

Quanten und Atome

Nichtlokalität in der Quantenphysik

Michelle Schwarz

AG Prof. Dr. Rolf Pelster | Fakultät NT



UNIVERSITÄT
DES
SAARLANDES

Verschränkung & Lokalität

Schwerpunkt	Fakultativer Inhalt: Quantenmechanisches Weltbild
Klassenstufe	12-13, G- und L-Kurs
Art	Lernumgebung
Positionierung	im Anschluss an den verpflichtenden Lehrplaninhalt
Lernvoraussetzungen	Realität und Determiniertheit in der Quantenphysik, quantenmechanischer Messprozess, Polarisationszustand
Lernziel	Die SuS definieren verschränkte Photonen und erläutern die Nichtlokalität der Quantenphysik.
Kompetenzen ¹	K3, E8
Kategorien	Erarbeitung von neuem Stoff 01234 Einübung von bekanntem Stoff 01234 Öffnung der Aufgabe 01234 Grad der Mathematisierung 01234 Experimenteller Anteil 01234

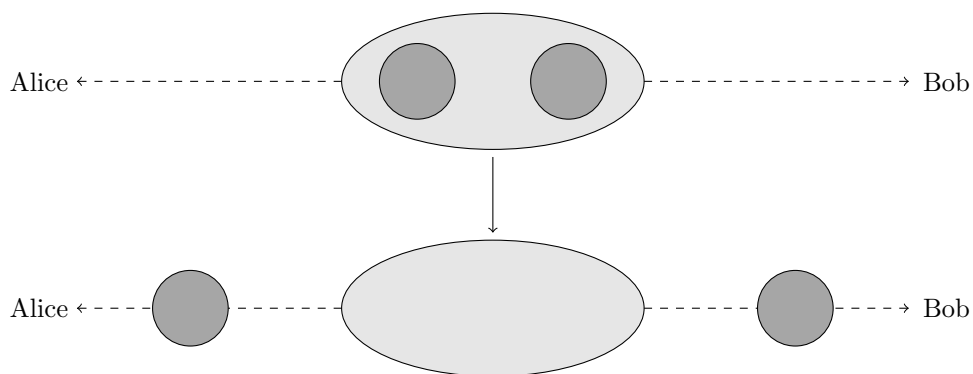
¹Kompetenzen entnommen aus: KMK & IQB. (2020). *Bildungsstandards im Fach Physik für die Allgemeine Hochschulreife: Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 18.06.2020*. Kronach: Carl Link Verlag. ISBN: 978-3-556-09045-9.

Verschränkung & Lokalität in der Quantenphysik

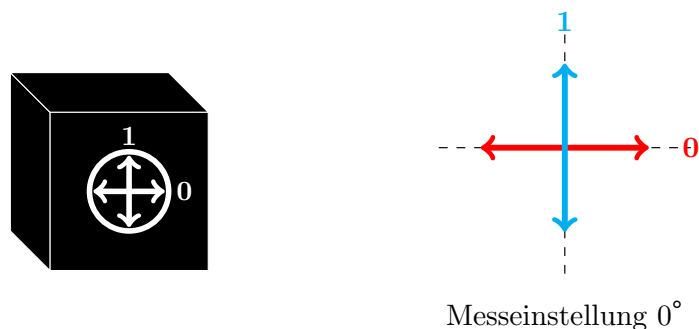
Albert Einstein, Boris Podolsky und Nathan Rosen (EPR) zweifelten 1935 die Vollständigkeit der Quantenmechanik an. Das Gedankenexperiment der drei Physiker ist heute unter dem Namen EPR-Paradoxon bekannt. Sie führen ein dazu analoges Experiment im Folgenden durch.

Das Gedankenexperiment

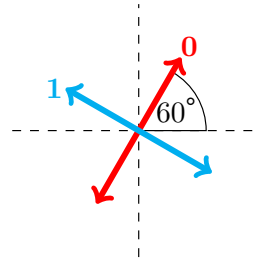
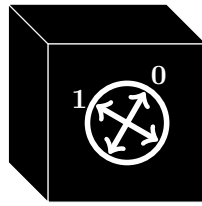
Eine Quelle entsendet ein Photonenpaar. Ein Photon wird an Alice gesendet und ein Photon an Bob. Nach Versenden der Photonen besteht keine Wechselwirkung zwischen den beiden Photonen. Ihr Polarisationszustand ist unbekannt (definiert und unbekannt gemäß der klassischen Realitätsdefinition oder undefiniert gemäß der Einschränkung in der Quantenphysik).



