

Quanten und Atome

Nichtlokalität in der Quantenphysik

Michelle Schwarz

AG Prof. Dr. Rolf Pelster | Fakultät NT



UNIVERSITÄT
DES
SAARLANDES

Beweis der Nichtlokalität

Schwerpunkt	Fakultativer Inhalt: Quantenmechanisches Weltbild										
Klassenstufe	12-13, L-Kurs										
Art	Lernumgebung										
Positionierung	im Anschluss an die Lernumgebung „Lokalität“										
Lernvoraussetzungen	Nichtlokalität und Realität in der Quantenphysik, Verschränkung										
Lernziel	Die SuS erläutern, dass nur die Quantenphysik eine widerspruchsfreie Erklärung für die experimentellen Ergebnisse des EPR-Experiments liefert und diese damit nichtlokal ist.										
Kompetenzen ¹	S4, S7, E8										
Kategorien	<table><tr><td>Erarbeitung von neuem Stoff</td><td>0 1 2 3 4</td></tr><tr><td>Einübung von bekanntem Stoff</td><td>0 1 2 3 4</td></tr><tr><td>Öffnung der Aufgabe</td><td>0 1 2 3 4</td></tr><tr><td>Grad der Mathematisierung</td><td>0 1 2 3 4</td></tr><tr><td>Experimenteller Anteil</td><td>0 1 2 3 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.

Der Beweis der Nichtlokalität der Quantenphysik

Sie haben schon das Prinzip der Verschränkung kennengelernt und gesehen, dass die Quantenphysik nichtlokal ist. Dies widerspricht unseren Beobachtungen im Alltag. Daher fragen wir uns: Gibt es noch eine andere Erklärung, die sich mit unserer Vorstellung des lokalen Realismus vereinbaren lässt?

Experimentelles Ergebnis

Bei gleicher Messeinstellung messen Alice und Bob immer antikorreliert. Das heißt: Sie dürfen bei gleicher Messeinstellung nie gleiche Messergebnisse erhalten.

Erklärungsversuch 0

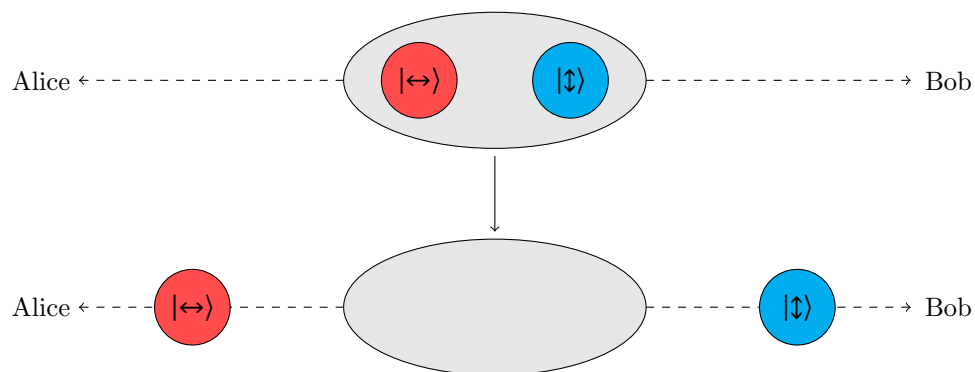
Hypothese 0: Alice und Bob tauschen sich aus und beeinflussen so die Messungen.

Diese Hypothese konnte bereits in der Lernumgebung „Verschränkung & Lokalität“ widerlegt werden. Es findet keine Informationsübertragung statt.

Erklärungsversuch 1

Hypothese 1: Die Quelle legt die Polarisation der Photonen fest.

Zum Beispiel entscheidet die Quelle, dass ein horizontal polarisiertes Photon an Alice gesendet wird und ein vertikal polarisiertes Photon an Bob.



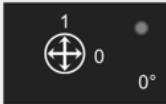
Aufgabe 1

Wählen Sie in der Simulation (über QR-Code erreichbar) „orthogonal polarisierte Photonen“ aus. Führen Sie 100 Messungen durch und vergleichen Sie die Ergebnisse bei gleicher Messeinstellung. Nehmen Sie Stellung zur Hypothese.

