

Sicherheit durch „Selber Lösen“

Dieses Übungsblatt soll Ihnen zeigen, dass Sie Kompetenzen in der Quantenphysik haben, Ihnen also Sicherheit geben. Ihre Antwort wird natürlich **nicht** eingesammelt. Sie bekommen allerdings nach Ihrer Bearbeitung ein Blatt mit der Musterlösung. Außerdem wird die Lösung im Anschluss von uns besprochen.

Sie können die Aufgaben in Einzel- oder gern auch in Partnerarbeit lösen. Wenn Sie Fragen haben, stehen wir zur Verfügung. (Wir geben auch Tipps! ☺)

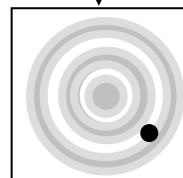
Aufgabe 1

Wenn man Laserlicht durch ein Interferometer-Experiment (ohne Polarisatoren) schickt, bekommt man auf dem Schirm ein Muster von Beugungsringen.

- a) Ein Physiker schickt ein einzelnes Photon durch ein Interferometer-Experiment (ohne Polarisatoren). Welche Vorhersage kann man für sein Schirmbild machen?

Das Photon wird nur an genau einem Ort detektiert. Über diesen Ort kann man keine Vorhersage machen. (Außer ev. dass es auf keinem der Minimumskreise auftreffen wird.)

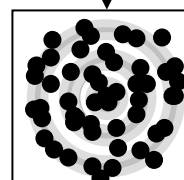
Zeichnen Sie hier ein typisches Schirmbild für 1 Photon.
(Angedeutet ist das klassische Schirmbild.)



- b) Nun schickt er einen Pulk von ca. 50 Photonen durch seine Anordnung. Welche Vorhersage kann man nun für das Schirmbild machen?

Das Bild besteht aus 50 einzelnen Detektionspunkten. Diese Punkte sind statistisch verteilt, allerdings folgt die Häufigkeit in etwa der klassischen Intensitätsverteilung. D.h. viele Detektionen auf den Ringen, weniger dazwischen. Im typischen Fall wird man die Ringe bereits erahnen können.

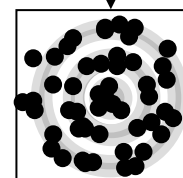
Zeichnen Sie hier ein typisches Schirmbild für 50 Photonen.



- c) 50 Physiker/innen bauen an 50 verschiedenen Orten der Erde das identische Interferometer-Experiment (ohne Polarisatoren) auf. Jeder schickt nur **ein** Photon durch die Anordnung und kopiert sein Ergebnis auf eine Folie. Bei einem Treffen legen die 50 Physiker ihre Folien übereinander. Welche Vorhersage kann man für das entstehende Gesamtbild machen?

Die Lösung ist die gleiche wie im Fall b), da auch einzelne Photonen, die überhaupt nicht miteinander wechselwirken zu diesem Interferenzbild beitragen. Es kommt nur auf die Präparation des Einzelphotons an.

Zeichnen Sie hier ein typisches Schirmbild für die 50 Photonen von c)



Aufgabe 2:

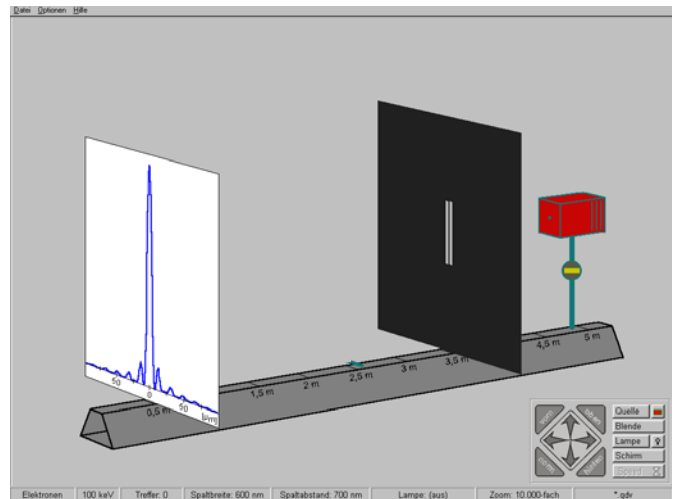
Person A und B machen je eine Aussage über das Doppelspaltexperiment mit Elektronen ohne Ortsmessungen an den Spalten.

Person A sagt: „Auch wenn man nicht weiß, durch welchen Spalt das Elektron geht: Das Elektron geht immer entweder durch den linken oder durch den rechten Spalt.“

Person B sagt: „Man kann dem Elektron keinen Spalt zuschreiben, durch den es gegangen ist.“

Beschreiben Sie, wie man experimentell entscheiden kann, wer recht hat.

