

Quanten und Atome

Wahrscheinlichkeitsverhalten von
Quantenobjekten

Dr. Michelle Schwarz

AG Prof. Dr. Rolf Pelster | Fakultät NT



UNIVERSITÄT
DES
SAARLANDES

Doppelspaltversuch

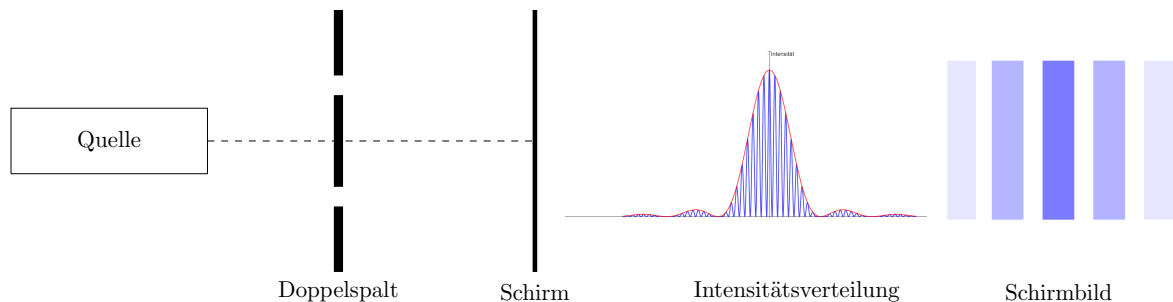
Schwerpunkt	Wahrscheinlichkeitsverhalten von Quantenobjekten
Klassenstufe	12-13, G-Kurs und L-Kurs
Art	Versuchsdurchführung mit einer Simulation
Positionierung	nach dem Photoeffekt und der Elektronenbeugung
Lernvoraussetzungen	Doppelspaltversuch mit Licht, Photonenmodell, Materiewellen
Lernziel	Die SuS beschreiben den Doppelspaltversuch mit einzelnen Quantenobjekten und ein Delayed-Choice-Experiment.
Kompetenzen ¹	S3, S4, K3, K4
Kategorien	Erarbeitung von neuem Stoff 01234 Einübung von bekanntem Stoff 01234 Öffnung der Aufgabe 01234 Grad der Mathematisierung 01234 Experimenteller Anteil 01234

¹Kompetenzen entnommen aus: KMK & IQB. (2020). *Bildungsstandards im Fach Physik für die Allgemeine Hochschulreife: Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 18.06.2020*. Kronach: Carl Link Verlag. ISBN: 978-3-556-09045-9.

Der Doppelspaltversuch mit einzelnen Quantenobjekten

Frage: Ist das Wellenmodell oder das Teilchenmodell korrekt, um Licht zu beschreiben?

Zur Beantwortung dieser Frage betrachten wir einzelne Quantenobjekte am Doppelspalt. Die Intensitätsverteilung hinter dem Doppelspalt bei der Bestrahlung mit Laserlicht kennen Sie bereits:



Aufgabe 1

Der Physiker Geoffrey Ingram Taylor führte ein analoges Beugungsexperiment im Jahr 1908 mit extrem schwachem Licht durch. Lesen Sie die übersetzte Originalarbeit von Taylor (über QR-Code erreichbar). Beschreiben Sie den Versuch und die Erkenntnisse von Taylor in eigenen Worten.