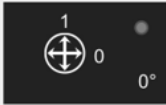


Photonen-Paar-Quelle

Detektoren



Alice



Bob

Eigenschaften der Photonen-Paar-Quelle

Die Quelle emittiert Paare

- ☒ orthogonal verschränkter Photonen
- ☐ orthogonal polarisierter Photonen
- ☐ nach der Theorie der verborgenen Variablen antikorrelierter Photonen
- ☐ parallel verschränkter Photonen
- ☐ parallel polarisierter Photonen
- ☐ nach der Theorie der verborgenen Variablen korrelierter Photonen
- ☐ statistisch unabhängiger Photonen

Live-Informationen

- ☒ Polarisation sichtbar machen (sobald realisiert)
- ☒ Während der Messung statistische Informationen einblenden
- ☐ Info zum Kollaps der Wellenfunktion anzeigen

Messeinstellungen

☒ zufällige Messeinstellung

Alice: ☐ 0° ☐ 60° ☐ 120°

Bob: ☐ 0° ☐ 60° ☐ 120°

Zeitabfolge der Messungen

- ☒ gleichzeitige Messung
- ☐ Alice misst zuerst
- ☐ Bob misst zuerst

Darstellung der Informationsausbreitung

als mit Lichtgeschwindigkeit propagierende Kreiswelle(n)

- ☒ nicht anzeigen
- ☐ von der ersten Messung ausgehend zeigen
- ☐ von beiden Messungen ausgehend zeigen

Simulationsoptionen

Simulationsgeschwindigkeit: x 1,000

- Pause +

Emission starten

Simulation zurücksetzen

Durchführung ohne Darstellung

weitere

Photonenpaare messen

Sicherung und Teilen der Messung

aufgezeichnete Messwerte als CSV-Datei herunterladen

aktuelle Einstellungen per Code teilen

Simulation zum Beweis der Nichtlokalität, Quelle: Olaf Leismann, abrufbar unter <https://olafleismann.de/simulations/photonEntanglement/>, Zugriff am 08.07.2024

Bei gleicher Messeinstellung erhalten Alice und Bob manchmal gleiche Ergebnisse. Das darf gemäß dem experimentellen Ergebnis nicht vorkommen. Unsere Hypothese erklärt das Experiment nicht und wir müssen sie verwerfen.

Fazit zu Hypothese 1

Die Polarisation der Photonen ist in der Quelle unbestimmt, das heißt die Photonen befinden sich in einem Superpositionszustand.

Erklärungsversuch 2: Einsteins Idee

Hypothese 2: Die Photonen stimmen sich in der Quelle ab.

Zur „Rettung des lokalen Realismus“ behaupteten Albert Einstein, Boris Podolsky und Nathan Rosen, dass sich die Photonen in der Quelle abstimmen. Diese Abstimmung bedeutet, dass die Photonen geheime Eigenschaften in sich tragen, die wir nur nicht kennen. Man bezeichnet diese Theorie als „Theorie der verborgenen Variablen“.

Die geheime Abstimmung

Die Photonen erhalten in der Quelle ein Etikett, welches das Verhalten bei einer bestimmten Messeinstellung am Detektor bestimmt. Ein Etikett für das Photon, welches zu Alice gesendet wird, ist zum Beispiel:

- Wenn Alice 0° einstellt, misst Alice eine 1.
- Wenn Alice 60° einstellt, misst Alice eine 0.
- Wenn Alice 120° einstellt, misst Alice eine 1.

Da Alice und Bob immer antikorreliert messen, kennt das Photon von Bob auch sein Verhalten:

- Wenn Bob 0° einstellt, misst Bob eine 0.
- Wenn Bob 60° einstellt, misst Bob eine 1.
- Wenn Bob 120° einstellt, misst Bob eine 1.

Aufgabe 2

Das Photon von Alice kann acht verschiedene Etiketten tragen. Ergänzen Sie die Tabelle so, dass Alice und Bob bei gleicher Messeinstellung immer antikorreliert messen. Nehmen Sie Stellung zu diesem Erklärungsversuch in Bezug auf unsere Beobachtung im Experiment.

Etikett	Messeinstellung Alice			Messeinstellung Bob		
	0°	60°	120°	0°	60°	120°
0	0	0	0	1	1	1
1	0	0	1	1	1	0
2	0	1	0	1	0	1
3	0	1	1	1	0	0
4	1	0	0	0	1	1
5	1	0	1	0	1	0
6	1	1	0	0	0	1
7	1	1	1	0	0	0

Bei gleicher Messeinstellung messen Alice und Bob immer antikorreliert, das heißt die Hypothese erklärt das Experiment für gleiche Messeinstellungen.