Was ist das experimentelle Ergebnis? Wer hat also recht, A oder B? Begründung!



Experiment: Man lässt einzelne Elektronen durch einen Doppelspalt auf einen Schirm gelangen. Zuerst öffnet man nur den linken Spalt. Dann öffnet man nur den rechten Spalt. Schließlich öffnet man beide Spalte.

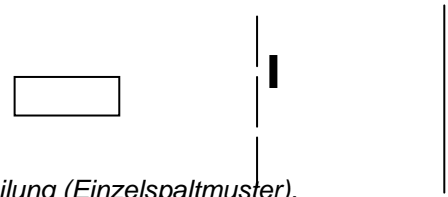
Ergebnis: Ist der linke Spalt offen, so bekommt man eine breite Verteilung (Einzelspaltmuster). Ebenso, wenn man den rechten Spalt öffnet.

Wenn man beide Spalte öffnet, bekommt man jedoch ein Doppelspaltinterferenzmuster.

Begründung, warum B recht hat:

Wenn A recht hätte, und man würde beide Spalte öffnen, dann würde das Elektron entweder links oder rechts durchgehen. Wenn es links durchgeht, trägt es zur breiten Verteilung bei, wenn es rechts durchgeht, auch. Folglich müsste sich bei zwei geöffneten Spalten die Summe der zwei Einzelspaltmuster ergeben.

Dies ist nicht der Fall, also muss die Annahme von A falsch sein.



Aufgabe 3:

Ein Heliumatom wird auf eine extrem dünne Folie (einatomige Schicht, s. Abb) von regelmäßig angeordneten Atomen geschossen.

Es wird dort reflektiert und auf einem Schirm aufgefangen.

Es können zwei Ereignisse eintreten:

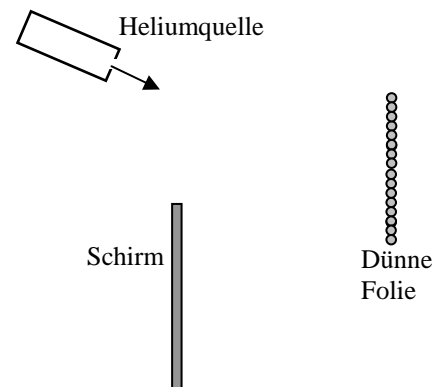
I: Das Heliumatom wird reflektiert und lässt die dünne Schicht unversehrt.

II: Das Heliumatom wird reflektiert, schlägt dabei aber ein Atom aus der dünnen Schicht.

Man beobachtet:

Im Fall I trägt das reflektierte Helium zu einem Interferenzmuster bei, im Fall II trägt es zu einer breiten Verteilung bei.

Erklären Sie dieses Ergebnis mit der Quantentheorie.



In der Quantentheorie gilt die Grundregel: Nur unterscheidbare Möglichkeiten interferieren.

Im Fall I. kann man nicht feststellen, von welchem der Atome das Heliumatom reflektiert wurde. Man muss also für die verschiedenen Möglichkeiten die Pfeile addieren und dann quadrieren. Man erhält Interferenz.

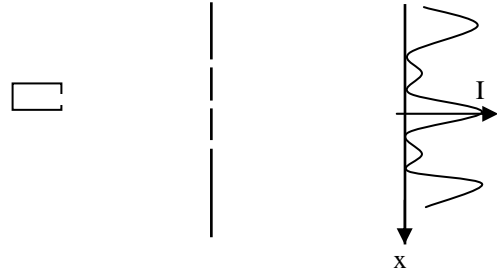
Im Fall II kann man feststellen, von welchem Atom das Helium reflektiert wurde (von dem, wo jetzt das Loch in der Folie ist). Man hat also nur eine Möglichkeit, also nur einen Pfeil zu quadrieren, das ergibt die breite Verteilung.

Aufgabe 4:

Wassermoleküle werden auf einen Dreifachspalt geschossen und dahinter auf einem Schirm aufgefangen.

- a) Warum müssen die Wassermoleküle alle etwa die gleiche Geschwindigkeit haben, damit nach vielen Wiederholungen des Versuchs ein deutliches Interferenzmuster entsteht?

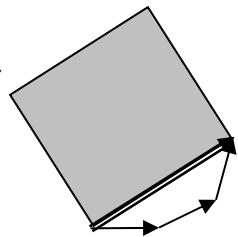
Für ein scharfes Interferenzmuster müssen alle Moleküle gleichen Impuls, also gleiche Geschwindigkeit v haben, weil die Wellenlänge λ die Lage der Maxima bestimmt und $\lambda = h/(mv)$ ist.



