere Wellenhöhen grau und für nicht vorhandene Wellen schwarz. Auf diese Weise erhalten wir genau dasselbe Streifenmuster wie im Versuchslabor mit dem Doppelspalt und dem Laser.

Die Erklärung für das Interferenzmuster bei unserem Wasserwellenversuch ist relativ einfach: Von den beiden Öffnungen ausgehend breiten sich Wellen ringförmig innerhalb des Beckens aus. Immer dort, wo Wellenberge und Wellentäler aus beiden Öffnungen aufeinandertreffen, so verstärken sich die Wellen. Hier ist die Wellenhöhe an der Mauer am höchsten, und hier befinden sich auch die hellen Streifen. Wo sich dagegen ein Wellenberg und ein Wellental begegnen, löschen sich beide gegenseitig aus. Dort bleibt das Wasser an der Mauer ruhig, und hier sind wir mitten in einem dunklen Streifen.

Nach all diesen Bemerkungen über Wasserwellen bei einem ähnlichen Experiment sieht es also ganz danach aus, als ob sich Licht in einem Doppelspaltversuch genauso verhält wie eine Welle. Die Berge und Täler dieser Wellen können sich scheinbar ebenso verstärken und abschwächen wie bei Wasserwellen.

Wir erleben allerdings die erste Überraschung, wenn wir die Intensität unseres Lasers stark dämpfen und gleichzeitig die Empfindlichkeit des Lichtnachweises extrem steigern. Mit den gängigen Methoden können wir nun einzelne Photonen nachweisen, wenn sie auf den Beobachtungsschirm treffen. Für unsere Augen erscheint der Schirm zwar nun dunkel, aber wenn wir die Aufschlagorte der Photonen in einer Grafik auftragen, so ergibt sich nach wie vor dasselbe Interferenz-

muster. Stets werden aber auf dem Beobachtungsschirm nur Photonen nachgewiesen, deren Energie genau der Wellenlänge des Lasers entspricht. Nie ist diese Energie kleiner oder größer. Wir messen auf dem Schirm also immer exakt die gleichen Objekte und nicht etwa die Höhe einer Welle. Diese Objekte können wir daher auch als Teilchen bezeichnen. Auf dem Beobachtungsschirm werden also immer *Teilchen* registriert, deren Gesamtverteilung allerdings wie die einer *Welle* aussieht (Abbildung 44 oben).

Was ist Licht aber nun? Passieren Teilchen oder Wellen den Doppelspalt? Und welche Art von Wellen wäre das, wenn wir doch immer nur dieselben Teilchen nachweisen? Man könnte nun vermuten, dass die Photonen, die durch die verschiedenen Spalte fliegen, sich dahinter auf eine unbekannte Art und Weise überlagern und dabei das Wellenmuster erzeugen. Um diese Annahme zu testen, drosseln wir die Lichtintensität so weit, dass sich durchschnittlich weniger als ein Photon in der gesamten Apparatur befindet. Nun sollte sich jedes Photon einzeln und ungestört durch den Raum bewegen und entweder den einen oder den anderen Spalt passieren. Eine Überlagerung mit einem anderen Photon ist nun ausgeschlossen, und das Interferenzmuster müsste verschwinden. Es sollte sich eine Verteilung ergeben, als wenn wir mit weißer Farbe getränkte Tennisbälle durch zwei Spalte auf eine schwarze Wand werfen. Jeder Ball durchfliegt eine der beiden Öffnungen und hinterlässt direkt dahinter einen Farbkleck (Abbildung 44 unten).

Doch das Interferenzmuster bleibt bestehen und verschwindet auch bei einzelnen Photonen nicht. Nach dem Einschalten des Lasers dauert es zwar eine ganze Weile, bis es sich ausbildet, aber es hat immer noch genau dieselbe Form wie zu Beginn unseres Versuchs. Wie aber können einzelne Photonen ein Überlagerungsmuster erzeugen? Einzelne Teilchen verursachen hier ein Interferenz- oder Wellenmuster, zeigen sich aber immer nur als Teilchen. Oft wird an dieser Stelle in Büchern etwas vorschnell behauptet, dass Licht eben eine Teilchen- und eine Wellennatur in sich vereint. Aber wie lässt sich dies am besten veranschaulichen und verstehen? Bevor wir uns dazu eine umfassende Antwort erarbeiten, wandeln wir unseren Versuch erneut ab.

