

vorgeschlagenen Experimente genauso mit einzelnen Quantenobjekten durchgeführt werden könnten und durchgeführt worden sind. Nach hinreichend langer Beobachtungszeit haben sich dabei jeweils identische Beobachtungen ergeben.

Das Doppelspaltexperiment als Ausgangspunkt

Klassisches Doppelspaltexperiment mit Licht

Beleuchtet man einen Doppelspalt mit Licht, findet sich dahinter auf einem Schirm ein Streifenmuster, genauer eine Intensitätsverteilung. Klassisch wird dies als Interferenzphänomen erklärt. Anschaulich ist die Intensität die Helligkeit, exakt die Bestrahlungsstärke E (vgl. UP 150 „Wellenoptik“), angegeben in W/m^2 . Sie ist proportional zum Amplitudenquadrat, also proportional zu den Feldstärkeamplituden von elektrischer bzw. magnetischer Feldstärke E bzw. B (vgl. UP 156 „Elektromagnetische Wellen“). Aus dem Beugungsbild kann man auf die Wellenlänge des Lichtes schließen. Dabei liefert ein Beugungsgitter mit vielen Spalten genauere Werte, da damit die Maxima schärfer und sehr viel heller werden.

Doppelspaltexperiment mit Elektronen

Das Doppelspaltexperiment gelingt auch mit Elektronen oder anderen massebehafteten → *Quantenobjekten*. Erklärt wird dies durch Interferenz der zugehörigen Ψ -Funktion; die Wellenlänge wird mit der de-Broglie-Beziehung $p = mv = h/\lambda$ berechnet. Wegen der relativ großen Werte von m ergeben sich sehr kleine Wellenlängen, weshalb eine sehr kleine Gitterkonstante notwendig ist.

Das Amplitudenquadrat der Ψ -Funktion auf dem Schirm ist ebenfalls eine „Intensität“, wenn man diese als von einer „Anzahl der Quantenobjekte pro Zeiteinheit“ übertragene Energie interpretiert bzw. als Maß für die Nachweiswahrscheinlichkeit von Punkten auf dem Schirms. Hier fällt durch die Bildung des (reellwertigen) Betrags-Quadrates nicht auf, dass die Ψ -Funktion zweigend eine komplexwertige Funktion sein muss.

Zurück zum Licht: Photonen als Quantenobjekte

Die Wahrscheinlichkeitsinterpretation lässt sich auch auf Licht übertragen, wenn man mit dem Quantenobjekt Photon argumentiert: Man erhält so eine einheitliche Erklärung der Phänomene am Doppelspalt oder Gitter im Rahmen der Quantenphysik.

Durch die Vorgänge in modernen Experimenten mit Einzelphotonen (s.o.) wird diese Interpretation auch für Licht gestützt: Man findet auf dem Schirm Einzelereignisse bzw. Einzelphotonen, genau wie bei Elektronen: Beide sind eben Quantenobjekte!

Interferenz durch Superposition

Es bildet sich stets das gleiche Interferenzmuster heraus, egal ob man es mit hoher Intensität, also vielen Quanten-

objekten pro Zeiteinheit, oder sehr geringer Intensität über einen längeren Zeitraum hinweg erzeugt (→ *Ensembleerfahrung*). Gleches gilt auch, wenn das Doppelspaltexperiment an verschiedenen Orten durchgeführt wird, solange nur die Apparaturen sowie die Eigenschaften der Quantenobjekte identisch sind („einheitlich präparierte Quantenobjekte“). Selbst wenn man dafür sorgt, dass immer nur ein einziges Quantenobjekt¹⁾ in der Apparatur ist, kommt es zu Interferenz: Man detektiert das Quantenobjekt jeweils an einem zufälligen, nicht vorhersagbaren Ort auf dem Schirm; bei sehr häufiger Wiederholung des Experiments ergibt sich aber wiederum genau das gleiche Interferenzbild wie zuvor. Das Ergebnis ist vorhersagbar („determiniert“), die Einzelereignisse, die es generieren, jedoch nicht („stochastisch“). Die Voraussetzung für Interferenz ist nur die Existenz von mindestens zwei Pfaden für das Quantenobjekt (wie z.B. beim Doppelspalt). Das Quantenobjekt bzw. seine durch die Präparation festgelegte Ψ -Funktion befindet sich dadurch „in einer Superposition“. Die Wellenlänge zusammen mit der Apparatur bestimmt dann das Interferenzbild.²⁾

