

Kapitel 4

Die statistischen Aussagen der Quantentheorie

4.1 Doppelspaltexperiment mit einzelnen Photonen

Ein Experiment, das in den nachfolgenden Kapiteln immer wieder betrachtet werden wird, ist das aus der Optik bekannte **Doppelspaltexperiment**:

Experiment 4.1: Verdunkeln Sie den Raum und lassen Sie das Licht eines Lasers auf einen Doppelspalt fallen. Sie werden ein ähnliches Muster wie in Abb. 4.1 sehen.

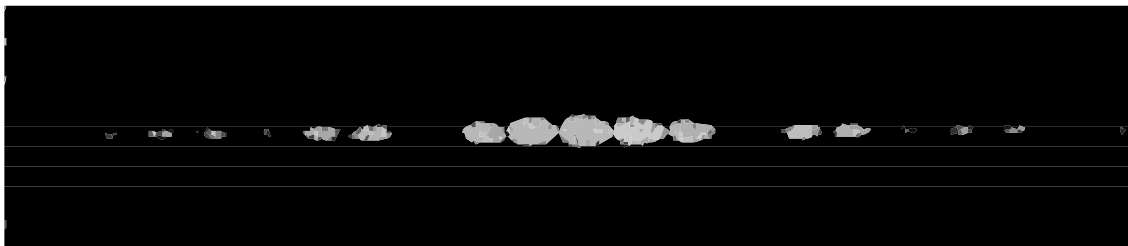


Abbildung 4.1: Doppelspaltversuch mit Laserlicht

In der klassischen Optik wird das beobachtete Muster dadurch erklärt, dass von beiden Spalten Elementarwellen ausgehen und miteinander interferieren. Ähnlich wie das Interferenzmuster in Experiment 3.1 (Mach-Zehnder-Interferometer) ist dieser Versuch ein Beispiel für die Interferenz von Licht – eine typische Welleneigenschaft.

Genau wie beim Interferometer-Versuch wollen wir dieses Experiment nun mit einzelnen Photonen durchführen, um auch hier die charakteristischen quantenmechanischen Eigenheiten kennenzulernen. Wie sich vor allem in Kapitel 6 zeigen wird, gibt es beim Doppelspalt-Experiment eine ganze Menge merkwürdiger Quantenerscheinungen zu entdecken.

Da ein reales Doppelspalt-Experiment mit einzelnen Photonen zwar möglich, aber doch sehr aufwendig ist, greifen wir auch hier zur Computersimulation.¹ Installieren Sie das Simulationsprogramm „Doppelspalt“ nun auf Ihrem Rechner (Datei „Doppelspalt_V31.exe“ ausführen) und starten Sie es.

¹Sie können das Programm „Doppelspalt“ von der Webseite:
<http://www.physik.uni-muenchen.de/sektion/Computer/Doppelspalt> herunterladen.