Der Doppelspaltversuch ist nicht nur mit Licht, sondern auch mit Elektronen, Atomen und Molekülen durchgeführt worden. Dabei zeigt sich *keine* prinzipielle Abweichung von den Ergebnissen, die mit Licht erzielt wurden. Auch Elektronen, die auf zwei Spalte geschossen werden, bilden ein Interferenzmuster auf dem Beobachtungsschirm aus. Ebenso Moleküle, die aus immerhin 60 Kohlenstoff- und 48 Fluoratomen bestehen. Und auch hier ist das Muster nicht davon abhängig, wie viele Teilchen sich jeweils innerhalb der Anordnung befinden. Nicht nur Licht, sondern auch Elektronen, Atome und Moleküle bilden ein Wellenmuster aus. Licht ist keine Ausnahme, sondern die Regel, denn unsere gesamte Materie beinhaltet gleichzeitig einen Teilchen- und Wellencharakter. Aber wie macht sie das?

Ein Blick auf die Gleichungen der Quantentheorie zeigt, wie man sich dies vorstellen kann. Von Richard Feynman stammt eine mathematische Formulierung der Quantentheorie, die besagt, dass jedes Teilchen beim Doppelspaltversuch gleichzeitig *alle* möglichen Wege nimmt. Es passiert *beide* Spalte und überlagert sich dahinter mit sich selbst. Tatsächlich sind dabei beliebig krumme und verschnörkelte Wege zugelassen, die alle zu dem Muster beitragen. Dies klingt zwar auf den ersten Blick nicht besonders glaubhaft, aber wenn man diesen Formalismus durchrechnet, so erhält man tatsächlich das korrekte Ergebnis. Und dies nicht nur für den Doppelspaltversuch, sondern für alle Versuche, die mit der Quantentheorie zu tun haben.

Durchfliegen demnach die Teilchen alle möglichen Wege und treffen doch am Ende nur an einem einzigen Ort auf den Schirm? Wie sollen wir uns solch einen Flug vorstellen? Wie kann *ein* Teilchen durch *zwei* Spalte fliegen? Wenn Sie versuchen, sich dies bildhaft klarzumachen, so wird es Ihnen vermutlich genauso ergehen wie mir. Ich war nicht in der Lage zu sehen, wie das gehen sollte, und hatte einen Knoten im Hirn, der mir sagte, dass ich etwas ganz Fundamentales nicht verstanden hatte.

Wir können genau messen, dass ein Elektron in Richtung der Spalte ausgesendet wird, und wir weisen es anschließend auf dem Beobachtungsschirm wieder nach. Dazwischen befinden sich zwei Spalte, die seinen Weg einschränken. Viele Elektronen, die hintereinander hindurchgeschickt werden, produzieren zusammengekommen jedoch ein Interferenzmuster. Doch wie verhalten sich die Elektronen dazwischen, im Bereich der Spalte?

Um dies zu klären, installieren wir an jeden Spalt einen kleinen Elektronendetektor. Spricht einer der Detektoren an, so wissen wir, dass ein Elektron gerade den entsprechenden Spalt durchflogen hat. Schlagen beide Detektoren an, so hätte sich das Elektron irgendwie geteilt und beide Spalte passiert. Tatsächlich jedoch wird ein Elektron jedoch immer nur von *einem* Detektor registriert und niemals von beiden. Ein Elektron in unserem Versuch ist und bleibt *ein* Elektron, ein unteilbares Teilchen. Und dieses teilt sich nicht plötzlich vor den Spalten in zwei auf, die sich dahinter wieder vereinigen.

Doch nun erwartet uns die nächste Überraschung: Das Interferenzmuster ist verschwunden. An seine Stelle ist das einfache Muster getreten, das wir beim Werfen von Tennisbällen erhalten würden (Abbildung 45). Das Wellenmuster ist durch ein Muster ersetzt worden, wie es fliegende Teilchen erzeugen, die direkt hinter den Spalten auf den Schirm treffen.

