

Lehr-Lern-Materialien zur Quantenphysik im aktuellen Physik-Lehrplan

Michelle Schwarz, Olaf Leismann, Rolf Pelster

Experimentalphysik und Didaktik der Physik, Universität des Saarlandes

15.01.2025

- 1 Bildungsstandards und Umsetzung im Lehrplan
- 2 Der quantenmechanische Messprozess
- 3 Der Doppelspaltversuch
- 4 Nichtlokalität der Quantenphysik

Bildungsstandards & Umsetzung im Lehrplan

GK	Zusätzlich im LK
<p>Grundlegende Aspekte der Quantentheorie: Stochastische Vorhersagbarkeit, Interferenz und Superposition, Determiniertheit der Zufallsverteilung, Komplementarität von Weginformation und Interferenzfähigkeit</p>	<p>Stochastische Deutung mittels des Quadrats der quantenmechanischen Wellenfunktion (qualitativ)</p> <ul style="list-style-type: none">• Betragsquadrat der Wellenfunktion zur Beschreibung der Nachweiswahrscheinlichkeitsdichte• Delayed-Choice-Experiment
<p>Zusammenhänge der Größen Energie, Impuls, Frequenz und Wellenlänge zur Beschreibung von Quantenobjekten</p> <ul style="list-style-type: none">• Zusammenhang zwischen Energie und Frequenz eines Photons (quantitativ), Planck'sches Wirkungsquantum h• de Broglie-Beziehung	<p>Ort-Impuls-Unbestimmtheit</p> <ul style="list-style-type: none">• Konzept der Unbestimmtheit in der Form: Unmöglichkeit, einen Zustand zu präparieren, bei dem zueinander komplementäre Größen jeweils einen exakten Wert haben
<p>Quantenphysikalisches Weltbild hinsichtlich der Begriffe Realität, Lokalität, Kausalität, Determinismus</p>	

Der quantenmechanische Messprozess

Definition der Realität / des Realismus in der klassischen Physik

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

Beispiele:

Messbare Eigenschaft Phys. Größe	Konkreter Wert der Eigenschaft Messwert
Farbe	rot, blau, grün,
Ort bzw. „an einem Ort zu sein“	Position im Raum (Koordinaten $x=.$, $y=.$, $z=.$)

Ein Tisch befindet sich an einem bestimmten Ort, auch

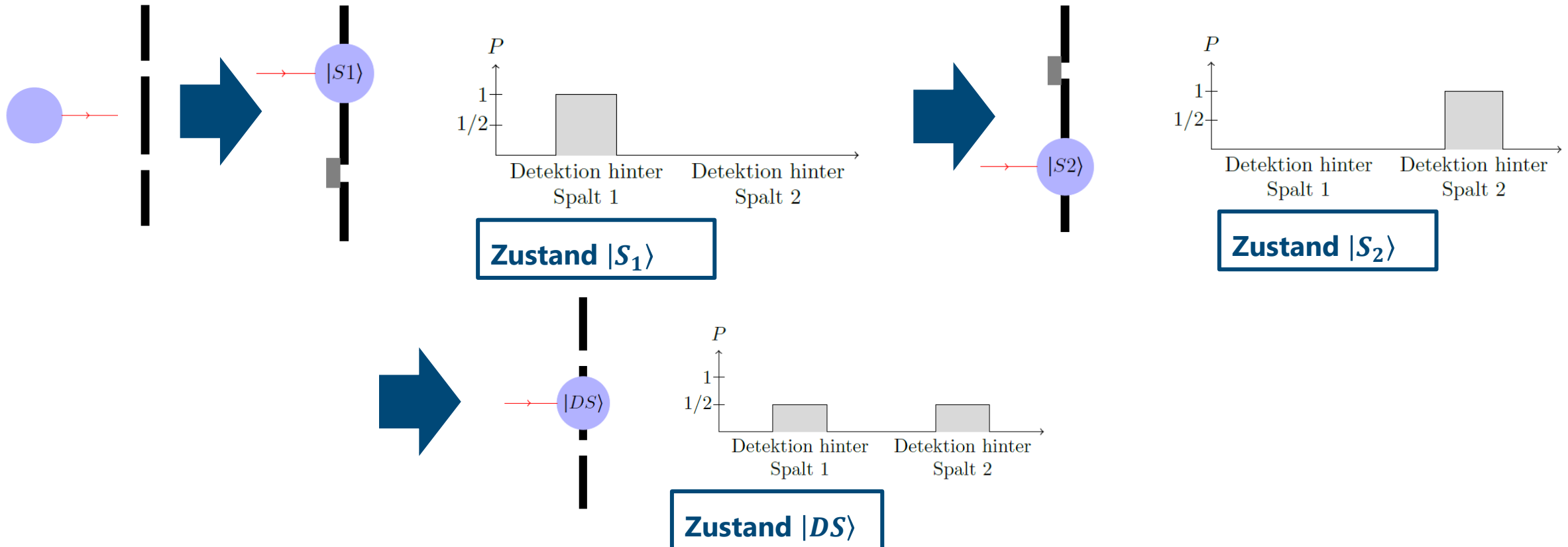
- wenn wir nicht hinschauen oder
- die genaue Position nicht kennen, weil wir die Position nicht gemessen haben.

