

INFORMATION

Glossar zur Quantenphysik

Zentrale Begriffe kurz erläutert

Bunching

Photonen sind Bosonen. Das bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit, ein Photon in einem Zustand zu finden, mit der Anzahl von Photonen steigt, die schon in diesem Zustand sind. Darauf basiert die Funktion des Lasers.

Eine Konsequenz ist auch, dass die im Unterricht üblicherweise verwendeten thermischen Lichtquellen Photonen in sog. bunches aussenden: Auf eine Folge fast gleichzeitig ausgesandter Photonen folgen mehr oder weniger lange emissionsfreie Phasen. In → *Koinzidenzexperimenten* führt das dazu, dass man wesentlich häufiger Koinzidenzen registriert, als nach dem Zufall zu erwarten.

Das Bunching lässt sich auch durch starke Abschwächung des Lichtes nicht beseitigen!

- *Walter, Th.; Walther, H.: Was ist Licht. München: C. H. Beck: 2004, S. 97 ff.*

Ensemble-Erfahrung

Interferenz-Experimente mit gleichartig präparierten Quantenobjekten ergeben identische Muster, unabhängig davon, ob man

- in einem Experiment sehr viele Objekte gleichzeitig verwendet,
- einzelne Objekte verteilt über lange Zeit nacheinander in die Apparatur bringt oder
- jeweils nur wenige Objekte in Experimenten an verschiedenen Orten verwendet und die Messergebnisse anschließend vereint.

„Knallertest“

Um die → *Welcher-Weg-Experimente* klarer darzustellen, wurde der „Knallertest“ entworfen. Man führt gedanklich in einen der beiden Pfade eines Interferometers eine Glaskugel ein, die mit einem Gas gefüllt ist. Dieses Gas sei so beschaffen, dass es durch ein einzelnes Photon bereits zur Ex-

plosion gebracht werden kann. Nun kann man analog zum Schulexperiment zeigen, dass in einem relevanten Prozentsatz der Experimentier-Durchgänge die Kugel nicht explodiert, aber dennoch der Interferenzdetektor anspricht und damit die Existenz der Kugel mithilfe eines Photons verrät, welches das Gas in der Kugel nie „gesehen“ hat.

- *Schulexperiment in Kasten 4 im fachlichen Basisartikel.*

Koinzidenz

Um nachzuweisen, dass Quantenobjekte sich an Strahlteilern nicht teilen und ggf. tatsächlich einzeln unterwegs sind, bringt man in jedem der denkbaren Pfade einen Detektor an und schaltet diese Detektoren über ein UND-Glied so zusammen, dass Impulse nur registriert werden, wenn beide (ggf. mindestens zwei) Detektoren gleichzeitig ansprechen. Ein solches Ereignis nennt man Koinzidenzereignis.

Der Nachweis für einzelnes Auftreten bzw. Unteilbarkeit gilt als erbracht, wenn Koinzidenzen deutlich seltener auftreten, als das durch Zufall zu erklären wäre – idealerweise, wenn keine Koinzidenz auftritt.

- *Versuchskarteikarte „Koinzidenzmessung“*

Komplementarität

Als komplementär zueinander bezeichnet man zwei Messgrößen, die nicht gleichzeitig mit beliebig geringer Messunsicherheit bestimmt werden können. Dies sind z. B. Ort und Impuls. (→ *Unbestimmtheit*)

- *Abschnitt 3.6 in „Quantenobjekte mit Ruhemasse zuerst“*

Nachweiswahrscheinlichkeit

Quantenphysikalische Experimente erlauben nur Wahrscheinlichkeitsaussagen. Wir bevorzugen den Begriff

Nachweiswahrscheinlichkeit, weil er einerseits deutlich macht, dass zu einer sachgerechten Beschreibung eines Experiments immer der Detektor gehört. Der oft verwendete Begriff Aufenthaltswahrscheinlichkeit dagegen ist geeignet, Fehlvorstellungen zu unterstützen. In der Regel ist ja gerade der Ort eines Quantenobjekts nicht bestimmbar.