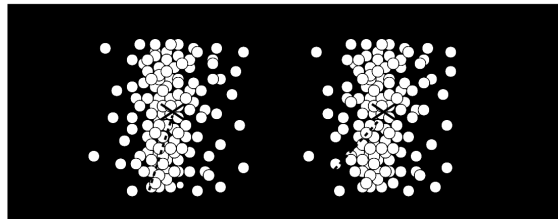
Wie kann es aber sein, dass sich die Verteilung der Teilchen auf dem Beobachtungsschirm komplett ändert, wenn wir feststellen, wo die Elektronen entlang geflogen sind? Irgendwo müssen sie sich ja schließlich befinden und somit den einen oder anderen Spalt passieren? Jedenfalls sagt uns das unser gesunder Menschenverstand. Doch Vorsicht: Dieser Verstand ist durch unsere Alltagswelt geprägt

und nicht durch das Verhalten atomarer Teilchen. Wir müssen irgendwo einen gewaltigen Denkfehler machen, aber wo?

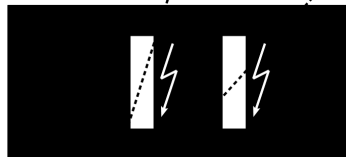
Auch bei diesem Versuchsaufbau stellt sich heraus, dass wir bei Licht, Elektronen, Atomen und Molekülen jeweils dieselben Ergebnisse erhalten. Immer, wenn wir feststellen, welchen Weg die Teilchen durch die Spalte genommen haben, verschwindet das Interferenzmuster und wird durch ein Teilchenmuster ersetzt. Dabei ist es völlig egal, mit welchem Verfahren wir den Weg der Teilchen ermitteln. Wichtig ist lediglich, dass wir seinen Weg identifizieren und damit den Spalt, den es durchquert. Verwandelt sich dabei eine irgendwie geartete Welle plötzlich in ein Teilchen, wenn wir es am Ort der Spalte nachweisen? Und wieso verändert dieser Nachweis das Versuchsergebnis so grundlegend? Wo lassen wir uns bei unseren Überlegungen irreleiten und denken in die falsche Richtung? Was geschieht hier eigentlich?

Damit wir uns die volle Tragweite dieses Versuchs bewusst machen können, müssen wir zunächst festlegen, was wir überhaupt unter einem Geschehen verstehen wollen. Ein Geschehen kann direkt mit bloßem Auge beobachtet werden oder von einem Messinstrument registriert werden. In jedem Fall aber hinterlässt es seine Spur in unserer Realität. Ein Elektron oder Photon, das den Beobachtungsschirm erreicht, löst dort einen Lichtblitz aus, der gemessen werden kann. Dieser Blitz stellt ein *Faktum* dar, das festgestellt werden kann. Beobachter können den Blitz im Idealfall direkt sehen, beispielsweise mit einem Restlichtverstärker. Der Blitz kann aber

Beobachtungsschirm



Doppelspalt  
mit Detektoren



Teilchenquelle mit  
niedriger Intensität



45 Doppelspaltversuch mit zusätzlichen Detektoren (Blitze) im Bereich der Spalte

© 2011 Dr. Andreas Mücklich, Nachdruck nicht gestattet

auch von Messgeräten erfasst und aufgezeichnet werden. Nun können mehrere Beobachter zeitversetzt am Geschehen teilhaben und sich darüber austauschen.

Ein Faktum ist demnach etwas, von dem wir mit gutem Gewissen sagen können, dass es stattgefunden hat. Es ist damit ein Teil unserer Realität geworden. Prinzipiell wird diese Realität *nur* aus solchen Fakten aufgebaut. Sie ereignen sich unablässig und bilden das, was wir als Gegenwart bezeichnen. Alles um uns herum wird uns über Fakten mitgeteilt, beispielsweise über die Sehzellen unserer Augen und die Tastrezeptoren unserer Finger. Alles, was sich im Universum ereignet, hinterlässt Fakten, von denen wir Kenntnis erlangen können. Mehr können wir von der Welt nicht behaupten, ohne in pure Spekulation abzudriften. Über etwas, was keine Fakten hinterlässt, können wir also gar nichts sagen. Doch was bedeutet dies für die Existenz einer Messgröße, von der wir nichts wissen können?