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

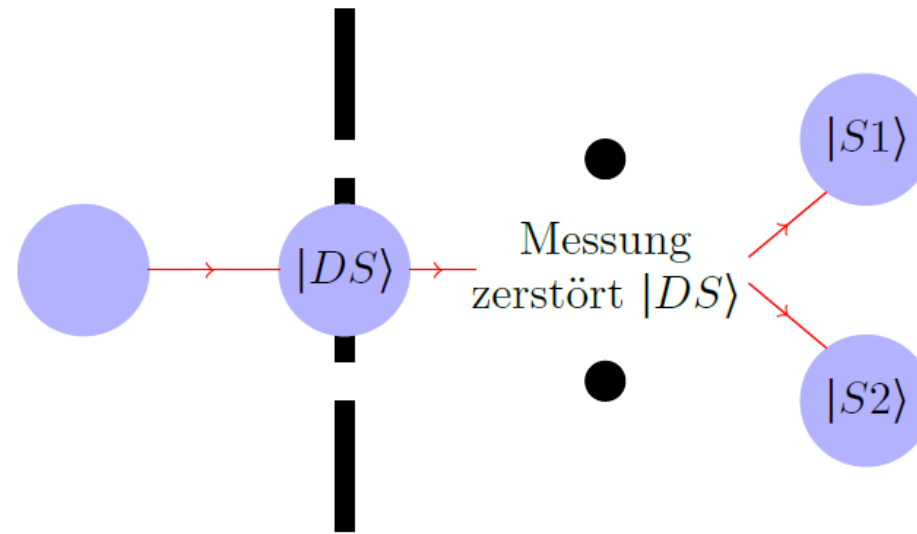
Der quantenmechanische Messprozess

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



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.

Der quantenmechanische Messprozess

OSS

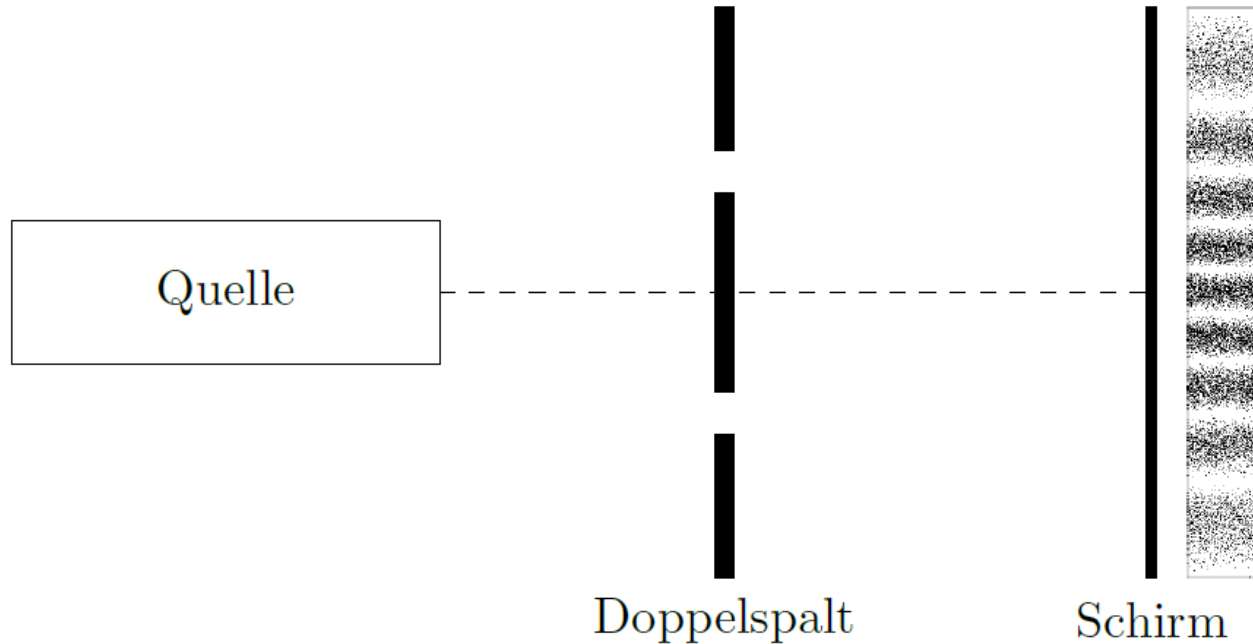
Lernerfolgskontrollen zur „Realität“.