Nichtlokalität

Die möglichen Beobachtungen in einem Experiment liegen erst dann fest, wenn der gesamte Versuchsaufbau beschrieben wurde. In Delayed-Choice-Experimenten (→ *Welcher-Weg-Information*) etwa oder in verschränkten Systemen (→ *Verschränkung*) wird deutlich, dass die Veränderung an einem Element des Experiments den Ausgang auch dann noch beeinflusst, wenn nach klassischer Auffassung das Quantenobjekt dieses Element längst passiert hat.

- *Kasten 3 und Kasten 4 im fachlichen Basisartikel*

Pfad

Als Pfad bezeichnen wir jede, in den Teilabschnitten geradlinige, klassisch denkbare Verbindung von Quelle über Medium zum Detektor.

Den Pfadabschnitten werden bei klassischen Würfelexperimenten Wahrscheinlichkeiten zugeordnet, die längs des Pfades multipliziert werden.

Bei Quantenobjekten sind die Wahrscheinlichkeiten durch Wahrscheinlichkeitsamplituden (in der Schule: Zeiger) zu ersetzen. Genau genommen müsste man auch krummlinige Verbindungen zulassen. Man macht aber keinen allzu großen Fehler, wenn man sich auf geradlinige Abschnitte beschränkt, wie man z. B. an der Cornu-Spirale erkennen kann.

Wie in der Wahrscheinlichkeitsrechnung sind Wahrscheinlichkeiten

längs eines Pfades zu multiplizieren (unabhängige Ereignisse).

Tragen mehrere Pfade zu einem Ergebnis bei, sind die zugehörigen Produkte zu addieren. In der Quantenphysik muss die erhaltene Summe anschließend noch quadriert werden.

- „Das Zeigermodell im Unterricht über Quantenphysik nutzen“
- Kasten 1 in „Quantenobjekte mit Ruhemasse zuerst“
- Rode, M.: *Cornu-Spirale*. In: *NiU Physik* 26 (2015), Nr. 150, S. 41–42.

Produktzustand

Wenn die Ereignisse an zwei in Koinzidenz betriebenen Detektoren beschrieben werden, lautet die sprachliche Formulierung „Detektor 1 zeigt x UND Detektor 2 zeigt y“. Das sprachliche UND wird durch mehrstufige Baumdiagramme dargestellt und durch Multiplikation berücksichtigt.

- Kasten 5 im fachlichen Basisartikel

Quantenobjekt

Als Quantenobjekte werden hier alle Objekte bezeichnet, die man im Experiment zur Interferenz bringen kann. Eine auch heute noch ungeklärte Frage ist, ob es eine Obergrenze für die Masse von Objekten gibt, von der an sie keine Quantenobjekte mehr sein können. Gesichert ist die Zugehörigkeit zur Menge der Quantenobjekte bis etwa 2000 Protonenmassen.

Quantenradierer

In Welcher-Weg-Experimenten, die die Polarisation als Merkmal verwenden, verschwindet das Interferenzmuster, sobald in den beiden Pfaden orthogonal zueinander polarisiert wird.

Bringt man vor dem Detektor einen weiteren Polarisator an, der im 45°-Winkel zu beiden Wegmarkierern steht, ist am Ort des Detektors nicht mehr entscheidbar, welchen Weg ein registriertes Photon gegangen ist. Das führt dazu, dass wieder ein Interferenzmuster beobachtbar ist – wenn auch schwächer.

Der dritte Polarisator wirkt sozusagen als Quantenradierer, weil er die → *Welcher-Weg-Information* ausstrahlt.

- Kasten 4 im fachlichen Basisartikel
- Kasten 1 auf S. 31 in „Quantenobjekte mit Ruhemasse zuerst“

Stochastische Deutung

Interferenzmuster für Quantenobjekte beschreiben die Wahrscheinlichkeit, ein Quantenobjekt in einem gegebenen Aufbau und an einem gegebenen Ort mit einem Detektor nachzuweisen. Die Muster bilden sich im Laufe der Beobachtungszeit immer klarer heraus.