Dies und nichts anderes ist der entscheidende Knackpunkt beim Doppelspaltversuch. Bevor wir zu ihm zurückkehren, möchte ich diese Gedanken zu einem Prinzip zusammenfassen, das ich *Existenzprinzip* nennen möchte. Man kann es auf verschiedene Arten ausdrücken, wobei ich mit der negativen Formulierung beginnen möchte: Etwas, von dem überhaupt keine Information vorhanden ist, ist nicht Teil der Wirklichkeit. Mit anderen Worten: *Etwas, das nicht beobachtet werden kann, existiert auch nicht*. Dieses Prinzip hat auch Anton Zeilinger (\*1945), einer der bekanntesten Quantenphysiker der Gegenwart, auf ähnliche Weise in Worte gefasst.<sup>1</sup> Dabei soll es nicht an unseren technischen Fähigkeiten liegen, *warum* wir etwas nicht beobachten können. Vielmehr stellen wir uns vor, dass wir dazu jedes erdenkliche Experiment durchführen könnten. Stattdessen geht es um eine prinzipielle Begrenzung unseres Wissens: Wenn im gesamten Universum keine Information über eine bestimmte Messgröße vorhanden ist, so können wir sie weder beobachten noch ihre Existenz behaupten.

Dem Rest meines Buches möchte ich dieses Existenzprinzip voranstellen. Es wird uns in den weiteren Kapiteln noch gute Dienste leisten und die Spreu bloßer Behauptungen vom Weizen trennen. Es wird durch zahlreiche quantentheoretische Experimente auch in seiner positiven Variante gestützt: *Nur durch eine Beobachtung kommt auch eine Existenz zustande*. Was dabei genau unter einer Beobachtung zu verstehen ist, werde ich Ihnen später ausführlich erläutern. Für den Moment soll es uns jedoch genügen, darunter die Durchführung einer Messung zu sehen.

Und nun zur Erklärung des Doppelspaltversuchs: Der entscheidende Unterschied zwischen dem Versuchsaufbau mit und ohne Interferenzmuster ist die Tatsache, dass wir im einen Fall den Ort des Elektrons im Bereich der Spalte kennen und im anderen nicht. Das Muster ändert sich gerade, *weil* wir über den Ort und damit über den Weg des Elektrons durch die Spalte Bescheid wissen. Die Kenntnis dieses Ortes

---

<sup>1</sup> Zeilinger (2003), Kap. V 3.

stellt ein neues Faktum dar. Demnach hat sich die Faktenlage und somit die Realität unseres Versuchs geändert. Ziehen wir das Existenzprinzip zurate, so erhalten wir eine erstaunliche Antwort: Wenn wir den Ort des Elektrons bei den Spalten nicht kennen, so existiert dieser Ort auch nicht. Die Information über diesen Ort ist nirgendwo vorhanden, und wir messen ein Wellenmuster. Versuchen wir dagegen diesen Ort zu ermitteln und beobachten ihn, dann existiert er. Nun liegt die Ortsinformation vor, und wir erhalten ein Teilchenmuster. Unsere Ortsmessung hat also die Wirklichkeit verändert. Das gleiche gilt nicht nur für diesen einen Ort, sondern für den gesamten Weg des Elektrons. Im ersten Fall hat niemand Kenntnis über diesen Weg, weshalb er auch nicht existiert.

Aber was fliegt denn nun durch den Doppelspalt und ergibt ein Interferenzmuster auf dem Schirm? Fliegt hier rein gar nichts, weil sein Ort nicht existiert? Das, was in diesem Versuch die Spalte durchquert, ist jedenfalls nichts, für das wir einen geeigneten Begriff besitzen. Hier pflanzt sich etwas fort, was außerhalb unserer Welt liegt, was aber trotzdem ihre Grundlage bildet. Es ist nicht Nichts, aber es existiert doch nicht im obigen Sinne, da es keine beobachtbaren Spuren hinterlässt.

In den Gleichungen der Quantentheorie, die den Sachverhalt mathematisch beschreiben, füllen Wellen den Raum des Versuchsaufbaus aus. Diese Wellen beschreiben die Wahrscheinlichkeit, ein Teilchen an einem bestimmten Ort zu finden. Diese *Wahrscheinlichkeitswellen* durchqueren die Spalte und verhalten sich dabei wie Wasserwellen, die sich überlagern. Dort, wo sie sich konstruktiv verstärken, werden viele Teilchen auf dem Schirm nachgewiesen, und dort, wo sie sich destruktiv abschwächen, finden sich keine Teilchen. Dies heißt aber noch lange nicht, dass diese Teilchen auch wirklich als klassische Teilchen durch die Spalte geflogen sein müssen. Solange wir die Teilchen nicht an den Spalten beobachten, so existieren sie dort auch nicht, sondern nur die Wahrscheinlichkeiten für ihre Entdeckung, die sich am Schirm überlagern. Unser Denkfehler war die Annahme, dass ein Teilchen eine kontinuierliche Existenz besitzt und damit auch eine Flugbahn. Das Interferenzmuster auf dem Schirm entsteht also durch die Überlagerung von Wahrscheinlichkeitswellen, die angeben, mit welcher Chance dort ein Teilchen gefunden werden kann.