QR-Code zum Kurs

Das Delayed-Choice-Experiment am Doppelspalt

Der Doppelspaltversuch



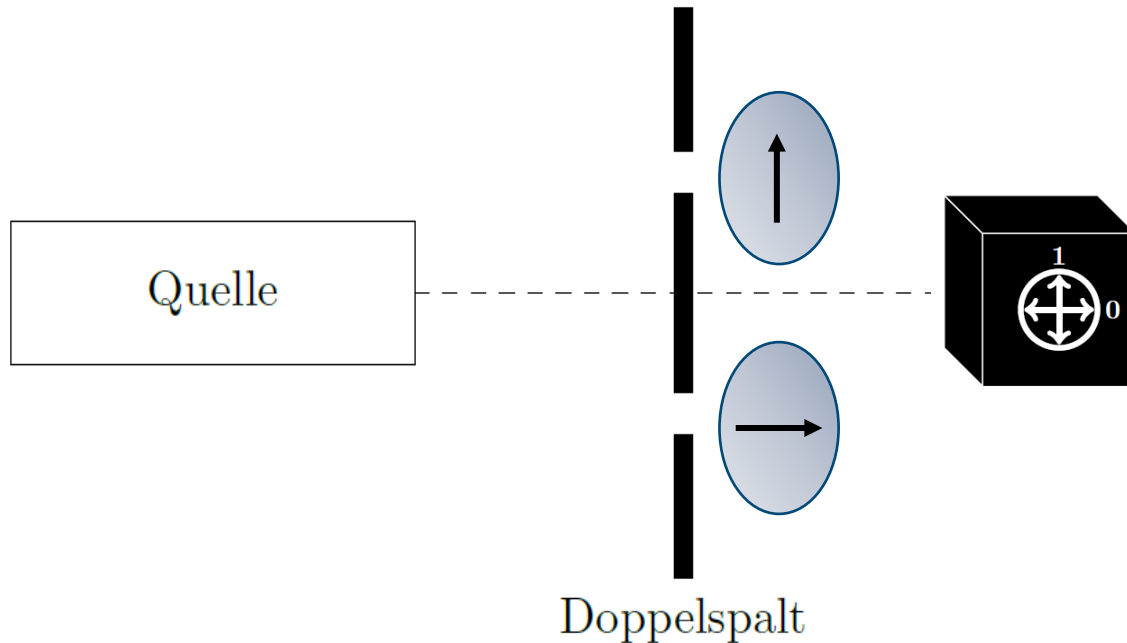
Determiniertheit in der Quantenphysik

Für ein einzelnes System / Quantenobjekt ist die Quantenphysik nicht deterministisch. Nach dem Auftreffen vieler Photonen entsteht das typische Doppelspalt-Interferenzmuster. Diese Verteilung ist bei gleichen Anfangsbedingungen reproduzierbar.

