

Quanten und Atome

Wahrscheinlichkeitsverhalten von
Quantenobjekten

Michelle Schwarz

AG Prof. Dr. Rolf Pelster | Fakultät NT



UNIVERSITÄT
DES
SAARLANDES

Realität

Schwerpunkt	Fakultativer Inhalt: Quantenmechanisches Weltbild																														
Klassenstufe	12-13, G-Kurs und L-Kurs																														
Art	Lernumgebung																														
Positionierung	nach der Behandlung der Determiniertheit in der Quantenphysik																														
Lernvoraussetzungen	Doppelspaltversuch, Superpositionsbegriff																														
Lernziel	Die SuS definieren einen quantenmechanischen Zustand und erläutern die Einschränkung des Realitätsbegriffs in der Quantenphysik am Beispiel des Doppelspalts.																														
Kompetenzen ¹	S3, E10, K3, K6																														
Kategorien	<table><tr><td>Erarbeitung von neuem Stoff</td><td>0</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr><tr><td>Einübung von bekanntem Stoff</td><td>0</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr><tr><td>Öffnung der Aufgabe</td><td>0</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr><tr><td>Grad der Mathematisierung</td><td>0</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr><tr><td>Experimenteller Anteil</td><td>0</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr></table>	Erarbeitung von neuem Stoff	0	1	2	3	4	Einübung von bekanntem Stoff	0	1	2	3	4	Öffnung der Aufgabe	0	1	2	3	4	Grad der Mathematisierung	0	1	2	3	4	Experimenteller Anteil	0	1	2	3	4
Erarbeitung von neuem Stoff	0	1	2	3	4																										
Einübung von bekanntem Stoff	0	1	2	3	4																										
Öffnung der Aufgabe	0	1	2	3	4																										
Grad der Mathematisierung	0	1	2	3	4																										
Experimenteller Anteil	0	1	2	3	4																										

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.

Realität in der Quantenphysik

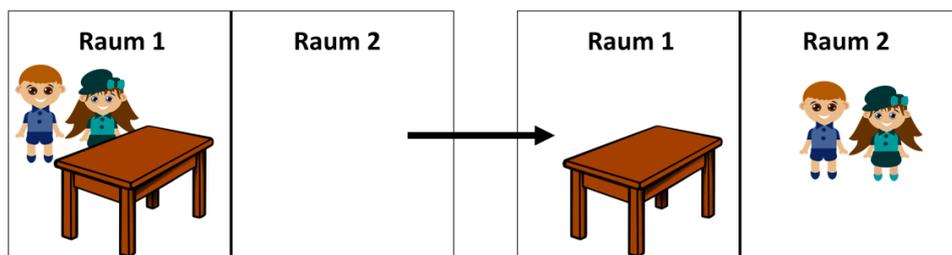
Klassische Definition der Realität

Ein Objekt hat festgelegte Eigenschaften unabhängig davon, ob daran eine Beobachtung (Messung) erfolgt.

Beispiel: Der Tisch befindet sich an einem bestimmten Ort in Raum 1, auch

- wenn wir nicht hinschauen oder
- die genaue Position nicht kennen, weil wir die Position nicht gemessen haben.

Der Wert der Eigenschaft ist festgelegt. Kennen wir den Wert der Eigenschaft Ort (die genauen Koordinaten) nicht, so liegt dies an bloßer Unwissenheit.



Aufgabe 1

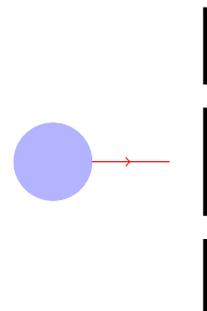
Wir unterscheiden „Eigenschaften“ als messbare physikalische Größen und „Werte von Eigenschaften“ als bei der Messung ermittelte Messwerte. Ordnen Sie die folgenden Begriffe sowohl einander als auch der passenden Kategorie zu.