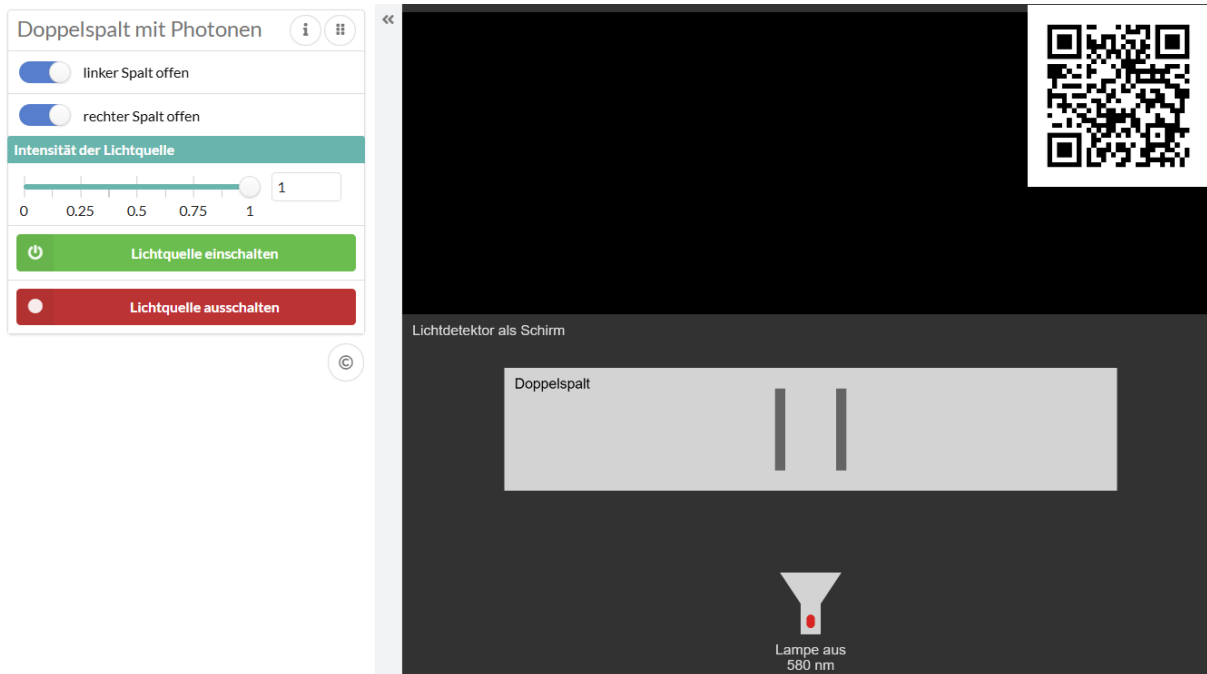
Beim Taylorversuch stand eine Kerze vor einem schmalen Spalt. Die Intensität des Lichts wurde mit Rauchglasscheiben verringert. Das so stark abgeschwächte Licht wurde an einer Nadel gebeugt. Auf einem Film (Photoplatte) wurde das Interferenzmuster aufgenommen.

Um den Anteil des Lichts zu bestimmen, der durch die Rauchglasscheiben gefiltert wird, wurde eine Photoplatte dem direkten Gaslicht eine bestimmte Zeit ausgesetzt. Im zweiten Schritt wurde die Photoplatte einer, durch verschiedene Rauchglasscheiben abgeschwächten, Gasflamme so lange ausgesetzt bis sie so schwarz war wie die Platte im ersten Schritt. Die notwendigen Belichtungszeiten wurden proportional zu den Intensitäten der Gasflamme angenommen.

Taylor führte den Versuch fünfmal durch, einmal mit direkter Belichtung des Spalts und viermal mit Rauchglasscheiben zwischen Flamme und Spalt. Die Belichtungszeit für die erste Belichtung erhielt er durch Ausprobieren. Die restlichen Belichtungszeiten wurden durch die entsprechenden Intensitäten gewonnen. Die längste Zeit waren ca. 3 Monate. In keinem Fall beobachtete er eine Abnahme in der Schärfe der Interferenzmuster, obwohl nicht alle Platten das Niveau an Dunkelheit der ersten Photoplatte erreichten.

Aufgabe 2

Derartige Beugungsexperimente können heute auch mit einzelnen Quantenobjekten durchgeführt werden. Wir betrachten exemplarisch die Beugung am Doppelspalt. Führen Sie den Doppelspaltversuch mit Photonen mit der Simulation durch (über QR-Code erreichbar) Beschreiben Sie für a)-c) Ihre Beobachtung.



