

benen Aufbau des Unterrichtsgangs ersieht, werden die Schülerinnen und Schüler von Anfang an damit konfrontiert, dass sich Quantenobjekte in fundamentaler Weise anders verhalten als klassische Gegenstände. Besonders stark wird betont, dass man Quantenobjekten im allgemeinen die Eigenschaft „Ort“ nicht zuschreiben kann. Durch die vorangehende Diskussion des Begriffs der dynamischen Eigenschaft und des Präparationsbegriffs werden die Schülerinnen und Schüler in die Lage versetzt, diese den klassischen Vorstellungen stark widersprechende Aussage eine wohldefinierte Bedeutung zu verleihen.

Das Bohrsche Atommodell wird als eine den Schülerinnen und Schülern vermutlich vertraute Vorstellung angesprochen. Auf der Grundlage der vorher ausführlich diskutierten Schwierigkeiten, die die Begriffe „Ort“ und „Bahn“ im Quantenbereich mit sich bringen, wird erarbeitet, aus welchen Gründen es sich hierbei um eine mit den quantenmechanischen Prinzipien nicht vereinbare Vorstellung handelt.

Die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation wird zunächst qualitativ eingeführt. Sie kennzeichnet die Unmöglichkeit, an einem Ensemble von Quantenobjekten bestimmte Paare von Eigenschaften gleichzeitig zu präparieren. Wie bereits oben erwähnt, wird ihre quantitative Formulierung dadurch erleichtert, dass von Anfang an konsequent die Bornsche Wahrscheinlichkeitsinterpretation benutzt wurde. Die Unbestimmtheitsrelation wird dann als Aussage über die Standardabweichungen von statistischen Verteilungen interpretiert. Diese Verteilungen ergeben sich, wenn man an einem in bestimmter Weise präparierten Ensemble von Quantenobjekten eine große Anzahl von unabhängigen Orts- und Impulsmessungen durchführt und dann die relativen Häufigkeiten der erhaltenen Messwerte betrachtet [28].

## 4. Aufbau des qualitativen Basiskurses

### 4.1 Photonen

Die Einführung in die Quantenphysik erfolgt in herkömmlicher Weise über den Photoeffekt und den Photonenbegriff. Das Phänomen des Photoeffekts wird im Experiment gezeigt, und es wird argumentiert, dass es sich nicht mit der klassischen Wellenvorstellung des Lichts deuten lässt. Der Begriff des Photons mit der Gleichung  $E = hf$  wird eingeführt und die Deutung des Photoeffekts mit der Einsteinschen Gleichung wird erörtert. Da die Durchführung des Experiments zur Überprüfung der Einstein-Gleichung relativ aufwendig ist, kann optional ein interaktives Bildschirmexperiment [29] durchgeführt werden.

Zugänge zur Quantenphysik über Photonen sind in der Literatur kritisiert worden [10, 30], da sie leicht zur Fehlvorstellung von Photonen als klassischen teilchenhaften Gebilden führen. In unserem Kurs werden die Schülerinnen und Schüler jedoch sehr schnell zu Erfahrungen hingeführt, die zeigen, dass das Verhalten von Photonen mit keinem klassischen Modell angemessen zu beschreiben ist.

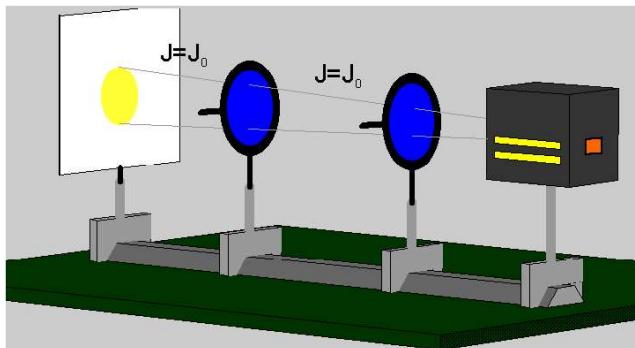
### 4.2 Präparation dynamischer Eigenschaften

Ein in unserem Zugang wichtiges Element ist der Begriff der Präparation. Es wird zunächst an Beispielen aus der klassischen Mechanik und Optik gezeigt, dass auch in der klassischen Physik die gezielte Herstellung von Zuständen eine wichtige Rolle spielt (zu den nachfolgenden Beispielen s. auch [13,15]). So ist es etwa bei der Überprüfung des Gesetzes für die Bahnkurve des horizontalen Wurfs wesentlich, dass die Abschussvorrichtung Kugeln gleicher Masse mit möglichst identischen Werten von Ort und Geschwindigkeit präpariert.