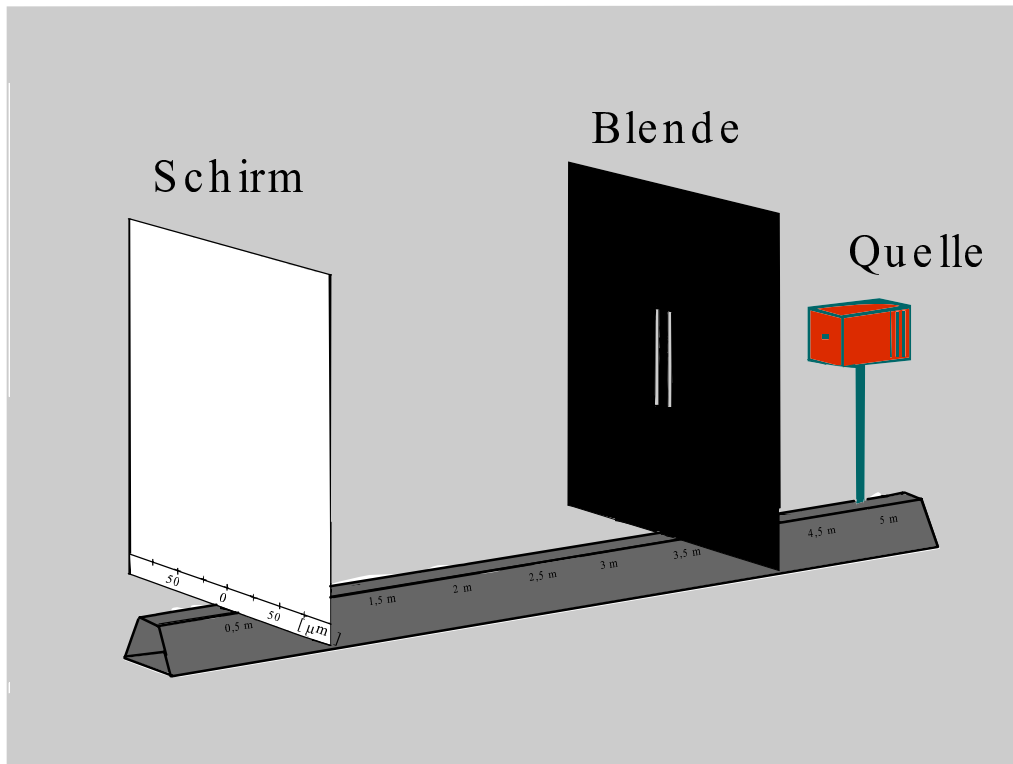


Abbildung 4.2: Das „interaktive Labor“ im Simulationsprogramm zum Doppelspalt-Experiment

Das Simulationsprogramm stellt ein interaktives „Labor“ zur Verfügung. Man kann die experimentellen Parameter variieren und ihren Einfluss auf das Ergebnis des Experiments untersuchen.

Das „Labor“ besteht im wesentlichen aus drei Komponenten (Abb. 4.2):

- einer Quelle, die verschiedene Arten von Quantenobjekten (Elektronen, Photonen, Atome) und klassischen Objekten aussenden kann. Klickt man mit der Maus auf die Quelle, erscheint ein Menü, in dem man die Art der ausgesendeten Objekte und ihre Energie einstellen kann;
- der Blende mit einem Doppel- oder Einfachspalt, deren Breite und Abstand ebenfalls einstellbar sind;
- dem Schirm, auf dem der Nachweis erfolgt.

Beim Aufruf des Programms ist zusätzlich eine Lichtquelle zwischen Blende und Schirm sichtbar. Sie wird erst später benötigt und kann im Moment unbeachtet bleiben.

Nehmen Sie sich einen Augenblick Zeit und probieren Sie das Programm aus. Sie können die Quelle in der Schaltfläche rechts unten oder durch Mausklick auf den Schalter in der Zuleitung einschalten. Bei Unklarheiten kann Ihnen die Hilfefunktion weiterhelfen.

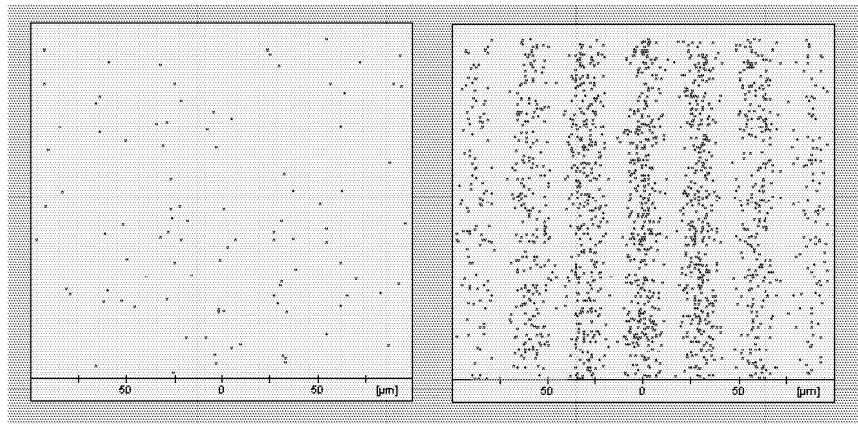


Abbildung 4.3: Allmählicher Aufbau des Doppelspalt-Interferenzmusters aus einzelnen „Einschlägen“

4.2 Das Doppelspaltexperiment mit einzelnen Photonen und die Wahrscheinlichkeitsaussagen der Quantentheorie

Mit dem Simulationsprogramm können wir nun das Doppelspaltexperiment mit einzelnen Photonen durchführen.