→ ***Stochastische Vorhersagbarkeit***

Das Delayed-Choice-Experiment am Doppelspalt

Welcher-Weg-Information



Welcher-Weg-Information

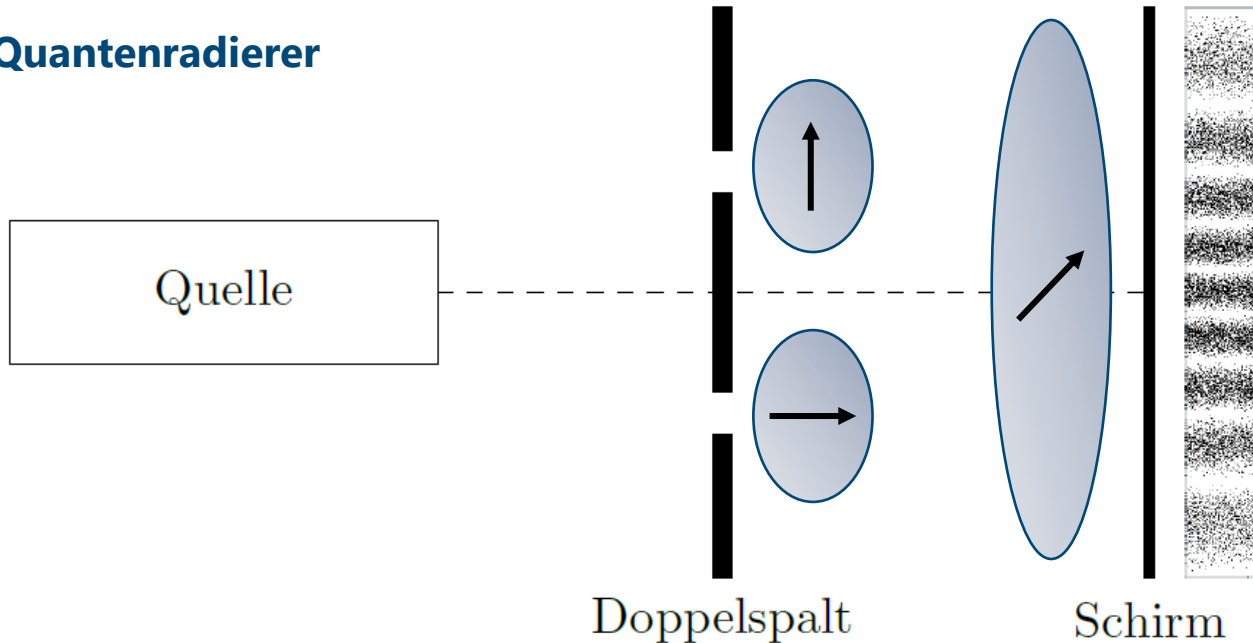
Bringt man hinter die Spalte des Doppelspalts zwei senkrecht zueinander orientierte Polarisationsfilter an, so verschwindet das Interferenzmuster.

- **Komplementarität von Welcher-Weg-Information und Interferenzmuster.**
- **Die Interferenzfähigkeit von Quantenobjekten ist umso geringer, je besser sich die klassischen Wege unterscheiden lassen.**

Man findet in der Literatur oft: „Durch den Einbau der Polarisationsfilter wissen wir, durch welchen Spalt das Photon gegangen ist“ → **FALSCH!!!** (Das wissen wir erst, wenn wir mittels eines Detektors die Polarisation des Photons messen; für das Verschwinden des Interferenzmusters reicht es aber aus, dass das Photon die Welcher-Weg-Information über seinen Polarisationszustand mit sich trägt.)

Das Delayed-Choice-Experiment am Doppelspalt

Quantenradierer



Quantenradierer

Durch einen dritten Polarisationsfilter im 45° -Winkel zu den beiden anderen, wird die entstandene Welcher-Weg-Information aufgehoben / radiert.

Delayed-Choice

Der dritte Polarisationsfilter kann nach Passieren des Doppelspalts eingebaut werden. Man erhält das gleiche Ergebnis.

→ **verzögerte Wahl** (der 3. Polarisationsfilter könnte prinzipiell auch erst kurz vor Auftreffen des Photons auf dem Schirm eingebaut werden, d.h. nachdem es den Doppelspalt mit den beiden Polarisationsfiltern passiert hat)