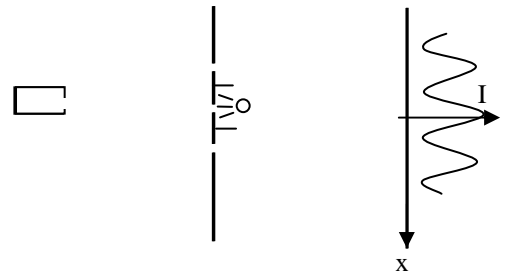
Zeichnen Sie das zugehörige $P(x)$ rechts ein.

Beschreiben Sie, wie man mit Hilfe von Pfeilen eine Vorhersage für das Auftreffen der Wassermoleküle auf dem Schirm machen kann. Zeichnen Sie auch ein Beispiel-Pfeildiagramm.

Beim Dreifachspalt gibt es drei Möglichkeiten, für jede nehmen wir einen rotierenden Zeiger. Jeder rotierende Zeiger misst, wie oft λ in die Länge der Zeigerlinie passt, dadurch erhält man einen Pfeil. Da die Möglichkeiten nicht unterscheidbar sind, werden die drei Pfeile vektoriell addiert und dann quadriert. Dadurch entsteht das bekannte Muster für den Dreifachspalt. Diese Kurve ist die Wahrscheinlichkeitsverteilung. Sie gibt an, wie groß die (relative) Wahrscheinlichkeit für ein Molekül ist, an einer bestimmten Stelle x aufzutreffen.



- b) Nun wird der mittlere Spalt beleuchtet, sodass man (lediglich) feststellen kann, ob ein Wassermolekül diesen Spalt passiert (s. schematische Abbildung links). Welches Ergebnis erwarten Sie nun auf dem Schirm?

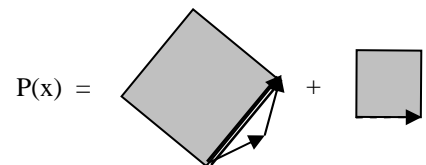


Zeichnen Sie $P(x)$ ein.

Nun erwartet man das Doppelspaltmuster addiert zu einem Einzelspaltmuster.

Beschreiben Sie, wie man dieses Ergebnis mit Hilfe des Pfeilformalismus bekommt. Zeichnen Sie auch ein Beispiel-Pfeildiagramm.

Wieder hat man drei Möglichkeiten, also drei Pfeile. Nun ist allerdings eine Möglichkeit von den beiden anderen unterscheidbar. Der zugehörige Pfeil wird getrennt quadriert, die beiden anderen werden zuerst vektoriell addiert dann quadriert. Die beiden Teilwahrscheinlichkeiten werden addiert.



Wie hängt der Ort des 1. Maximums vom Abstand d zweier benachbarter Spalte ab? Notieren Sie eine Formel!

Der Doppelspalt aus dem linken und rechten Spalt ist effektiv doppelt so groß wie d . Folglich ist der Ort x_1 des 1. Maximum: $x_1 = \text{Abstand}(\text{Spalte}, \text{Schirm}) \cdot \lambda / (2d)$

Aufgabe 5.

Elektronen werden durch ein Doppelspaltexperiment geschickt. Mit einer Lichtquelle am linken Spalt stellt man zuverlässig fest, ob dort ein Elektron durchgeht.

- a) Erwarten Sie am Schirm Doppelspalt-Interferenz?
Begründen Sie mit einem Grundprinzip der Quantenphysik!

Man bekommt keine Interferenz, weil man bei jedem Elektron weiß, ob es links oder rechts durchgegangen ist:

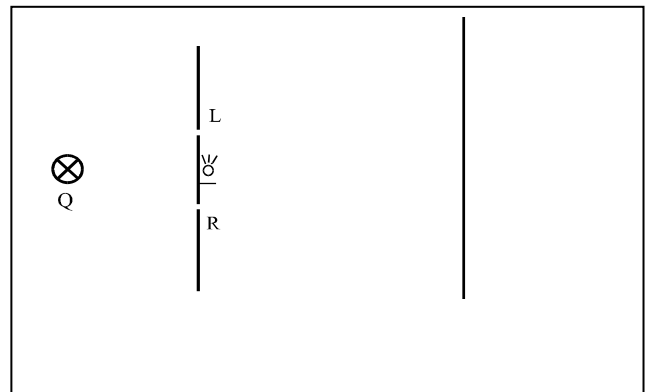
Bei Emission eines Elektrons und Lichtstreuung am linken Spalt ist es links durchgegangen.