Eine Aussage über das Quantenobjekt während des „Durchgangs durch den Doppelspalt“ ist quantenphysikalisch ebenso sinnlos wie die Frage, wo genau oder wie schnell es vor der Detektion war. Wenn man eine dieser Eigenschaften (Ort oder Impuls, → *komplementäre Größen*) vor der Detektion herausfinden will, dann wird das Interferenzbild umso weniger kontrastreich, je genauer man die Messung ausführt. Das Wort „will“ ist hierbei korrekt: Es reicht bereits aus, wenn die Apparatur nur die Möglichkeit zur Detektion besitzt, ohne dass man diese konkret ausführt (→ *Knallertest*). Die Wirkung von denjenigen Elementen der Apparatur, die eine → *Welcher-Weg-Information* bewirken, ist dabei → *nicht-lokal*.

Schwerpunkte für den Unterricht

Die Formulierung der Quantenphysik ist bisher nicht endgültig abgeschlossen. Über Deutungsfragen wird auch heute noch diskutiert. Die wichtigsten werden im Beitrag von Uhl auf S. 41–46 kurz angesprochen. Dort wird auch gezeigt, wie ein schulgerechter Zugang zu Deutungsfragen aussehen könnte. Eine Beurteilung der verschiedenen Sichtweisen erscheint uns allerdings ohne eine sehr tiefe Auseinandersetzung (nicht nur in der Schule) kaum möglich.

Im Folgenden soll kurz dargestellt und kommentiert werden, was unserer Ansicht nach unstrittig ist und Gegenstand des Unterrichts sein kann. In **Kasten 1** wird eine für den Unterricht bestimmte Liste mit „Eigenschaften von Quantenobjekten“ vorgeschlagen, die im Unterricht (s. dazu den Beitrag von Barth auf S. 36–40) verwendet wurde:

- Einzelne, für unteilbar gehaltene Objekte können, jedes für sich, zur Interferenz gebracht werden (s. **Kasten 2**).
- Aus einer Vielzahl gleichartig präparerter Objekte in derselben Experimentieranordnung ergibt sich ein

Eigenschaften von Quantenobjekten

Zentrale Formeln

$$W_0 = hf \quad (\text{Planck-Einstein-Beziehung})$$

mit W_0 : Energie, f : Frequenz und h : Planck-Konstante

$$p = h/\lambda \quad (\text{de-Broglie-Beziehung})$$

mit p : Impuls, λ : Wellenlänge und h : Planck-Konstante

$$W = mc^2 \quad (\text{Äquivalenz von Masse und Energie})$$

mit W : Energie, m : Masse und c : Lichtgeschwindigkeit

Zentrale Eigenschaften

- Quantenobjekte zeigen wellenartiges und teilchenartiges Verhalten, sie sind weder Teilchen noch Welle, sondern „ein Drittes“.
- Quantenobjekte interferieren mit sich selbst im Sinne einer „Interferenz der Möglichkeiten“.
- Quantenobjekte sind Träger von Energie, Impuls und Spin.
- Zwischen gebundenen Elektronen und Licht sind diese Größen nur als diskrete Portionen („Quanten“) übertragbar, wenn die Energiestromstärke klein genug ist.
- Quantenobjekte zeigen stochastisches Verhalten; über Einzelobjekte sind nur Wahrscheinlichkeitsaussagen möglich.
- Bei sehr hohen Anzahlen von Quantenobjekten ergibt sich als Endergebnis stets die gleiche Verteilung. Hierbei ist es ohne Bedeutung, ob dieses Endergebnis in sehr langer Zeit oder in sehr kurzer Zeit entstanden ist (Ensembleerfahrung).
- Die Ψ -Funktionen dienen zur Vorhersage von Nachweiswahrscheinlichkeiten. Ψ -Funktionen interferieren, wenn verschiedene Wege zur Verfügung stehen.
- Wenn es für ein Quantenobjekt mindestens zwei mögliche Wege gibt, so ist die Interferenz so lange nicht be-

obachtbar, wie man Informationen über das Einschlagen eines Weges erhalten könnte: Informationen über den Impuls haben die entsprechend umgekehrte Wirkung (Komplementarität).