Simulation zur Durchführung des Doppelspaltversuchs mit einzelnen Quantenobjekten, Quelle: Europaschule Gymnasium Westerstede, abrufbar unter https://www.physik.gym-wst.de/apps/qp/04_doppelspaltphoton02/doppelspaltphoton02.html, Zugriff am 28.10.2025

- Öffnen Sie den linken Spalt, schließen Sie den rechten Spalt und schalten Sie die Quelle ein.
- Schließen Sie nun den linken Spalt, öffnen Sie den rechten Spalt und schalten Sie die Quelle ein.
- Öffnen Sie beide Spalte und schalten Sie die Quelle ein.
- Beschreiben Sie die Entstehung des Musters auf dem Schirm.

- Ist der linke Spalt offen und der rechte geschlossen, entsteht auf dem Schirm eine Anhäufung von Punkten in der Verlängerung der Achse des linken Spalts (Bild eines Einzelspalts).
- Ist der rechte Spalt offen und der linke geschlossen, entsteht auf dem Schirm eine Anhäufung von Punkten in der Verlängerung der Achse des rechten Spalts (Bild eines Einzelspalts).

- c) Sind beide Spalte geöffnet, so entsteht ein typisches Doppelspalt-Interferenzmuster mit einem Hauptmaximum in der Mitte und sich abwechselnden Maxima und Minima höherer Ordnung rechts und links davon.
- d) Die einzelnen Quantenobjekte treffen zufällig auf den Schirm auf und lassen einzelne Punkte aufleuchten. Es lässt sich nicht vorhersagen, welcher Punkt als nächstes aufleuchtet. Nach einer gewissen Zeit setzen sich diese Punkte zum charakteristischen Doppelspalt-Interferenzmuster zusammen.

- e) Einige Beobachtungen des Doppelspaltversuchs können mit dem Wellenmodell, andere mit dem Photonenmodell erklärt werden. Ordnen Sie den Beobachtungen die passende Erklärung zu (über QR-Code erreichbar). Kreuzen Sie in der Tabelle an, welche Beobachtung mit dem Wellenmodell und welche mit dem Photonenmodell erklärt werden kann.

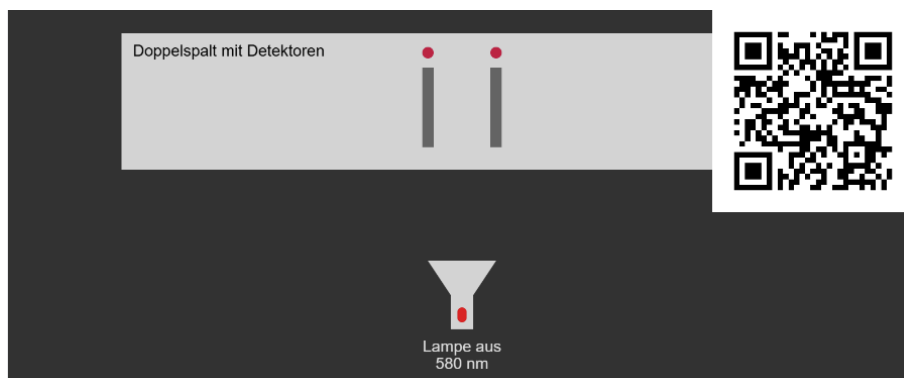
Beobachtung	Wellenmodell	Photonenmodell
Auf dem Schirm erscheinen einzelne Punkte, deren Ort nicht erklärbar ist.		x
Es entsteht ein Interferenzmuster.	x	



Aufgabe 3

Sie wissen bereits, dass ein Interferenzmuster durch die Überlagerung von Wellen entsteht. Wie kann ein einzelnes Quantenobjekt Interferenz zeigen? Teilt es sich auf?

Betrachten Sie zur Beantwortung dieser Frage das folgende Video (über QR-Code erreichbar). Hinter jedem Spalt wird ein Detektor angebracht. Passiert ein Photon den Spalt, so leuchtet der Detektor grün. Ist der Detektor ausgeschaltet, so leuchtet er rot. Ist er angeschaltet, aber kein Photon passiert den Spalt, leuchtet er gelb.