→ **Die Messung erfolgt erst am Schirm**

Das Delayed-Choice-Experiment am Doppelspalt

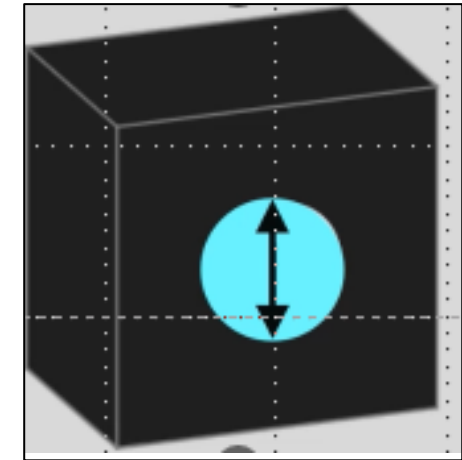
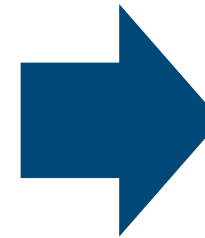
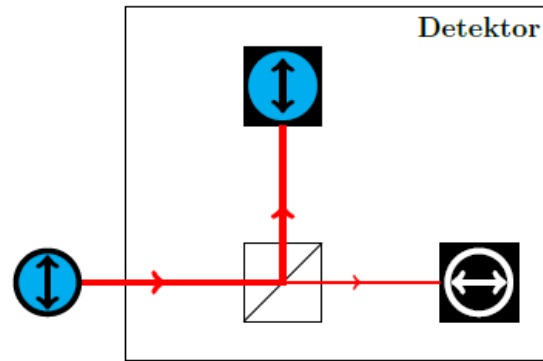
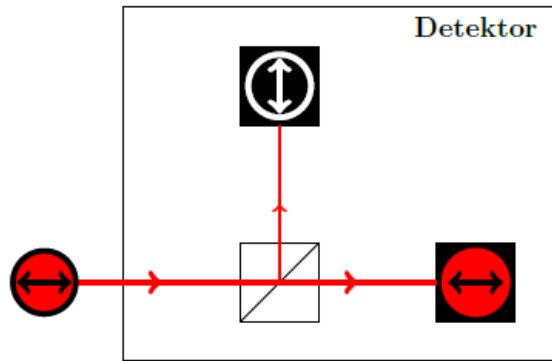
OSS

Lernumgebung „Doppelspaltversuch“.



QR-Code zum Kurs

Polarisation eines Photons

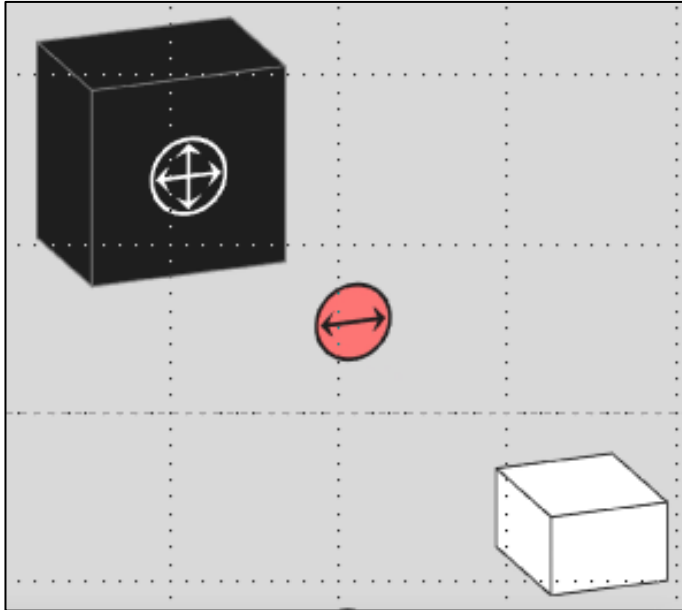


Folgerung

Für den Empfänger (Beobachter) ist der Unterschied zwischen klassischer Realität und Realität in der Quantenphysik auf den ersten Blick nicht erkennbar!

Polarisation eines Photons

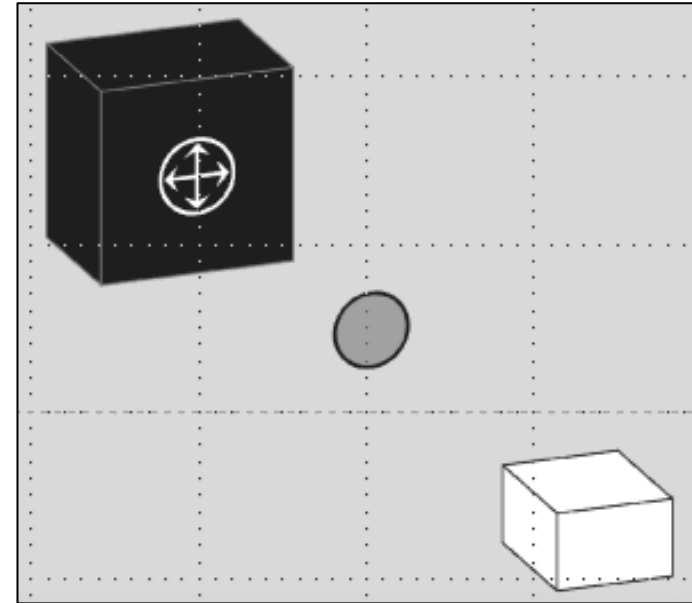
1. Erklärungsversuch



Klassische Realitätsdefinition erfüllt:

Photon besitzt die Eigenschaft „Polarisationsrichtung“ unabhängig davon, ob daran eine Messung erfolgt.