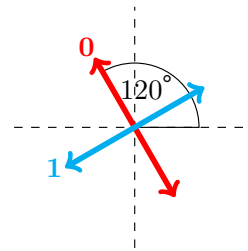
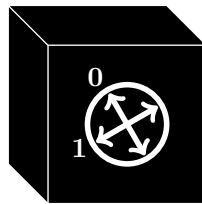
Alice und Bob messen die Polarisationsrichtung der Photonen. Wir betrachten eine Einstellung des Detektors, in welcher die Polarisationsrichtungen $|\leftrightarrow\rangle$ und $|\updownarrow\rangle$ gemessen werden können. Diese Einstellung bezeichnen wir als Messeinstellung 0° . Im Folgenden bezeichnen wir die Messergebnisse mit 0 und 1.



Alice und Bob können an ihrem Detektor auch andere Messeinstellungen einstellen, wie zum Beispiel 60° oder 120° . Auch in diesen Messeinstellungen können Alice und Bob 0 oder 1 messen:



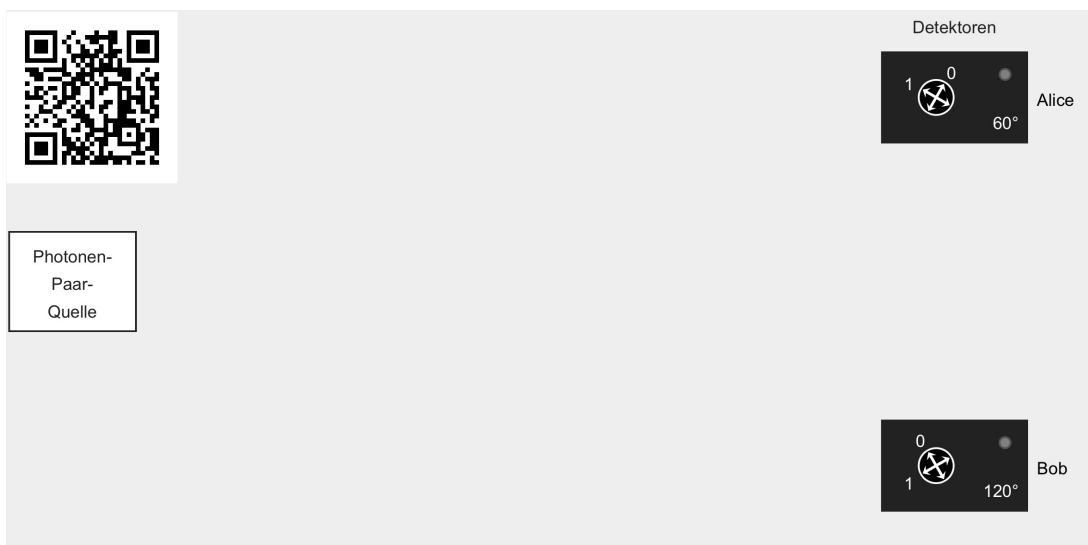
Messeinstellung 60°



Messeinstellung 120°

Aufgabe 1

- a) Im Folgenden wählen Alice und Bob unabhängig voneinander zwischen den Messeinstellung 0° , 60° und 120° . Schauen Sie sich die Animationen des EPR-Experiments an (über QR-Code erreichbar). Notieren Sie jeweils die Messergebnisse von Alice und Bob sowie die gewählte Messeinstellung.



Animation zum EPR-Experiment. Quelle: Olaf Leismann, abrufbar unter <https://olafleismann.de/simulations/photonEntanglement/>, Zugriff am 08.07.2024

	Alice		Bob	
	Messeinstellung	Messergebnis	Messeinstellung	Messergebnis
1	120°	1	120°	0
2	60°	0	120°	1
3	120°	1	120°	0
4	120°	1	120°	0
5	60°	0	60°	1
6	0°	0	120°	0
7	120°	0	0°	0
8	60°	1	0°	1
9	120°	1	60°	0
10	60°	1	120°	1

b) Vervollständigen Sie den Merksatz.