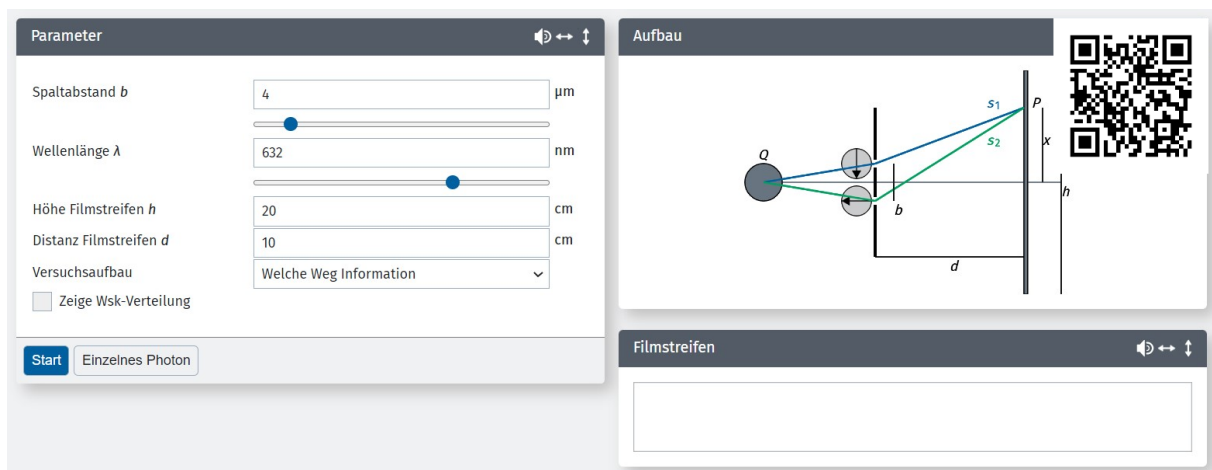
Video zur Überprüfung der Teilung des Photons, Quelle: Europaschule Gymnasium Westerstede, abrufbar unter https://www.physik.gym-wst.de/apps/qp/04_doppelspaltphoton03/doppelspaltphoton03.html, Zugriff am 28.10.2025

Es leuchtet immer nur ein Detektor grün, das heißt es befindet sich immer nur ein Photon im Strahlengang und es teilt sich nicht auf.

Aufgabe 4

Anstelle von Detektoren können auch Polarisationsfilter in den Strahlengang eingebracht werden. Führen Sie die folgenden Versuchsteile mit der Simulation (über QR-Code erreichbar) durch. Beobachten Sie das entstehende Muster auf dem Filmstreifen.

- Wählen Sie den Standard-Versuchs-Aufbau und starten Sie die Simulation.
- Wählen Sie nun den Aufbau „Welche Weg Information“. Es werden zwei Polarisationsfilter in den Strahlengang eingebracht, die senkrecht zueinander stehen.



Simulation zum Delayed-Choice-Experiment, Quelle: Thomas Kippenberg, abrufbar unter <https://kippenbergs.de/mint-dualism>, Zugriff am 19.11.2023

- Wir erhalten das Interferenzmuster aus Aufgabe 2.
- Das Interferenzmuster verschwindet.

- Durch den Einbau der Polarisationsfilter erhält jedes einzelne Photon eine Welcher-Weg-Information (Möglichkeit der Durchführung der Messung ist gegeben). Formulieren Sie aus Ihren Beobachtungen aus den Aufgabenteilen a) und b) hinsichtlich Welcher-Weg-Information und Interferenzmuster das quantenmechanische Fundamentalprinzip.

Quantenmechanisches Fundamentalprinzip

- c) Liegt eine Welcher-Weg-Information vor, so entsteht kein Interferenzmuster. Liegt keine Welcher-Weg-Information vor, so entsteht ein Interferenzmuster.
→ Welcher-Weg-Information und Interferenzmuster sind komplementär zueinander.