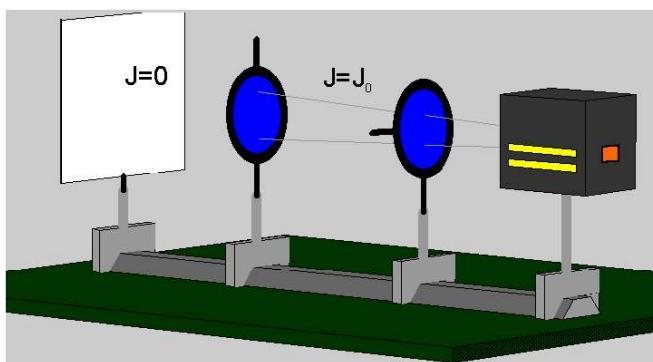
Hat man mit einem Präparationsverfahren mutmaßlich eine Eigenschaft präpariert, kann man diese Vermutung in einem zweiten Versuch, dem Testversuch, überprüfen. Wenn man mit

Sicherheit vorhersagen kann, dass ein Test eine bestimmte Eigenschaft bestätigt, dann ist die Vorstellung erlaubt, dass das Objekt diese Eigenschaft auch wirklich besitzt.

Ein Beispiel ist die Präparation der Eigenschaft „Polarisation“ (Abb. 1). Beleuchtet man ein waagerecht eingestelltes Polarisationsfilter, wird ein Teil des Lichtes absorbiert. Der durch-



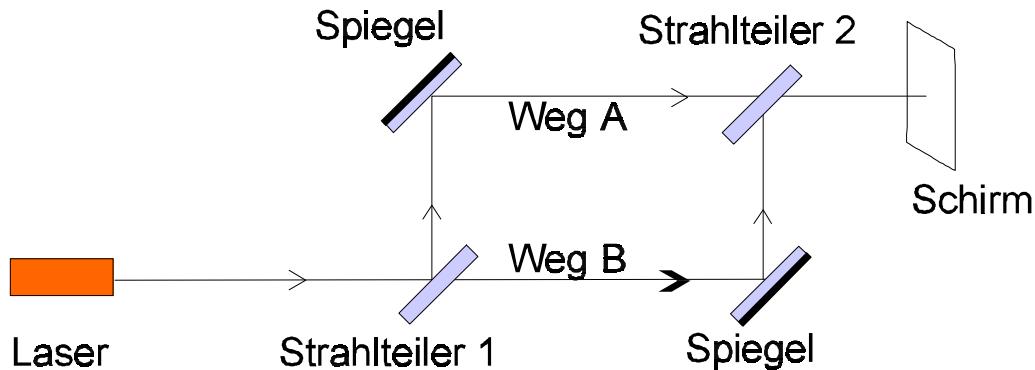
gelassene Anteil besitzt etwa die halbe Intensität des ursprünglichen Lichtes. Man vermutet, dass der durchgelassene Anteil eine bestimmte Eigenschaft besitzt. Man kann diese Vermutung mit einem zweiten waagerecht eingestellten Polarisationsfilter prüfen. Das Licht kann dieses Filter ohne wesentliche Abschwächung passieren (Abb. 1). Im ersten Polarisationsfilter wurde also eine Eigenschaft präpariert („waagerecht polarisiert“), die dazu führt, dass das so präparierte Licht ein waagerecht eingestelltes Polarisationsfilter ungehindert passieren kann.