In diesem Sinne kann man Quantenobjekten im Voraus keinen festen „Einschlagort“ zuweisen – diese Orte sind vielmehr statistisch verteilt.

Superposition

Wenn mehrere → *Pfade* zwischen Quelle und Detektor existieren, muss für jeden Pfad eine Beschreibung in Zeigern angegeben werden. Man kann dabei nicht entscheiden, welchen der Pfade das Quantenobjekt nimmt – würde man Welcher-Weg-Information erzwingen, könnte die Interferenz nicht mehr beobachtet werden.

Man sagt in diesem Fall, das Quantenobjekt sei in einer Superposition (von Möglichkeiten).

- Barth, M. (Hrsg.): *Schwingungen und Wellen*. *NiU Physik* 22 (2011), Nr. 125.

Unbestimmtheits-Relation

Physikalische Größen, deren Operatoren in der mathematischen Quantentheorie nicht miteinander vertauscht werden können, unterliegen einer Unbestimmtheits-Relation. Von den in der Schule angesprochenen Größen sind das Ort und Impuls.

Wichtig ist, dass die Unbestimmtheitsrelationen sich nicht aus mechanistischen Überlegungen ergeben, sondern eine direkte Folge der mathematischen Beschreibung sind.

- Kasten 6 im fachlichen Basisartikel
- Rode, M.: *Die UBR im Unterricht*, *MNU* 60 (2007), Nr. 6, S. 470 ff.

Verschränkung

Wenn durch den Versuchsaufbau oder die gemeinsame Erzeugung von zwei Quantenobjekten die Pfade zweistufig sind (UND-Ereignisse, Produktzustände) und es mehrere Pfade zum gleichen Ereignis gibt (Superposition), nennt man das System aus den beiden Quantenobjekten verschränkt.

Dann scheint es so, als könne man durch Manipulation an einem der Objekte das andere über große Entfernungen überlichtschnell ebenfalls manipulieren. Diese Vorstellung von einer wie auch immer gearteten kausalen Kopplung der beiden Objekte gilt sowohl experimentell als auch theoretisch als widerlegt. Zutreffend ist, dass nur die Auffassung des gesamten Systems aus Aufbau und beiden Quantenobjekten zusammen die zutreffende Beschreibung ergibt. Diese Tatsache wird durch den Begriff → *Nichtlokalität* beschrieben.

- Kasten 5 im fachlichen Basisartikel

Wahrscheinlichkeits-Amplitude

Als Wahrscheinlichkeitsamplitude bezeichnet man die den einzelnen Abschnitten in einem Baumdiagramm zuzuschreibenden Zeiger, die entsprechend den Pfadregeln längs eines Pfades multipliziert, bei Vorliegen mehrerer Pfade addiert werden und deren Summe endlich quadriert wird.

Welcher-Weg-Experiment

Welcher-Weg-Experimente dienen der Beantwortung der Frage, welchen Weg ein Quantenobjekt in einer durch Superposition zu beschreibenden Anordnung geht.

Auch in Schulexperimenten kann man demonstrieren, dass die Beantwortung der Welcher-Weg-Frage das Interferenzmuster unlesbar macht. Mit schulischen Mitteln lassen sich nur Analogexperimente ausführen. Diese sind auch klassisch erklärbar, aber mit identischen Ergebnissen auch mit Einzelphotonen ausgeführt worden.

Im Zusammenhang mit dem Quantenradierer können Welcher-Weg Experimente einen Teilaspekt von Nicht-Lokalität beschreiben helfen, wenn man sog. Delayed-Choice-Experimente durchführt. Sie sind nicht klassisch erklärbar.

- Kasten 4 im fachlichen Basisartikel

Michael Rode