- d) Wählen Sie nun den Aufbau „Quantenradierer“. Vor dem Schirm wird ein dritter Polarisationsfilter eingebracht, der im 45°-Winkel zu den anderen steht. Erklären Sie, warum dieser Aufbau als Quantenradierer bezeichnet wird.

- d) Das Interferenzmuster erscheint wieder. Der dritte Polarisationsfilter „radiert“ die Quanteneigenschaft „Welcher-Weg-Information“ weg, sodass das Interferenzmuster wieder erscheint.

Delayed-Choice-Experiment

Der Quantenradierer wird auch als Delayed-Choice-Experiment bezeichnet, da auch nach Passieren des Doppelspalts und der ersten beiden Polarisationsfilter noch über den Einbau des dritten Polarisationsfilters (45°) entschieden werden kann. Damit wird der Ausgang des Experiments verzögert beeinflusst.

Aufgabe 5

Der Doppelspaltversuch kann auch mit Elektronen durchgeführt werden. Als Quantenobjekte zeigen Elektronen am Doppelspalt das gleiche Verhalten wie Photonen. Einen Unterschied sieht man lediglich anhand des entstehenden Interferenzmusters. Entscheiden Sie begründet, welches Interferenzmuster von Elektronen und welches von Photonen erzeugt wurde. Sie dürfen den Zusammenhang $d_k = \frac{k \cdot \lambda \cdot l}{g}$ verwenden, wobei d_k den Abstand vom 0. zum k. Maximum angibt, $l = 1$ m der Abstand zum Schirm und $g = 10 \mu\text{m}$ der Spaltabstand ist.

Schirmbild 1		Schirmbild 2	
d_1	0,05 m	d_1	$1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}$
d_2	0,1 m	d_2	$3 \cdot 10^{-5} \text{ m}$
d_3	0,15 m	d_3	$4,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}$

Für das 1. Schirmbild erhält man die Wellenlänge

$$d_1 = 0,05 \text{ m} \Rightarrow \lambda = 500 \text{ nm}$$

$$d_2 = 0,1 \text{ m} \Rightarrow \lambda = 500 \text{ nm}$$

$$d_3 = 0,15 \text{ m} \Rightarrow \lambda = 500 \text{ nm}$$

Für das 2. Schirmbild erhält man die Wellenlänge

$$d_1 = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m} \Rightarrow \lambda = 0,15 \text{ nm}$$

$$d_2 = 3 \cdot 10^{-5} \text{ m} \Rightarrow \lambda = 0,15 \text{ nm}$$

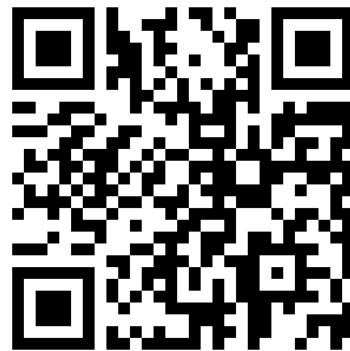
$$d_3 = 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ m} \Rightarrow \lambda = 0,15 \text{ nm}$$

Da die Wellenlänge im ersten Schirmbild im sichtbaren Bereich liegt, kann dieses Schirmbild Photonen zugeordnet werden. Das zweite Schirmbild entstand daher bei der Durchführung mit Elektronen.

Lösung



Lösung



LEK

Didaktische Hinweise

- Der Doppelspaltversuch kann im realen Experiment mit einzelnen Quantenobjekten durchgeführt werden und ist nicht nur mit einer Simulation möglich.
- Der Zustandsbegriff und der Begriff des Messens in Bezug auf den „Kollaps der Wellenfunktion“ sind an dieser Stelle noch nicht bekannt. Aussagen wie „Das Photon geht durch Spalt 1“ sollen nicht verwendet werden. Das Photon befindet sich am Ort des Doppelspalts in einem Superpositionszustand. Auch das Einbringen von Detektoren oder Polarisationsfiltern ändert dies nicht.
- Ebenfalls falsch ist „Der Detektor misst, durch welchen Spalt das Photon gegangen ist“. Am Ort des Doppelspalts war das Photon aber in einem Superpositionszustand. Durch die Messung wird der Superpositionszustand auf die Werte der „Detektor 1 klickt“ oder „Detektor 2 klickt“ reduziert.