Material, braun, Höhe, 70 cm, Holz, Koordinaten (3,6,2), Farbe, Ort

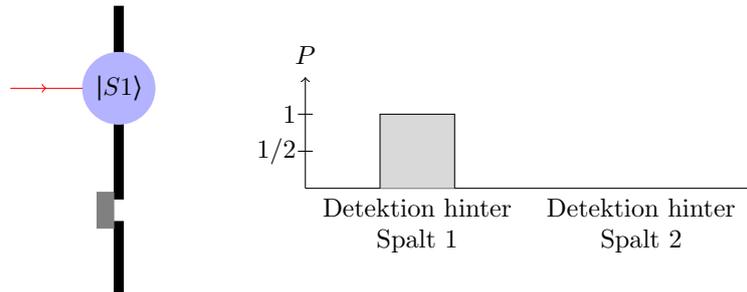
Eigenschaft	Wert der Eigenschaft
Material	Holz
Höhe	70 cm
Ort	Koordinaten (3,6,2)
Farbe	braun

Der Zustandsbegriff

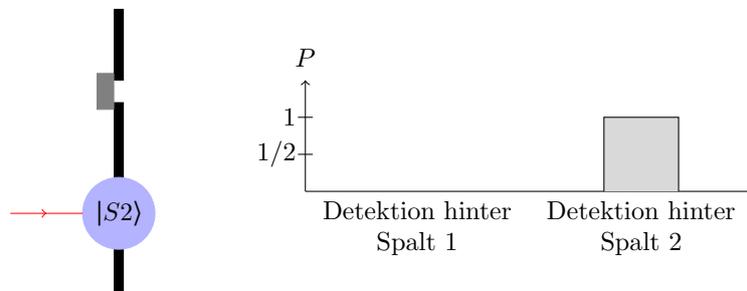
Im Folgenden überprüfen wir die Gültigkeit der klassischen Realitätsdefinition in der Quantenphysik am Beispiel der Eigenschaft „Ort des Photons“ am Doppelspalt. Wir betrachten ein Photon, welches sich dem Doppelspalt nähert. Wir gehen davon aus, dass das Photon hinter dem Doppelspalt detektiert wird.



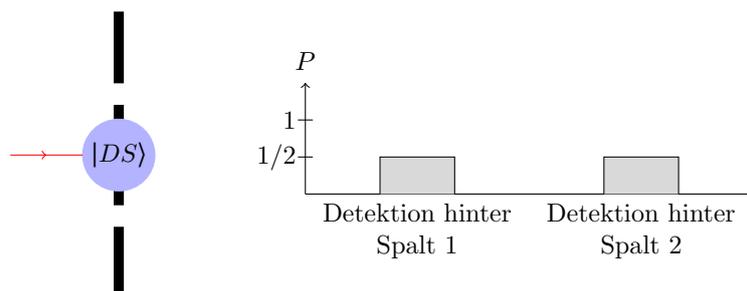
- 1) Es ist nur Spalt 1 geöffnet. Das Photon wird mit der Wahrscheinlichkeit $P = 1$ hinter Spalt 1 detektiert. Es befindet sich im Zustand $|S1\rangle$.



- 2) Es ist nur Spalt 2 geöffnet. Das Photon wird mit der Wahrscheinlichkeit $P = 1$ hinter Spalt 2 detektiert. Es befindet sich im Zustand $|S2\rangle$.



- 3) Es sind beide Spalte geöffnet. Das Photon wird zufällig mit einer Wahrscheinlichkeit von $P = \frac{1}{2}$ hinter Spalt 1 oder Spalt 2 detektiert. Es befindet sich am Ort des Doppelspalts in einem **Superpositionszustand** (Überlagerungszustand) $|DS\rangle$. Dieser setzt sich in gleichen Anteilen aus den beiden Zuständen $|S1\rangle$ und $|S2\rangle$ zusammen. Nur ein solcher Superpositionszustand ist in der Lage, ein Interferenzmuster zu erzeugen.



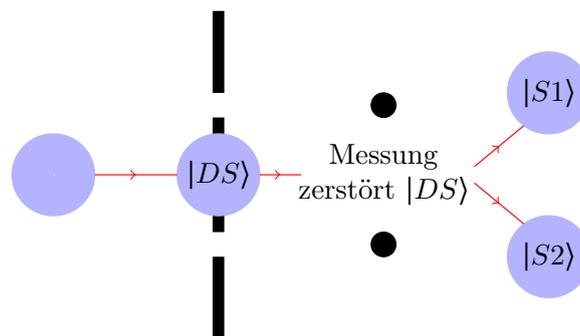
Wir können nicht sagen, durch welchen Spalt das Photon gegangen ist. Am Ort des Doppelspalts liegen somit beide klassischen Möglichkeiten (Spalt 1 oder Spalt 2) gleichzeitig vor.