- Die Unbestimmtheitsrelation ist gültig, näherungsweise gilt $\Delta p \Delta x \approx h$. Es gibt komplementäre Größen, bei ihnen erhöht sich die Unbestimmtheit der einen Größe, wenn sich die der anderen Größe verringert. Eine Erhöhung der Unbestimmtheit bedeutet, dass sich die stochastische Streuung der Größe bei Lokalisationen erhöht.
- Wird ein Elektron gebunden, d. h. auf einen begrenzten Raum eingeschränkt, ergeben sich stationäre Funktionen für die Nachweiswahrscheinlichkeit mit diskreten Energieniveaus im Potentialtopf. Man weiß derzeit nicht sicher, ob es gebundene Photonen geben könnte.
- Für Atome ist das Energieniveaumodell gültig, für wasserstoffähnliche Atome gilt näherungsweise $W \approx 13,6 \text{ eV } z^2 1/n^2$ für kleine z und kleine Hauptquantenzahlen n bzw. $W \approx 13,6 \text{ eV } (z-a)^2 1/n^2$ mit Abschirmungszahl a .
- Das Pauliprinzip ist (für Elektronen im Atom) gültig.
- Bei Experimenten mit einzelnen Quantenobjekten sind die Ergebnisse nur dann erklärbar, wenn man die gesamte Apparatur mit Quantenobjekt betrachtet. Über Ort und Verhalten des Quantenobjektes vor der Detektion können keinerlei Aussagen gemacht werden (eingeschränkte Sicht auf Nichtlokalität). Auch die Vorstellung von einer Ausdehnung des Quantenobjektes über die Apparatur wäre eine im Klassischen verhaftete Denkweise. Ebenso wenig kann vorhergesagt werden, wie sich das Quantenobjekt verhalten hätte, wenn es nicht detektiert worden wäre.

Interferenzmuster. Dies ist unabhängig davon, ob das Experiment viele Objekte zur gleichen Zeit oder einzelne Objekte nacheinander über einen langen Zeitraum verwendet. Man würde sogar dann gleichartige Ergebnisse erhalten, wenn man identische Experimente mit jeweils nur einem Quantenobjekt an vielen verschiedenen Orten der Welt durchführen würde und die Ergebnisse übereinander legen könnte.

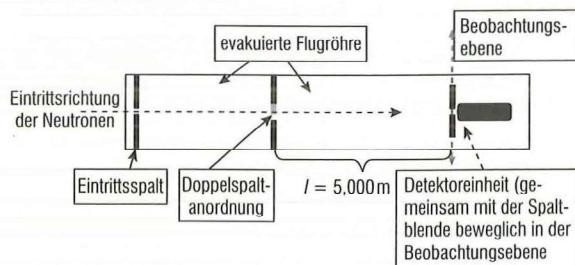
- Das jeweils in einer Anordnung erwartbare Interferenzmuster und damit der zugehörige Zustand des Systems sind bereits – aber auch erst dann – definiert, wenn die Versuchsanordnung feststeht (s. **Kasten 3**).
- Das jeweils beobachtbare Interferenzmuster ist Ausdruck der bereits aus den Versuchsbedingungen vorhersagbaren Wahrscheinlichkeitsverteilung für den Nachweis der beobachteten Quantenobjekte.

- Quantenobjekte werden in Detektoren stets als Ganzes nachgewiesen. Vor einer Detektion befindet sich das Quantenobjekt immer dann in einem Zustand der → *Superposition*, wenn es mehr als eine klassisch denkbare Verbindung von der Quelle zum Detektor gibt. In diesem Zustand sind Aussagen der klassischen Physik zu Ort oder Impuls nicht möglich (s. **Kasten 4–5**).
- Die zur Vorhersage und Beschreibung der Interferenz geeigneten Funktionen [11] sind „nicht Elemente der erschlossenen Wirklichkeit“ [9]; vielmehr sind sie abstrakte Objekte, die dennoch eine Anschaulichkeit zulassen, wenn auch nicht auf dinglicher Ebene.
- Quantenphysik lässt sich nicht anschaulich verstehen. Sie zu verstehen, setzt Abstraktion voraus und ist ohne mathematische Modelle nicht erreichbar. Verstehen kann dabei nicht weiter gehen, als „mithilfe einer