- Ein den SuS bekanntes Analogon zu Einzelphotonendetektoren sind Geiger-Müller-Zählrohre zum Nachweis radioaktiver Strahlung. Die mittlere Zerfallsrate einer Probe ist vorhersagbar, nicht aber die Zeitpunkte des Zerfalls einzelner Kerne: man hört daher statistische „Knackgeräusche“.
- Das Verhalten der Photonen an den Polarisationsfiltern wird hier phänomenologisch betrachtet. Die Erklärung folgt in einer eigenen Lernumgebung.
- Bei vorhandener Welcher-Weg-Information zeigen Quantenobjekte Teilchencharakter, bei vorhandenem Interferenzmuster Wellencharakter. Der Übergang ist kontinuierlich, das heißt bei zunehmenden Winkelunterschied der Polarisationsfilter verblasst das Interferenzmuster zunehmend (siehe Lernumgebung zum Mach-Zehnder-Interferometer). Die Komplementarität von Welcher-Weg-Information und Interferenzmuster ist somit eine Unbestimmtheitsrelation analog der im späteren Verlauf behandelten Heisenberg'schen Unbestimmtheitsrelation.
- Bei dem Quantenradierer sollten Formulierungen wie „rückgängig machen“ nicht verwendet werden, da dann die Vorstellung einer Retrokausalität entstehen könnte. Es handelt sich aber um eine verzögerte Wahl der Beobachtungen im Experiment. Die Kausalität wird nicht verletzt.
- Im Anschluss an die Lernumgebung sollte die Anfangsfrage „Welches Modell ist richtig?“ diskutiert werden. Dabei ist darauf zu achten, dass das Licht Wellen- und Teilchencharakter zeigt, aber die eindeutige Natur des Lichts damit nicht festgelegt ist.

Kompetenzen und Anforderungsbereiche

Aufgabe	Kompetenzen: Die SuS ...	Anforderungsbereich
Aufgabe 1		
1	K3: entnehmen unter Berücksichtigung ihres Vorwissens aus Beobachtungen, Darstellungen und Texten relevante Informationen und geben diese in passender Struktur und angemessener Fachsprache wieder. K4: formulieren unter Verwendung der Fachsprache chronologisch und kausal korrekt strukturiert.	II
Aufgabe 2		
a) - c)	S4: bauen Versuchsanordnungen auch unter Verwendung von digitalen Messwerterfassungssystemen nach Anleitungen auf, führen Experimente durch und protokollieren ihre Beobachtungen.	II

e)	S3: wählen aus bekannten Modellen bzw. Theorien geeignete aus, um sie zur Lösung physikalischer Probleme zu nutzen.	III
Aufgabe 3		
	S3: wählen aus bekannten Modellen bzw. Theorien geeignete aus, um sie zur Lösung physikalischer Probleme zu nutzen.	III
Aufgabe 4		
a) - b)	S4: bauen Versuchsanordnungen auch unter Verwendung von digitalen Messwerterfassungssystemen nach Anleitungen auf, führen Experimente durch und protokollieren ihre Beobachtungen.	II
c) - d)	S3: wählen aus bekannten Modellen bzw. Theorien geeignete aus, um sie zur Lösung physikalischer Probleme zu nutzen.	III
Aufgabe 5		
5	S3: wählen aus bekannten Modellen bzw. Theorien geeignete aus, um sie zur Lösung physikalischer Probleme zu nutzen. S7: wenden bekannte mathematische Verfahren auf physikalische Sachverhalte an.	III