Stellt man das zweite Polarisationsfilter dagegen senkrecht ein (Abb. 2), wird ein Test auf eine andere Eigenschaft („senkrecht polarisiert“) durchgeführt. Der Schirm bleibt dunkel: Waagerecht polarisiertes Licht besitzt die Eigenschaft „senkrecht polarisiert“ nicht. Die beiden Eigenschaften sind – auch auf andere Weise – nicht gleichzeitig präparierbar.

### 4.3 Wellen und Teilchen

In diesem Kapitel beginnt der erste Durchlauf durch den spiralförmigen Gang durch die Grundbegriffe der Quantenphysik. Es wird das Verhalten von Photonen in einem Mach-Zehnder-Interferometer (Abb. 3) betrachtet. Da der Zugang zu den Grundbegriffen der Quan-



tenmechanik auf diesem Weg in einem gesonderten Aufsatz dargestellt wird [31], wird die Darstellung hier kürzer gehalten (ein ähnlicher Ansatz wurde von Brachner und Fichtner [32] dargestellt).

Nachdem das Auftreten eines Interferenzmusters als ein Charakteristikum von Wellen erkannt worden ist, kann man sich fragen, was passiert, wenn man den Versuch mit einzelnen Photonen betreibt. Zeigen sich Wellen- und Teilchenverhalten im *gleichen* Experiment? Es stellt sich heraus, dass dies tatsächlich der Fall ist. Das Interferenzmuster baut sich nach und nach aus den „Einschlägen“ einzeln nachgewiesener Photonen auf. Mit nur einem der beiden Modelle (Welle oder Teilchen) ist ein solches Verhalten nicht zu beschreiben. Schon hier zeigt sich, dass eine befriedigende Erklärung Elemente beider Modelle in sich vereinigen muss.

Mit der Diskussion eines solchen Experiments stößt man an ein grundsätzliches Problem der Quantenphysik im Schulunterricht. Mit schulischen Mitteln lässt sich nur eine Handvoll Experimente aus dem Quantenbereich realisieren. Wir haben deshalb zum Mittel der Computersimulation gegriffen, um hier nicht nur auf Gedankenexperimente angewiesen zu sein. Die Simulation hat den zusätzlichen Vorteil, dass sie von den Schülerinnen und Schülern individuell und vor allem selbsttätig durchgeführt werden kann. Das Simulationsprogramm findet man im Internet unter [www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Computer/interfer/interfer.html](http://www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Computer/interfer/interfer.html).

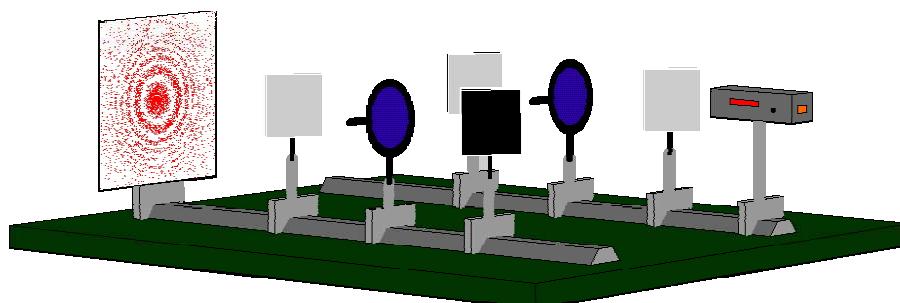


Abb. 4: Parallel eingestellte Polarisationsfilter verhindern den Aufbau des Interferenzmusters nicht.

Beim Nachweis auf dem Schirm hinterlässt ein Photon einen teilchenhaften „Fleck“. Dürfen wir uns ein Photon im Interferometer ähnlich gut lokalisiert vorstellen? Oder, mit dem Eigenschaftsbegriff formuliert: Besitzt ein Photon im Interferometer die Eigenschaft „Ort“? Die Antwort lautet nein, wie man am folgenden Versuch erkennt (für Einzelheiten s. [31]): Man bringt Polarisationsfilter in jeden der Wege. Sind beide Polarisationsfilter parallel, baut sich nach wie vor das Interferenzmuster auf (Abb. 4).