Neutronen

Sogenannte ultrakalte Neutronen, deren Geschwindigkeit nur wenige Hundert m/s beträgt, haben so große Wellenlängen, dass mit ihnen Interferenzexperimente an makroskopischen Strukturen möglich sind. Eines dieser Experimente wird in [6] – für die Schule sehr gut aufbereitet – dargestellt.

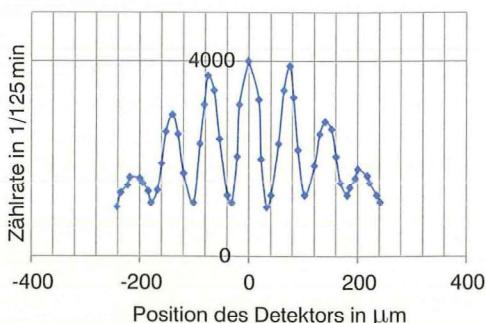
Die Neutronen wurden zunächst durch Dispersion an einem Paraffin-Prisma monochromatisiert. Dabei war die Rate, mit der Neutronen in die Apparatur eintraten, so gering, dass sich mit großer Sicherheit stets nur ein Neutron in der Apparatur befunden hat. Am Ende des evakuierten Strahlrohrs ließ man die Neutronen in Versuchsanordnung eintreten, die in **Abbildung 1** dargestellt ist.



1 | Versuchsanordnung: Der Abstand l zwischen der Doppelspaltanordnung und der Beobachtungsebene beträgt $l = 5,00 \text{ m}$. Die Spaltmitten in der Doppelspaltanordnung hatten einen Abstand von $d = 115 \mu\text{m}$. Die Detektoreinheit wurde in der Beobachtungsebene in kleinen Schritten verschoben.

Im Doppelspalt-Experiment erhielten die Autoren das auf der Grundlage ihrer Veröffentlichung in **Abbildung 2** wiedergegebene Messergebnis, nämlich ein Interferenzmuster. Aus diesen Messdaten lässt sich den Neutronen eine Wellenlänge zuweisen. Dabei erhält man eine sehr gute Übereinstimmung mit der de-Broglie-Relation.

Die geringe Zählrate von höchstens 0,6/s rechtfertigt die Annahme, dass hier „jedes Quantenobjekt mit sich selbst interferiere“ (P. Dirac).

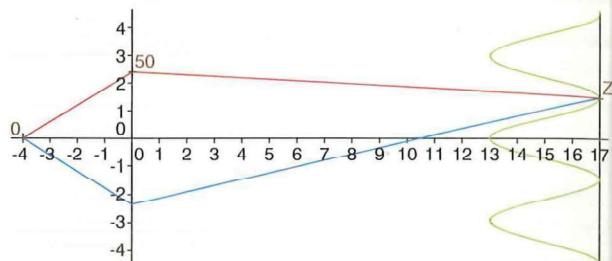


2 | Messergebnis des Experiments. Jede Position des Detektors wurde 125 Minuten lang beibehalten. Auf der Hochachse ist die Gesamtzahl der während dieses Intervalls registrierten Neutronen dargestellt. Die zugehörige Geschwindigkeit betrug etwa 216 m/s, entsprechend $\lambda = 18,5 \cdot 10^{-10} \text{ m}$. Das bedeutet eine Verweildauer in der Röhre von knapp unter 50 ms.

Rolle des Aufbaus

„Das Interferenzmuster liegt *bereits fest*, wenn der Aufbau beschrieben ist.“

Mit einem dynamischen Geometrieprogramm kann man ohne großen Aufwand eine Doppelspalt-Situation (in **Abb. 3** mit unendlich schmal gedachten Spalten) modellieren.