Verschränkte Photonen

Alice und Bob wählen unabhängig voneinander ihre Messeinstellung. Wählen sie zufällig die gleiche Messeinstellung, so messen sie immer **antikorreliert** / **umgekehrt** / **entgegengesetzt** / **unterschiedlich**. Quantenobjekte, die auf diese Art miteinander verknüpft sind, nennt man (orthogonal) verschränkt.

Diesen neuen Aspekt der Verschränkung wollen wir erklären. Ein Erklärungsversuch dafür wäre die Informationsübertragung zwischen Alice und Bob.

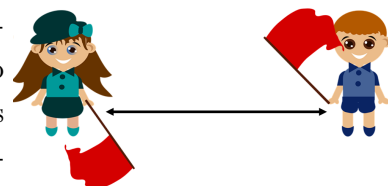
Hypothese: Alice und Bob tauschen sich aus und beeinflussen so die Messungen.

Zwei Messungen können sich nur beeinflussen, wenn Informationen übertragen werden. Informationen können maximal mit Lichtgeschwindigkeit übertragen werden. Daraus folgt die Definition der Lokalität.

Definition der Lokalität

Bei zwei gleichzeitig stattfindenden und räumlich getrennten Messungen A und B beeinflusst Messung A nicht das Messergebnis von B und umgekehrt.

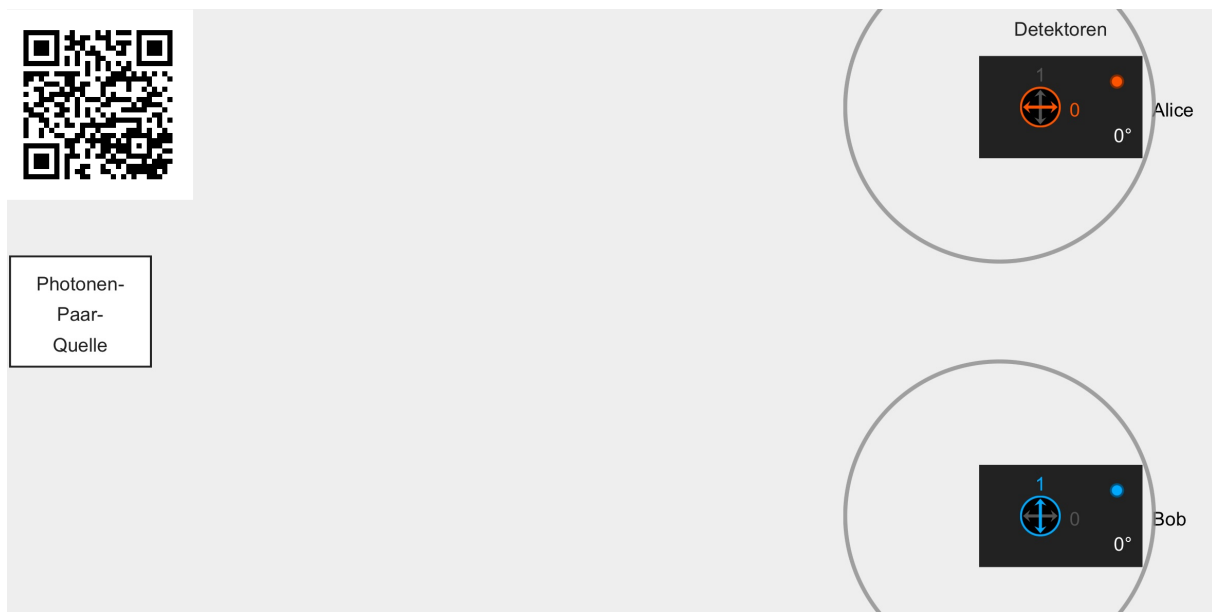
Beispiel: Betrachten Sie nebenstehende Situation. Alice und Bob stehen in Sichtweite voneinander entfernt. Sobald Bob seine Flagge hebt, hebt auch Alice ihre Flagge gleichzeitig. Bob beobachtet jedoch eine Zeitverzögerung. Grund dafür ist, dass die Information „Bob hebt seine Flagge“ maximal mit Lichtgeschwindigkeit übertragen werden kann.



Im Folgenden wollen wir prüfen, ob diese Lokalitätsdefinition auch in der Quantenphysik tragbar ist.