Fazit zu Hypothese 2

Für gleiche Messeinstellungen erklärt die Theorie der verborgenen Variablen das Experiment.

Hypothese 3: Die Theorie der verborgenen Variablen gilt auch für verschiedene Messeinstellungen von Alice und Bob.

Wenn die Theorie der verborgenen Variablen die Quantenphysik vollständig beschreibt, dann muss sie auch für unterschiedliche Messeinstellungen das experimentelle Ergebnis korrekt vorhersagen.

Dazu bestimmen wir für jedes Etikett die Wahrscheinlichkeit bei unterschiedlicher Messeinstellung ein gleiches oder ungleiches Ergebnis zu erhalten.

Beispiel: Wir betrachten Etikett 5.

Etikett	Messeinstellung Alice			Messeinstellung Bob		
	0°	60°	120°	0°	60°	120°
5	1	0	1	0	1	0

Wir betrachten nur die Fälle, in denen Alice und Bob unterschiedliche Messeinstellungen wählen. Wir tragen die Messwerte in eine Tabelle ein und zählen die Anzahl für gleiche und ungleiche Ergebnisse und berechnen daraus die Wahrscheinlichkeiten.

		Alice		
		0°	60°	120°
Bob	0°		0	1
	60°	1		1
	120°	0	0	

- Anzahl gleicher Ergebnisse: 4
- Anzahl ungleicher Ergebnisse: 2
- $P(\text{gleiches Ergebnis}) = \frac{4}{6} = \frac{2}{3}$
- $P(\text{ungleiches Ergebnis}) = \frac{2}{6} = \frac{1}{3}$

Aufgabe 3

Bestimmen Sie nun für jedes Etikett die Wahrscheinlichkeit, dass Alice und Bob gleiche bzw. unterschiedliche Ergebnisse messen. Tragen Sie die Ergebnisse in die Tabelle ein. Ergänzen Sie anschließend die Regel für die Theorie der verborgenen Variablen.

Regel für die Theorie der verborgenen Variablen

Wählen Alice und Bob unterschiedliche Messeinstellungen, so gilt nach der Theorie der verborgenen Variablen: $P(\text{gleiches Ergebnis}) \leq \frac{2}{3}$ und $P(\text{ungleiches Ergebnis}) \geq \frac{1}{3}$

Etikett	Tabelle				P(gleich)	P(ungleich)
0	Alice \ Bob	0°	60°	120°	0	1
	0°		0	0		
	60°	1		1		
	120°	1	0			
1	Alice \ Bob	0°	60°	120°	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$
	0°		0	1		
	60°	1		1		
	120°	0	0			
2	Alice \ Bob	0°	60°	120°	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$
	0°		1	0		
	60°	0		0		
	120°	1	0			
3	Alice \ Bob	0°	60°	120°	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$
	0°		1	1		
	60°	0		1		
	120°	0	0			
4	Alice \ Bob	0°	60°	120°	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$
	0°		0	0		
	60°	1		0		
	120°	1	0			
5	Alice \ Bob	0°	60°	120°	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$
	0°		0	1		
	60°	1		1		
	120°	0	0			
6	Alice \ Bob	0°	60°	120°	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$
	0°		1	0		
	60°	1		0		
	120°	1	1			
7	Alice \ Bob	0°	60°	120°	0	1
	0°		1	1		
	60°	0		0		
	120°	0	1			

Aufgabe 4

Beurteilen Sie die Theorie der verborgenen Variablen, indem Sie diese mit den experimentellen Ergebnissen aus der Simulation aus Aufgabe 1 vergleichen. Wählen Sie „orthogonal verschränkte Photonen“ als Photonenpaarquelle. Führen Sie 1000 Messungen durch. Bestimmen Sie die Wahrscheinlichkeiten $P(\text{gleiches Ergebnis})$ und $P(\text{ungleiches Ergebnis})$ für die Fälle, in denen Alice und Bob unterschiedliche Messeinstellungen gewählt haben.

Wir erhalten für die Wahrscheinlichkeit $P(\text{gleiches Ergebnis}) = 3/4 > 2/3$ und damit einen Widerspruch zur Theorie der verborgenen Variablen.