3 | Prinzipzeichnung eines Doppelspalt-Experiments mit der modellierten Nachweiswahrscheinlichkeit am rechten Bildrand

Wenn man sich daran gewöhnt hat, derartige Darstellungen als Vorhersage über die Nachweiswahrscheinlichkeit für ein Experiment mit einzelnen Quantenobjekten zu interpretieren, wird die Aussage in der Überschrift fast selbstverständlich. Schließlich existiert die Abbildung ja bereits, ohne dass man das Experiment tatsächlich ausgeführt hätte. Jede Durchführung des Experiments mit geeignet präparierten Quantenobjekten wird die Vorhersage bestätigen, dass ein Detektor am Punkt Z niemals ein Quantenobjekt nachweisen wird.

Insofern ist die Aussage nicht viel anders, als würde man sagen: Der (globale) Ausgang einer langen Kette von Wür-

Welcher-Weg-Information

An einem Interferometer wie z.B. dem Mach-Zehnder-Interferometer (s. **Abb. 5**) kann man das Konzept der Welcher-Weg-Information besonders gut verdeutlichen: Könnte man ein ideal justiertes Mach-Zehnder-Interferometer mit ideal parallelem Licht betreiben, würde man im Detektor DO niemals ein Photon registrieren, im Detektor DR dagegen immer. Das liegt an unterschiedlichen Phasensprüngen:

- *oberer Pfad zu DO:* zwei Phasensprünge von 90° an den Strahlteilern, Phasensprung von 180° am Endspiegel E1.
- *unterer Pfad zu DO:* Phasensprung von 180° nur am Endspiegel E2 (Transmission durch Strahlteiler ruft keinen Phasensprung hervor).

Entsprechend ergibt sich für DO die Nachweiswahrscheinlichkeit 0. Für DR folgt analog konstruktive Interferenz.

Weil man den Zustand „Dunkelheit“ mit größerer Sicherheit von anderen Beleuchtungszuständen unterscheiden kann als den Zustand Helligkeit, konzentriert man sich auf den Detektor DO. Man nennt ihn aus diesem Grund oft Interferenzdetektor. Im Realexperiment kann man die geforderten idealen Bedingungen nur sehr schwer realisieren. Man muss in der Regel

felexperimenten steht bereits fest, wenn der Würfel produziert wurde. Mit einem sechsflächigen Würfel wird man niemals eine 7 werfen können.

Während man bei einem Würfel allerdings der Versuchung erliegen dürfte, die Wahrscheinlichkeitsverteilung durch Anwenden von Gesetzen der Mechanik vorherzusagen, wird man das in der Quantenphysik nicht versuchen. Niemand weiß, warum sich Quantenobjekte in einer gegebenen Anordnung nach den Vorschlägen richten. Zufall in der Quantenphysik ist echter Zufall!

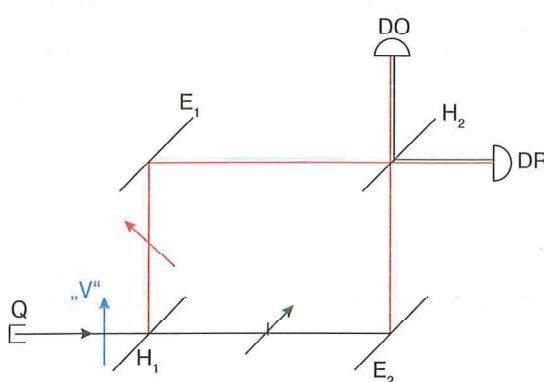
„Das Interferenzmuster liegt erst dann fest, wenn der Aufbau vollständig beschrieben wurde.“

Diese Aussage wird sehr klar unterstützt durch sog. delayed-choice-Experimente (vgl. z. B. [12]). Im Kern geht es dabei um → *Welcher-Weg-Experimente* (s. Kasten 4) mit Einzelphotonen in einem Mach-Zehnder-Interferometer (s. Abb. 4).

Schon mit Schulmitteln kann man zeigen, dass die Interferenzerscheinung nicht mehr beobachtbar ist, wenn man das zu Beginn z.B. vertikal (V) polarisierte Licht auf den beiden Pfaden orthogonal zueinander (hier $-45^\circ/+45^\circ$) umps polarisiert. Die Interferenz wird wieder beobachtbar, wenn man vor mindestens einen Detektor ein (in diesem Beispiel wieder V-polarisierendes) Filter, oft → *Quantenradierer* genannt, einbringt. Auch dieses Schulexperiment ist nur ein Analogexperiment, das sich klassisch deuten ließe – es ergibt aber dieselben Erscheinungen wie aufwändige Experimente mit Einzelphotonen.