Bei Emission eines Elektrons und keiner Lichtstreuung am linken Spalt ist es rechts durchgegangen.

Man erhält also in jedem Fall eine Weginformation. Weginformation und Interferenz schließen sich aber aus.

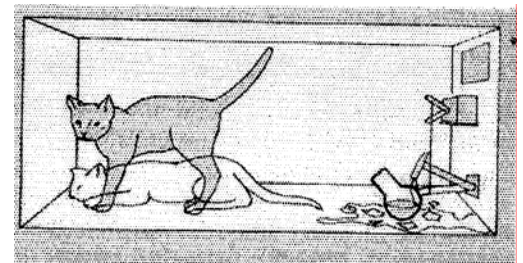
- b) Person C behauptet: „Die Elektronen werden durch die Wechselwirkung mit dem Licht aus ihrer ursprünglichen Bahn gestoßen. Kein Wunder, dass sie nicht mehr zum Doppelspaltmuster beitragen.“
Wie kann man Person C widerlegen?

Wenn das Elektron nicht links registriert wird, wird kein Photon beeinflusst, ein Stoß findet nicht statt. Obwohl also die Elektronen ohne Stoß durch den rechten Spalt fliegen, tragen sie zum Einzelspaltmuster bei.



Aufgabe 6:

- a) Mit seinem „Katzenexperiment“ wollte Schrödinger eine für ihn unglaubliche Vorhersage der Quantenphysik aufzeigen. Erläutern Sie kurz seine **Argumentation**.
(**Keine Versuchsbeschreibung** verlangt!)



Das zerfallende Atom ist in einem Überlagerungszustand.

Daran gekoppelt ist der Zustand der Katze, die also in einem Zustand zwischen „tot“ und „lebendig“ sein müsste. Dies kann man sich bei einer Katze nicht vorstellen; es spricht gegen jede Alltagserfahrung.

- b) Beschreiben Sie, wie man den anscheinenden Widerspruch mit Dekohärenz auflösen kann. Welches Grundprinzip der Quantenphysik benutzen Sie?

Durch kosmische Strahlung oder Wärmestrahlung usw. wird gemessen, in welchem Zustand sich die Katze befindet. Dadurch wird sie „umpräpariert“ in „tot“ oder „lebendig“.

(Prinzip der Ganzheitlichkeit und Messpostulat)

Aufgabe 7:

Zur Quantenverschlüsselung: Alice sendet Photonen an Bob.

a) Links hört niemand ab.

b) Rechts hört Eve ab.

Alice	Gesendete Photonen:				
	Gesendete Bits:	1	0	0	0
Eve	hört ab				
	<input checked="" type="radio"/> Nein				
	<input type="radio"/> Ja				
Bob	Polarisatorstellungen:				
	Erhaltene Photonen:				
	Erhaltene Bits:	-	0	-	0

Alice	Gesendete Photonen:				
	Gesendete Bits:	1	0	0	1
Eve	Polarisatorstellungen:				
	hört ab				
	<input type="radio"/> Nein				
	<input checked="" type="radio"/> Ja				
	Erhaltene Photonen:				
	Erhaltene Bits:				
	-				
	1				
	-				
	1				
	Weitergesendet:				
Bob	Polarisatorstellungen:				
	Erhaltene Photonen:				

Zu a) (linkes Tableau):

In welchen der Übertragungen war die Bitübermittlung aufgrund der Basiswahl von Alice und Bob zuverlässig?

Nur die zweite Übertragung war zuverlässig, da sowohl Alice als auch Bob in der gleichen Basis gemessen haben. Bei der vierten Übertragung hätte Bob sein Photon (das Bit 0 bedeutet) auch aus einem senkrechten Photon (bedeutet Bit 1) von Alice erhalten können.

Zu b) (rechtes Tableau):

Bei welchen der vier Photonen können Alice und Bob durch Vergleich ihrer Photonen bemerken, dass Eve abhört?

Beim ersten zweiten Photon misst Bob Polarisationen, die auf denen von Alice senkrecht stehen. Dies ist nur möglich, wenn eine Abhörstation dazwischensteht.

Allgemein:

Es wurde eine Methode vorgestellt, mit der ein Zufallschlüssel abhörer übermitteln wird.

Welche quantenphysikalischen Prinzipien ermöglichen dies?

1. „Quantennatur“: Photonen sind unteilbar.
2. „Unbestimmtheit“: Die Bestimmung einer Eigenschaft (45°-Polarisation) macht eine andere Eigenschaft (senkrecht-waagrecht Polarisation) völlig unbestimmt.
3. „Messpostulat“: Sobald Eve misst, wird das Photon in einen Eigenzustand ihres Polarisators gezwungen.