Experiment 4.2 (Computersimulation): Führen Sie das folgende Simulationsexperiment durch: Wählen Sie Photonen mit einer Energie von 200 eV, eine Spaltbreite von 200 μm und einen Spaltabstand von 700 μm . Nach Einschalten der Quelle werden Photonen auf dem Schirm nachgewiesen. Sie hinterlassen punktförmige „Flecke“ an scheinbar zufälligen Stellen auf dem Schirm (Abb. 4.3). Sie werden feststellen, dass sich ein Muster herausbildet, je mehr Photonen nachgewiesen werden (evtl. mit der Taste „Speed“ beschleunigen). Es handelt sich um das aus Experiment 4. 1 bekannte Doppelspalt-Interferenzmuster.

Dieser allmähliche Aufbau des Interferenzmusters aus einzelnen „Einschlägen“ ist uns schon aus dem entsprechenden Versuch am Interferometer bekannt (Experiment 3.3). Dort diente der Versuch zur Verdeutlichung des „Welle-Teilchen-Dualismus“. Dies soll hier aber nicht weiter verfolgt werden. Stattdessen wollen wir uns darauf konzentrieren, welche Vorhersagen man über den Ort auf dem Schirm machen kann, an dem ein bestimmtes Photon nachgewiesen wird.

Experiment 4.3 (Computersimulation): Schalten Sie nun die Quelle aus und betrachten Sie das Muster, das die Photonen auf dem Schirm hinterlassen haben. Nehmen wir an, Sie wollten noch ein einzelnes weiteres Photon hinzufügen. Können Sie vorhersagen, an welcher Stelle auf dem Schirm dieses Photon nachgewiesen wird?

Wenn Sie den Versuch durchführen, indem Sie die Quelle für eine kurze Zeit einschalten, erscheint ein neuer Fleck auf dem Schirm. Es dürfte Ihnen nicht gelungen sein, den exakten Ort dieses neuen Flecks vorherzusagen.

Experiment 4.4 (Computersimulation): Die Vorhersage wird erfolgreicher, wenn man das Experiment ein wenig modifiziert. Es sollen nun 100 weitere Photonen hinzugefügt werden. Können Sie vorhersagen, an welchen Stellen viele Photonen landen werden und an welchen Stellen wenige?

Führen Sie den Versuch durch. Löschen Sie dazu das Schirmbild (auf den Schirm klicken und Reset drücken), schalten Sie die Quelle ein und warten, bis 100 Treffer gezählt wurden. Vergleichen Sie das Ergebnis mit Ihren Vorhersagen.

Vermutlich war ihre Vorhersage im letzten Experiment recht zuverlässig. Worin liegt der Unterschied zwischen den beiden Experimenten? Im zweiten Experiment haben wir die Spielregeln geändert: Wir sind von einer Aussage über ein **Einzelereignis** zu einer **Wahrscheinlichkeitsaussage** übergegangen. Tatsächlich ist es ein ganz allgemeiner Zug der Quantenmechanik, dass im allgemeinen keine Vorhersagen über Einzelereignisse möglich sind; man ist gezwungen, zu statistischen Aussagen überzugehen.

4.3 Präparation und Wahrscheinlichkeitsaussagen

Die Bedeutung der Wahrscheinlichkeitsaussagen in der Quantenmechanik wird klarer, wenn wir den in Kapitel 2 eingeführten Begriff der Präparation von Eigenschaften benutzen. Wir unterteilen das Doppelspaltexperiment in drei Phasen (die ganz allgemeingültig sind):

- **Präparation:** Die Quelle sendet Licht (Photonen) einer ganz bestimmten Frequenz aus. Dies entspricht der Präparation, bei der vom Experimentator genau bestimmte Anfangsbedingungen hergestellt werden müssen.
- **Wechselwirkung:** Die in der Quelle präparierten Photonen wechselwirken mit dem Doppelspalt. Der vorher präparierte Zustand wird dadurch verändert (umpräpariert). Meist ist die Untersuchung dieser Wechselwirkung das Ziel eines physikalischen Experiments.
- **Registrierung:** Die Registrierung besteht im Nachweis der Photonen auf dem Schirm und der Feststellung, an welcher Stelle ein Photon einen Fleck auf dem Schirm hinterlassen hat.

Experimente in der klassischen Physik laufen ebenfalls nach diesem Schema ab. Wenn man einen Basketball so wirft, dass er in den Korb fällt, besteht die Präparation darin, den Ball mit der richtigen Geschwindigkeit unter dem richtigen Winkel abzuwerfen. Die Wechselwirkung besteht in der Ablenkung durch die Erdanziehungskraft.