Aufgabe 2

Schauen Sie sich die Animation (über den QR-Code erreichbar) an. Beschreiben Sie Ihre Beobachtung hinsichtlich einer möglichen Informationsübertragung. Beurteilen Sie Ihre Beobachtung im Hinblick auf die Definition der Lokalität.

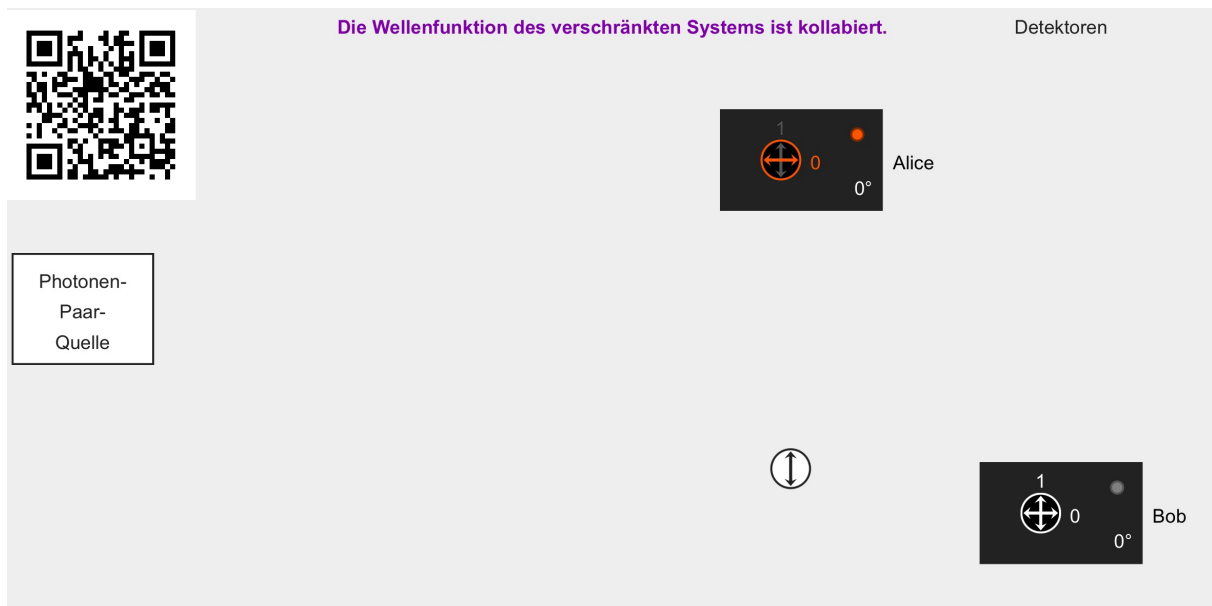


Animation zur Informationsübertragung beim EPR-Experiment. Quelle: Olaf Leismann, abrufbar unter <https://olafleismann.de/simulations/photonEntanglement/>, Zugriff am 08.07.2024

Die Informationsübertragung ist als Kugelwelle dargestellt, welche sich nach Messen des Photons bei Alice in Richtung Bob ausbreitet. Man beobachtet, dass die Messung von Bobs Photon bereits erfolgt ist, bevor die Kugelwelle, also die Information über das Messergebnis, bei Bobs Detektor ankommt. Das Messergebnis kann nicht durch Informationsaustausch erklärt werden.

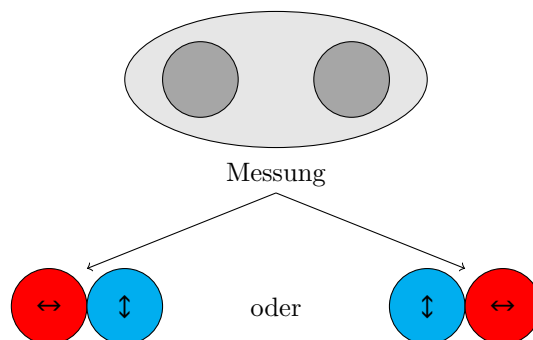
Erklärung des Experiments

Schauen Sie sich zur Erklärung des Experiments die folgende Animation (über den QR-Code an). Bob befindet sich nun weiter von der Quelle entfernt als Alice. In der Animation wird angenommen, dass Alice und Bob die gleiche Messeinstellung (0°) wählen.