Der zweite Teil des Versuchs mit den zusätzlichen Detektoren passt nun auch in dieses Bild. Sobald wir das Elektron an einem der Spalte messen, so existiert es auch dort. Zu diesem Zeitpunkt befindet sich dort also ein Teilchen, das sich nun auch so verhalten muss. Es kann nur diesen Spalt durchqueren und direkt dahinter auf den Schirm treffen. Eine Interferenz findet hier nicht mehr statt, weil wir mit unserer Messung am Spalt die Wahrscheinlichkeitswellen durch die Gewissheit des Elektronenortes abgelöst haben.

Wir haben das Elektron mit unserem Detektor quasi aus dem Raum der Möglichkeiten und Wahrscheinlichkeiten in den Raum der Realität und Existenz geholt. Der



Detektor fragt gewissermaßen das Elektron, an welchem Spalt es sich befindet und nötigt es, sich für einen Ort zu entscheiden. Was für uns auf den ersten Blick wie eine Lappalie aussieht, ist für das Elektron ein einschneidendes Ereignis. Ein neues Faktum hat sich ereignet, denn sein Ort an den Spalten ist festgestellt worden. Nachdem dies aber geschehen ist, ist die Welt nicht mehr dieselbe wie vorher.

Der Doppelspaltversuch ist ein Paradebeispiel dafür, dass nichts in der Welt ohne Folgen bleibt. Zusätzliche Fakten schaffen neue Informationen und neues Wissen und verändern somit die Welt. Ein Universum, das nach der klassischen Idealvorstellung unabhängig von allen Beobachtungen existiert, gibt es nicht. Die Welt ist nicht einfach da und kann von uns störungsfrei wahrgenommen und entdeckt werden, sondern sie verändert sich durch unsere Beobachtungen ständig.

Die Elektronendetektoren am Doppelspalt schaffen neue Fakten und wandeln den Lauf der Dinge. Tatsächlich können wir den Versuch noch weiter treiben und einen der beiden Detektoren wieder ausbauen. Auch dann bleibt das Teilchenmuster noch immer erhalten, denn es kommt nur darauf an, dass der Elektronenort an den Spalten bekannt ist. Spricht der *eine* Detektor an, so befindet sich das Elektron an diesem Spalt. Spricht er jedoch nicht an, und wir erhalten einen Treffer auf dem Beobachtungsschirm, so muss das Elektron den anderen Spalt passiert haben. Auch diese Information stellt schon ein neues Faktum dar, obwohl das Elektron vom Detektor gar nicht direkt nachgewiesen wurde. Für die Natur ist dies jedoch vollkommen ausreichend, damit sich die Realität verändert. Ob sich das Elektron an dem anderen Spalt dabei irgendwie materialisiert ist völlig unerheblich, denn wir wissen darüber nichts. Wenn wir aber den Blitz auf dem Schirm sehen, wissen wir genau, dass es nicht den Spalt mit dem Detektor, wohl aber den anderen durchquert haben muss. Und genau dieses Wissen verhindert die Interferenz der Wahrscheinlichkeitswellen.

Bei unserem Experiment wirkt sich die Kenntnis des Elektronenorts im gesamten Versuchsaufbau aus. Es befindet sich zwar nur ein Detektor an einem Spalt, aber dieser beeinflusst auch irgendwie das, was sich am anderen Spalt abspielt. Nach dem Existenzprinzip darf man zwar nicht behaupten, dass dort etwas geschieht oder existiert, doch auch die gesicherte Nicht-Beobachtung eines Elektrons hat Folgen. De facto kommt sie einer Beobachtung am anderen Spalt gleich, obwohl hier gar nichts gemessen wird. Wo dieses Wissen also erworben wird, lässt sich gar nicht genau festlegen oder lokalisieren. Dies ist ein erstes Beispiel für die sogenannte *Nichtlokalität* der Quantentheorie. Etwas, das an einem Ort geschieht, hat Auswirkungen an anderen Orten, weil Fakten entstehen. Doch mit welcher Geschwindigkeit breiten sich diese Auswirkungen aus? Dieser Frage und dem Wesen der Ganzheit in der Quantentheorie wenden wir uns im nächsten Kapitel zu.