Führt man dieselbe Präparation (d. h. denselben Abwurf) mehrere Male hintereinander in genau der gleichen Weise aus, wird der Ball immer an derselben Stelle landen, d. h. in den Korb fallen. Das Ergebnis ist reproduzierbar. Ganz allgemein gilt in der klassischen Physik: Wenn man eine Reihe von Versuchen macht und dabei das Objekt immer auf gleiche Weise präpariert, findet auch die Wechselwirkung in gleicher Weise statt und das Ergebnis der Messung ist für alle Versuche in der Versuchsreihe identisch.

In der Quantenmechanik ist das anders. Beim Doppelspaltexperiment waren alle Photonen identisch präpariert. Sie besaßen gleiche Energie, und wurden von der Quelle in der gleichen Weise emittiert. Trotzdem gelang es uns nicht, das Ergebnis der Messung (d. h. den Ort auf dem Schirm) für ein einzelnes Photon vorherzusagen. Die Photonen sind *nicht* an der gleichen Stelle gelandet; das einzelne Ergebnis war *nicht* reproduzierbar. Wir konnten nur eine Wahrscheinlichkeitsaussage machen: Nimmt man eine große Anzahl von Photonen und unterwirft sie dem gleichen Präparationsverfahren, so ergibt sich nach der Wechselwirkung mit dem Doppelspalt eine *reproduzierbare Verteilung*. Die *relativen Häufigkeit* der an einem Ort nachgewiesenen Photonen (d. h. die Zahl der dort nachgewiesenen Photonen im Verhältnis zur Gesamtzahl der Photonen) ist zuverlässig vorhersagbar, wie sich in Experiment 4.4 herausgestellt hat.

Eine Menge von sehr vielen gleich präparierten Objekten, die sich gegenseitig nicht beeinflussen, nennt man ein **Ensemble**. Dieser Begriff wird sich später bei der statistischen Beschreibung von Quantenobjekten noch als nützlich erweisen.

Die Unmöglichkeit einer detaillierten Vorhersage über Einzelereignisse ist etwas ganz Neues und charakteristisch Quantenmechanisches. Es stellt sich die Frage, ob man einem Photon nicht doch irgendwie „ansetzen“ kann, an welcher Stelle es auf dem Schirm landen wird. Mit anderen Worten: Vielleicht haben wir ja bei der Präparation nicht alle Eigenschaften des Photons erfasst und es besitzt noch ein weiteres Merkmal, das festlegt, wo es landet? Intuitiv bezweifelt man, dass das dem Zufall überlassen bleibt, denn es widerspräche allen Erfahrungen mit der klassischen Physik (wie dem Basketballwurf oben)

Nach der Quantenmechanik gibt es *kein* Merkmal und keine zusätzlichen Parameter, an denen sich vorher ablesen ließe, wo ein bestimmtes Photon auf dem Schirm landet. Es ist keine „vollständigere“ Präparation der Photonen möglich. Für ein einzelnes Photon wird der Ort des Nachweises tatsächlich vom Zufall bestimmt. Dies ist ein zentraler Zug der Quantenmechanik:

Die Quantenmechanik macht statistische Aussagen über die relative Häufigkeit der Ergebnisse bei oftmaliger Wiederholung des gleichen Experiments. Aussagen über Einzelereignisse sind im allgemeinen nicht möglich.

Bedeutet dieses Ergebnis, dass mit der Quantenmechanik die wissenschaftliche Vorhersagbarkeit, die einen der Grundpfeiler der Physik darstellt, zu Grabe getragen werden muss? Obwohl es auf den ersten Blick so scheinen mag, ist dies doch nicht der Fall. Die Physik beschäftigt sich nicht mit einzelnen Ereignissen, sondern immer nur mit reproduzierbaren (d. h. wiederholbaren) Phänomenen. Die Quantenmechanik legt nun nicht das Resultat einzelner Experimente fest (z. B. den Ort eines einzelnen Photons), sondern beschreibt eine ganze Serie von Experimenten, indem sie die relativen Häufigkeiten der einzelnen Messergebnisse vorhersagt. Diese statistischen Aussagen sind *reproduzierbar*: Jedesmal wenn die gleiche Serie von Experimenten durchgeführt wird, ergibt sich *dieselbe* Verteilung der relativen Häufigkeiten.