Animation zur Erklärung des EPR-Experiments. Quelle: Olaf Leismann, abrufbar unter <https://olafleismann.de/simulations/photonEntanglement/>, Zugriff am 08.07.2024

Die Quelle entsendet ein verschränktes Photonenpaar, welches sich in einem Superpositionszustand aus zwei Teilchen befindet. Da Alice und Bob die Messeinstellung 0° wählen, misst Alice entweder ein horizontal polarisiertes Photon $|\leftrightarrow\rangle$ oder ein vertikal polarisiertes Photon $|\updownarrow\rangle$. Das Photon von Bob nimmt instantan die entgegengesetzte Polarisationsrichtung an:



Die Messung von Alice zerstört den Superpositionszustand (Kollaps der Wellenfunktion) und realisiert die Polarisationsrichtung beider Photonen. Umgekehrt könnte auch Bob zuerst messen und damit den Superpositionszustand zerstören und beide Polarisationsrichtungen realisieren.

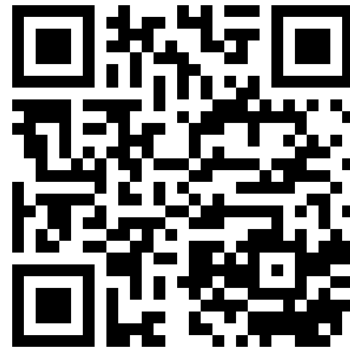
Lokalität in der Quantenphysik

Der Kollaps der Wellenfunktion führt zur beobachteten Antikorrelation. Die erste Messung realisiert den Wert der Eigenschaft „Polarisationsrichtung“ für beide Photonen. Bei gleicher Messeinstellung messen Alice und Bob immer antikorreliert ohne Informationsübertragung. Die Quantenphysik ist nichtlokal.

Lösung und LEK



Lösung



LEK

Didaktische Hinweise

- Die Lernumgebung zeigt rein phänomenologisch anhand der Messergebnisse und dem Phänomen der Verschränkung die Verletzung des lokalen Realismus. Für den Beweis von Bell gibt es eine separate Lernumgebung.
- In der vorliegenden Lernumgebung wird die orthogonale Verschränkung betrachtet. Neben dieser gibt es auch die parallele Verschränkung. Bei einer parallelen Verschränkung messen Alice und Bob bei gleicher Messeinstellung immer das gleiche Ergebnis.
- Es gibt nur eine Definition der Lokalität. Die klassische Physik erfüllt diese und die Quantenphysik nicht.
- Die Erzeugung verschränkter Photonen ist ein Naturphänomen. Polarisationsverschränkte Photonenpaare können mittels der Spontanen Parametrischen Fluoreszenz (Down Conversion) erzeugt werden. Die technische Herausforderung besteht im Nachweis der Verschränkung. Eine genaue Erklärung geht weit über den Schulstoff hinaus. Für die SuS nachvollziehbar ist die Erklärung über Erhaltungssätze. Bekannt sind den SuS die Energie- und Impulserhaltung. Ein weiterer Erhaltungssatz erklärt die Erzeugung verschränkter Photonenpaare.
- Der Lehrplan sieht neben Realität, Determiniertheit und Lokalität auch die Besprechung des Kausalitätsbegriffs vor. Alice kann das Ergebnis von Bob nicht aktiv beeinflussen, da ihre eigenes Messergebnis nicht vorherbestimmt ist. Es wird keine Information mit Überlichtgeschwindigkeit übertragen und die Kausalität wird auch nicht verletzt (Begründung Minkowski-Diagramm). Manchmal spricht man von „fehlender Kausalität“, was aber lediglich ausdrücken soll, dass es keine Kausalkette zwischen Alice und Bob gibt, es gibt keine aktive direkte Beeinflussung, also keine Ursache-Wirkung-Beziehung.

Kompetenzen und Anforderungsbereiche

Aufgabe	Kompetenzen: Die SuS ...	Anforderungsbereich
Aufgabe 1		
a) b)	K3: entnehmen unter Berücksichtigung ihres Vorwissens aus Beobachtungen, Darstellungen und Texten relevante Informationen und geben diese in passender Struktur und angemessener Fachsprache wieder.	III
Aufgabe 2		
	E8: beurteilen die Eignung physikalischer Modelle und Theorien für die Lösung von Problemen	III