Nun stellt man das vordere Polarisationsfilter senkrecht ein (Abb. 5). Es erscheint kein Interferenzmuster, sondern eine strukturlose Verteilung. Was bedeutet das für unsere Vorstellung von einem Photon? Im Fall parallel stehender Polarisationsfilter gibt es Gebiete (die Interferenzminima), in denen mit Sicherheit *kein* Photon nachgewiesen wird. Stehen die Polarisationsfilter senkrecht zueinander, findet man dort sehr wohl Photonen. Um entscheiden zu können, ob in diesen Gebieten Photonen gefunden werden, muss man die Einstellung *beider* Polarisationsfilter kennen. Wäre nun ein Photon tatsächlich ein lokalisiertes Gebilde, das auf genau einem der beiden Wege durch das Interferometer läuft, müsste es auf wundersame Weise „wissen“, wie das Polarisationsfilter im *anderen* Weg eingestellt ist, um sich am Schirm „korrekt zu verhalten“. Will man eine solche Fernwirkungsvorstellung vermeiden, bleibt nur der Schluss, dass die Ausgangsannahme falsch war: Man darf sich ein Photon nicht als lokalisiertes Gebilde mit einem festen Ort vorstellen; man kann ihm nicht einen der beiden Wege zuschreiben.

Man kann diese wichtige und erstaunliche Erkenntnis auch noch systematischer mit Hilfe des Eigenschaftsbegriffs formulieren. Mit den senkrecht zueinander stehenden Polarisationsfiltern markiert man den Weg eines Photons durch die Eigenschaft Polarisation. Denn: Misst man die Polarisation eines am Schirm eintreffenden Photons, ergibt sich immer „waagerecht“ oder „senkrecht“. Ein waagerecht polarisiertes Photon kann aber nur auf dem hinteren Weg in Abb. 5 zum Schirm gelangt sein, ein senkrecht polarisiertes nur auf dem vorderen. Jedem Photon lässt sich auf diese Weise genau einer der beiden Wege zuordnen. Das Versuchsergebnis bedeutet: Kann man jedem Photon, das am Schirm eintrifft, die Eigenschaft „Weg“ oder „Ort“ zuschreiben, erhält man kein Interferenzmuster. (Die Tatsache, dass die Polarisation am Schirm nicht gemessen wird, spielt dabei keine Rolle. Es genügt, wenn jedes Photon die Weginformation in seinem Zustand codiert in sich trägt.)

Umgekehrt kann man nun schließen: Im Experiment mit parallel stehenden Polarisationsfiltern können die Photonen die Eigenschaft „Weg“ *nicht* besitzen. Denn könnte man ihnen einen Weg zuschreiben, würde sich kein Interferenzmuster ergeben. Dies ist ein erstes Beispiel dafür, dass Quantenobjekten klassisch wohldefinierte Eigenschaften unter Umständen *nicht* zugeschrieben werden können.

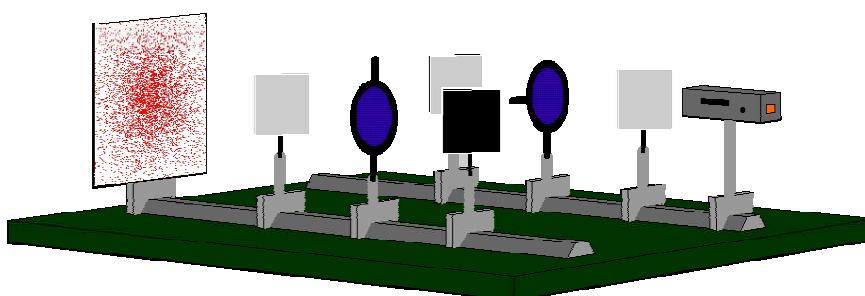


Abb. 5: Wegmarkierung mit Polarisationsfiltern

Ein von den Schülerinnen und Schülern immer wieder gebrachter Einwand auf diese Feststellung ist, dass sich das Photon am halbdurchlässigen Spiegel ja „aufspalten“ könnte, d. h. ein Teil des Photons gelangt auf dem einen Weg zum Schirm, der andere Teil auf dem anderen Weg. Auch dies kann man experimentell widerlegen. Dazu stellt man Detektoren in beide Wege. Man findet, dass immer nur einer der beiden Detektoren anspricht (und dabei die gesamte Energie des Photons absorbiert). Das Photon wird also immer nur als Ganzes nachgewiesen, niemals werden „Teile“ gefunden. Im Unterricht kann das Experiment nur mit dem Simulationsprogramm durchgeführt werden; ein Realexperiment ist 1986 von Grangier, Roger und Aspect realisiert worden [33].