Fazit zu Hypothese 3

Die Theorie der verborgenen Variablen stimmt für unterschiedliche Messeinstellungen nicht mit den experimentellen Ergebnissen überein. Daher muss die Theorie der verborgenen Variablen als Erklärungsversuch auch verworfen werden.

Alle Erklärungsversuche sind damit gescheitert, allein die Quantenphysik liefert eine widerspruchsfreie Erklärung.

Nichtlokalität der Quantenphysik

Die Quantenphysik ist eine vollständige und nichtlokale Theorie. Die erste Messung realisiert den Wert der Eigenschaft „Polarisationsrichtung“ für beide Photonen. Bei gleicher Messeinstellung messen Alice und Bob immer antikorreliert ohne Informationsübertragung.

Lösung



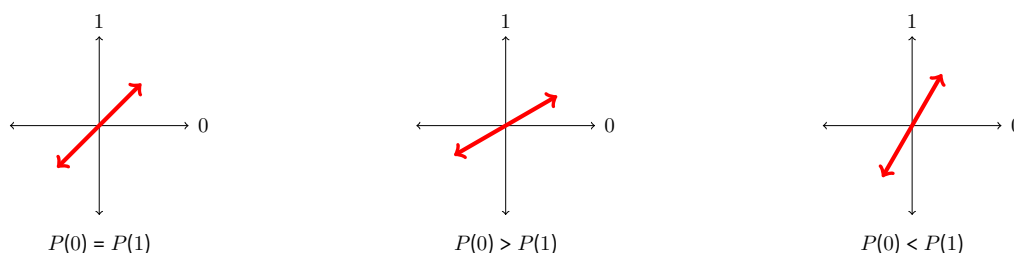
Lösung

Didaktische Hinweise

- John Stewart Bell zeigte 1964 erstmals den Widerspruch der Theorie der verborgenen Variablen und zeigte damit die Nichtlokalität der Quantenphysik. Er führte den Beweis rein

mathematisch durch, heute ist auch ein experimenteller Nachweis möglich. Dabei wird für den experimentellen Nachweis meist die von John Clauser, Michael Horne, Abner Shimony und Richard Holt entwickelte sogenannte CHSH-Ungleichung zum Widerspruch geführt. Für die Schule bietet das Abzählen der Möglichkeiten eine anschauliche Möglichkeit zum Beweis der Nichtlokalität.

- Die Lernumgebung bedient sich der Beweismethode „Beweis durch Widerspruch“. Die Methode sollte vor Durchführung der Lernumgebung besprochen werden, da in der Schule selten Beweise durch Widerspruch durchgeführt werden. Ein klassischer Beweis durch Widerspruch in der Schule ist der Beweis der Irrationalität von $\sqrt{2}$.
- Bei Erklärungsversuch 1 kann die Frage aufkommen, wie der Detektor zum Beispiel in der Messeinstellung 0° auch bei beliebig polarisierten Photonen entscheiden kann, ob eine 0 oder eine 1 gemessen wird. Da dieser Erklärungsversuch sofort verworfen wird, ist die Erklärung kein Teil der Lernumgebung. Eine einfache Möglichkeit der Erklärung bietet die folgende bildliche Darstellung:



Trifft ein diagonal polarisiertes Photon auf einen Detektor in der Messeinstellung 0° , so wird mit einer Wahrscheinlichkeit von jeweils 50 % eine 0 oder eine 1 gemessen. Bei einer Polarisation von 30° ist es wahrscheinlicher, dass eine 0 gemessen wird. Bei einer Polarisation von 60° ist es wahrscheinlicher, dass eine 1 gemessen wird.

Kompetenzen und Anforderungsbereiche

Aufgabe	Kompetenzen: Die SuS ...	Anforderungsbereich
Aufgabe 1 & 4		
1, 4	S4: bauen Versuchsanordnungen auch unter Verwendung von digitalen Messwerterfassungssystemen nach Anleitung auf, führen Experimente durch und protokollieren ihre Beobachtungen. E8: beurteilen die Eignung physikalischer Modelle und Theorien für die Lösung von Problemen	III
Aufgabe 2		

2	E8: beurteilen die Eignung physikalischer Modelle und Theorien für die Lösung von Problemen	III
Aufgabe 3		
3	S7: wenden bekannte mathematische Verfahren auf physikalische Sachverhalte an.	II