Der quantenmechanische Zustand

Ein quantenmechanischer Zustand beschreibt ein Quantenobjekt vollständig. Das bedeutet alle Eigenschaften, die man über ein Quantenobjekt erhalten kann, werden durch den quantenmechanischen Zustand beschrieben.

Der quantenmechanische Messprozess

Am Ort des Doppelspalts befindet sich das Photon in dem Superpositionszustand $|DS\rangle$. Durch das Anbringen von Detektoren besteht die Möglichkeit, den Ort des Photons hinter dem Doppelspalt zu bestimmen. Dabei beschreibt $|S1\rangle$ den Zustand, dass Detektor 1 das Photon registriert hat und $|S2\rangle$ den Zustand, dass Detektor 2 das Photon registriert hat.



Die Messung des Detektors führt zu einem eindeutigen Ergebnis: Das Photon befindet sich nach der Messung jeweils mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % im Zustand $|S1\rangle$ oder $|S2\rangle$, es klicken aber niemals beide Detektoren gleichzeitig. Die Messung „zerstört“ also den Superpositionszustand („Kollaps der Wellenfunktion“) und realisiert einen Wert der Eigenschaft Ort. Es gibt hierfür zwei Möglichkeiten:

- $|DS\rangle$ kollabiert zu $|S1\rangle$
- $|DS\rangle$ kollabiert zu $|S2\rangle$

Einschränkung des Begriffs Realität in der Quantenphysik

Die Eigenschaften eines Quantenobjekts können bis zu dem Moment der Messung undefiniert sein, also als Superposition vorliegen. Eine Messung „zerstört“ die Superposition und realisiert einen Wert der Eigenschaft.

Superpositionszustände in der Alltagswelt

In der makroskopischen Welt (Alltagswelt) findet stetig eine Wechselwirkung mit der Umgebung statt. Diese Wechselwirkung entspricht einer Messung und führt damit zum Kollaps der Wellenfunktion. Daher können wir im Alltag keine Interferenzmuster beobachten. Wir bezeichnen das als **Dekohärenz**.

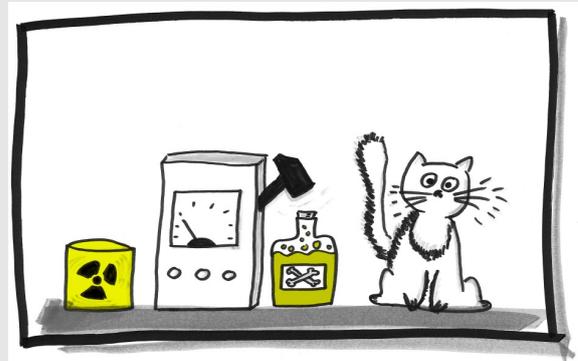
Aufgabe 2

Albert Einstein stellte die provokante Frage: Ist der Mond nur da, wenn man nach ihm schaut? Nehmen Sie Stellung zu dieser Frage.

Die Eigenschaften eines Quantenobjekts, wie zum Beispiel auch der Ort, können bis zur Messung unbestimmt sein. Dies spielt jedoch keine Rolle bei makroskopischen Objekten wie dem Mond. Durch die Dekohärenz (Wechselwirkung mit der Umgebung) ist der Mond immer da, auch wenn man nicht nach ihm schaut.

Aufgabe 3

Erwin Schrödinger führte 1935 ein Gedankenexperiment durch, um zu zeigen, dass die Theorie der Quantenmechanik nicht auf die makroskopische Alltagswelt übertragen werden kann. Das Gedankenexperiment ist heute bekannt unter dem Namen „Schrödingers Katze“. Schrödinger zeigte mit dem Experiment, dass im Falle der Vollständigkeit der Quantenmechanik eine Katze zugleich tot und lebendig sein müsse, was paradox ist.



Quelle: LEIFI-Physik, abrufbar unter https://www.leifiphysik.de/sites/default/files/medien/schrodingers_katze_illu.jpg, Zugriff am 27.06.2024

- Geben Sie den Ablauf des Gedankenexperiments von Schrödinger in eigenen Worten wieder. Ein Auszug aus einer Arbeit von Schrödinger ist über den QR-Code erreichbar.
- Beschreiben Sie den Superpositionszustand, in welchem sich die Katze im Gedankenexperiment nach einer Halbwertszeit befindet. Erklären Sie die Auswirkungen auf diesen Zustand, wenn wir in die Kiste schauen.
- Versetzen Sie sich in die Lage von Schrödinger. Wie würde Schrödinger die Verletzung des klassischen Realitätsbegriffs begründen?
- Erklären Sie, warum das Experiment zeigt, dass die Gesetze der Quantenmechanik nicht einfach auf unsere makroskopische Alltagswelt übertragen werden können.