Im Experiment von [12] wird zu diesem Zweck ein schaltbarer Polarisator verwendet. Die Strecken H1–E1 und H1–E2 macht

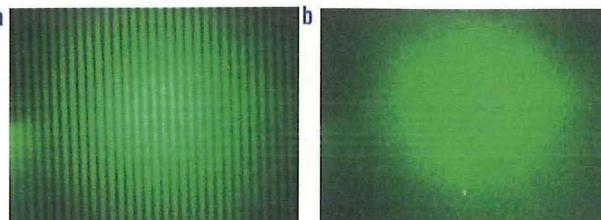
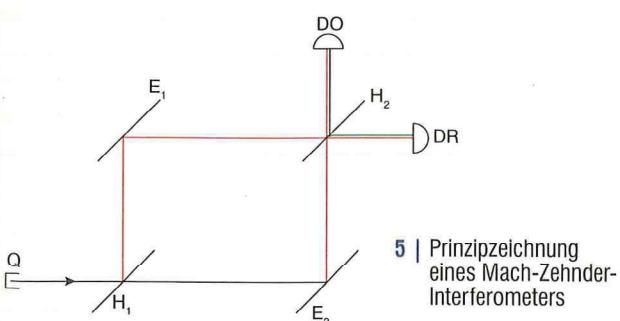
man einige zehn Meter lang. Man schaltet den Quantenradierer erst dann ein, wenn man auf der Grundlage von Laufzeitüberlegungen in klassischer Denkweise davon ausgehen würde, dass ein Photon „nach Durchgang durch einen der beiden Polarisatoren bereits eindeutig präpariert wurde“. Das Experiment zeigt überzeugend, dass trotz dieser „verspäteten Schaltung“ die Interferenz wieder beobachtet werden kann. Was geschieht oder nicht geschieht, liegt also erst dann fest, wenn der gesamte Versuchsaufbau beschrieben ist. Es belegt damit auch die → *Nicht-Lokalität* der Quantenphysik.



4 | Aufbau eines Mach-Zehnder-Interferometers. Das Licht aus einer Quelle Q wird vertikal polarisiert („V“). Nach dem ersten Strahlteiler gibt man dem Licht in beiden Pfeilen zueinander orthogonale Polarisationen, so dass sich über jedes Photon anhand der Polarisation sagen ließe, welchen der beiden Pfade es genommen hat („Welcher-Weg-Information“).

mit leicht divergenten Bündeln arbeiten. Dann erhält man Interferenzmuster wie dasjenige in Abbildung 6a. Als Annäherung an die Vorgänge im Interferenzdetektor wählt man eine beliebige dunkle Stelle im Muster aus und konzentriert darauf die Beobachtung. Um zu klären, ob man entscheiden kann, welchen → *Pfad* ein Photon am Strahlteiler H1 einschlägt, kann man z. B. den Pfad H1–E2 blockieren.³⁾ Blockiert man einen der Pfade, wird der Interferenzdetektor Ereignisse registrieren. Abbildung 6b zeigt, dass jede der vorher dunklen Stellen jetzt beleuchtet wird.

Diese Erscheinung lässt sich elementar deuten: Das System ist wegen des blockierten Pfades nicht mehr in einer → *Superposition*. Daher verschwindet die Interferenz. Man könnte aber auch so darüber sprechen: Jedes der jetzt in DO nachgewiesenen Photonen gibt Rechenschaft darüber, dass der untere Pfad blockiert wurde. Man weist also die Existenz eines Gegenstandes mit Licht nach, das keinen Kontakt mit ihm hatte. Auf eine solche Weise könnte man künftig beispielsweise die Strahlenbelastung beim Röntgen senken.



6 | Interferenzmuster an einem Ausgang eines Mach-Zehnder-Interferometers: a) ohne Welcher-Weg-Information; b) mit Welcher-Weg-Information