#### 4.4 Die statistischen Aussagen der Quantenmechanik

Wie bereits dargelegt bildet die Bornsche Wahrscheinlichkeitsinterpretation eines der wesentlichen Elemente des Unterrichtskonzepts. Die Einführung in die statistischen Aussagen der Quantenmechanik erfolgt mit einem anderen Experiment: dem Doppelspalt-Experiment mit einzelnen Photonen. Auch hierzu wurde ein Simulationsprogramm entwickelt, das unter der Adresse [www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Computer/Doppelspalt/Doppelspalt.htm](http://www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Computer/Doppelspalt/Doppelspalt.htm) zu finden ist. Das Programm stellt ein interaktives Labor zur Verfügung, in dem Simulationsexperimente durchgeführt werden können. Es besteht aus einer Quelle, die verschiedene Arten von Quantenobjekten aussenden kann, einer Blende mit Einzel- oder Doppelspalt, deren Breite und Abstand einstellbar sind und einem Schirm, auf dem die Objekte nachgewiesen werden (Abb. 6).

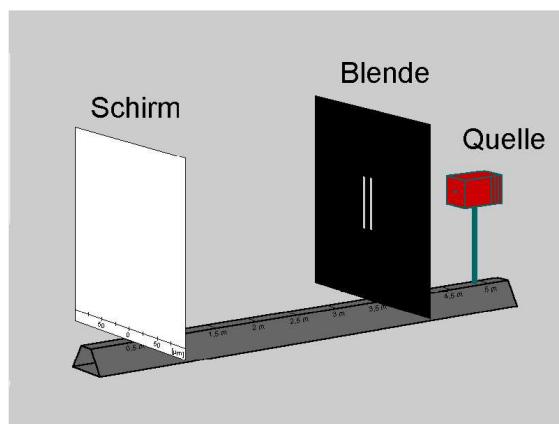


Abb. 6: Doppelspalt-Experiment im Simulationsprogramm

Nachdem das Doppelspalt-Interferenzmuster aus der klassischen Optik noch einmal in Erinnerung gerufen wurde, wird das Doppelspalt-Experiment mit einzelnen Photonen behandelt. Ganz ähnlich wie beim Interferometer-Versuch findet man, dass sich aus den „Flecken“, die die einzelnen Photonen hinterlassen, das Interferenzmuster langsam aufbaut (Abb. 7).

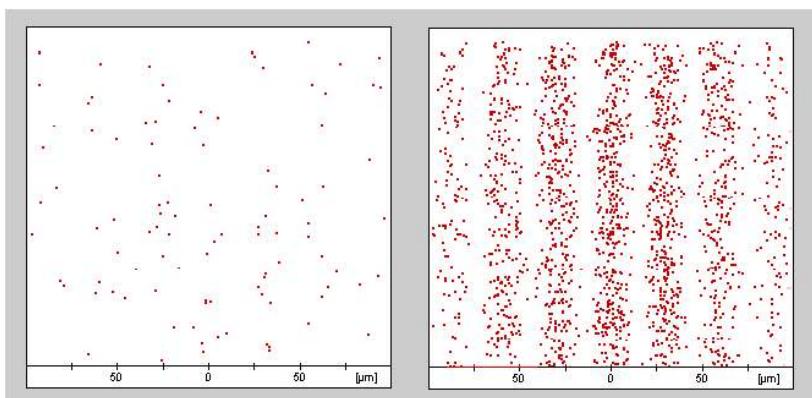


Abb. 7: Allmählicher Aufbau des Interferenzmusters aus den von einzelnen Photonen hinterlassenen „Flecken“