- a) Eine Katze befindet sich in einer abgeschlossenen Kiste, gemeinsam mit einer geringen Menge radioaktiver Substanz. Die Wahrscheinlichkeit, dass eines der radioaktiven Atome in einer Stunde zerfällt beträgt 50 %. Darüber hinaus befinden sich in der Kiste ein Detektor, ein Hammer und ein Gefäß mit Blausäure. Sobald ein Atom zerfällt, wird der Zerfall durch den Detektor registriert. Dies bewirkt, dass der Hammer das Gefäß mit der Blausäure zerstört. Die Katze stirbt.
- b) Der Zustand der Katze hängt davon ab, ob ein Atom zerfallen ist oder nicht. Bei verschlossener Kiste können wir das nicht beurteilen, sodass sich die Katze in dem Superpositionszustand aus tot und lebendig befindet. Schauen wir in die Kiste, so findet eine Wechselwirkung mit der Umgebung statt, wir führen also eine Messung durch. Die Katze nimmt einen eindeutigen Zustand an, ein Wert der Eigenschaft (tot oder lebendig) wird realisiert. Nach einer Halbwertszeit ist die Wahrscheinlichkeit, eine tote oder lebendige Katze vorzufinden jeweils 50 %.
- c) Solange die Kiste verschlossen ist (man spricht von einem abgeschlossenen System) können wir den Zustand der Katze nicht bestimmen. Etwas ist nach der klassischen Definition der Realität aber nur „real“, wenn das Objekt festgelegte Eigenschaften unabhängig von einer Messung hat. Daher ist der klassische Realitätsbegriff verletzt.
- d) Eine Katze kann im Alltag nicht in einen Zustand gebracht werden, in welchem sie zugleich tot und lebendig ist. Eine ständige Wechselwirkung mit der Umgebung führt in der makroskopischen Welt zu einem ständigen Kollaps der Wellenfunktion. Daher können die Gesetze der Quantenmechanik nicht einfach auf unseren Alltag übertragen werden.

Lösung und LEK



Lösung



LEK

Didaktische Hinweise

- Die Behandlung der Wellenfunktion Ψ ist kein verpflichtender Lehrplaninhalt im Grundkurs, weshalb hier auf die Schreibweise verzichtet wird. Der „Kollaps der Wellenfunktion“ sollte hingegen als zentraler Begriff der Quantenphysik erläutert werden. Im Grundkurs empfiehlt sich an dieser Stelle auf die Beschreibung von Quantenobjekten mit der Wellenfunktion näher einzugehen.
- Den Superpositionszustand $|DS\rangle$ schreibt man mathematisch allgemein als $|DS\rangle = \alpha \cdot |S1\rangle + \beta \cdot |S2\rangle$, wobei $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ gelten muss. Die Skalare $|\alpha|^2$ und $|\beta|^2$ beschreiben jeweils die Wahrscheinlichkeit, dass der Superpositionszustand zu $|S1\rangle$ bzw. $|S2\rangle$ kollabiert.
- In der Quantenphysik sind die Werte der Eigenschaften bis zum Moment der Messung unbestimmt. Es muss darauf geachtet werden, dass es sich hierbei nicht um Unwissenheit handelt. Erst bei der Messung wird der Wert einer Eigenschaft realisiert.

Kompetenzen und Anforderungsbereiche

Aufgabe	Kompetenzen: Die SuS ...	Anforderungsbereich
Aufgabe 1		
	E10: beziehen theoretische Überlegungen und Modelle zurück auf Alltagssituationen und reflektieren ihre Generalisierbarkeit.	II
Aufgabe 2		
	K4: formulieren unter Verwendung der Fachsprache chronologisch und kausal korrekt strukturiert.	III
Aufgabe 3		
a)	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
b)-d)	S3: wählen aus bekannten Modellen bzw. Theorien geeignete aus, um sie zur Lösung physikalischer Probleme zu nutzen. K4: formulieren unter Verwendung der Fachsprache chronologisch und kausal korrekt strukturiert.	III