2. Erklärungsversuch



Einschränkung des Realitätsbegriffs:

Superpositionszustand bis zur Realisierung der Eigenschaft „Polarisationsrichtung“ bei der Messung.

Lokalität in der Quantenphysik

OSS

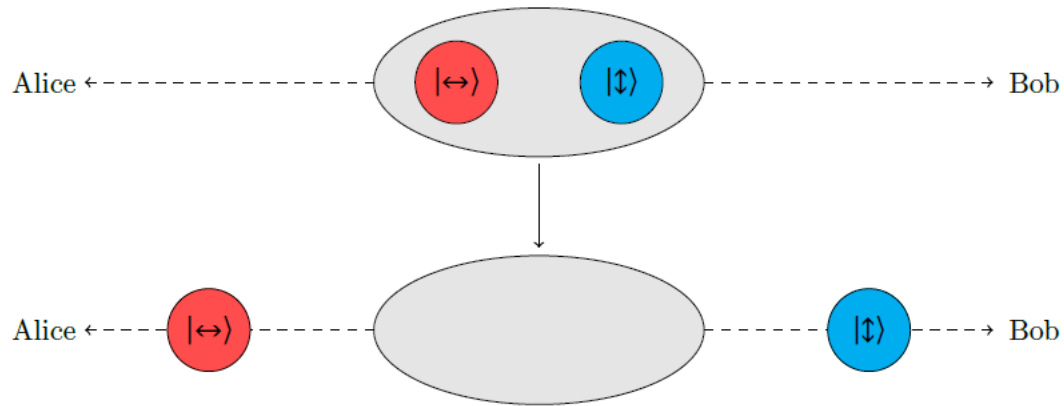
Lernumgebung zur „Verschränkung und Lokalität“.



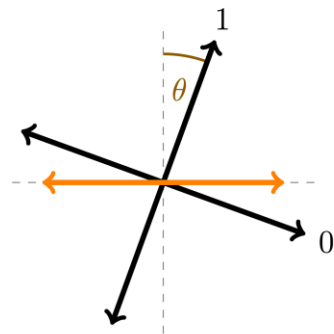
QR-Code zum Kurs

EPR-Experiment: Weitere Erklärungsversuche

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

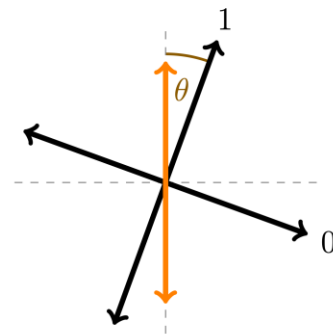


- ~~Annahme: Quelle emittiert entweder $|\leftrightarrow_A \uparrow_B\rangle$ oder $|\uparrow_A \leftrightarrow_B\rangle$~~
- Wir wissen: Alice und Bob dürfen bei gleicher Messeinstellung nie dasselbe messen
 $\Rightarrow P(0_A 0_B) = \cos^2 \theta \cdot \sin^2 \theta \neq 0$ ⚡



$$|\Psi_A\rangle = |\leftrightarrow\rangle$$

$$P(0_A) = \cos^2 \theta$$



$$|\Psi_B\rangle = |\uparrow\rangle$$

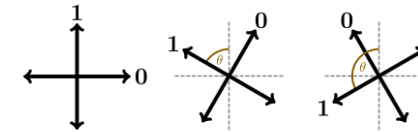
$$P(0_B) = \sin^2 \theta$$

Fazit zu Hypothese 1

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

EPR-Experiment: Erklärungsversuch

Hypothese 2: Die Photonen stimmen sich in der Quelle ab: „Theorie der verborgenen Variablen“



- „Etikettierung“ der emittierten Photonenpaare: sie tragen (komplementäre) Informationen über Verhalten an Detektoren von Anfang an mit sich
- Bei gleicher Messeinstellung messen Alice und Bob immer antikorreliert

i	Alice		
	0°	60°	120°
0	0	0	0
1	0	0	1
2	0	1	0
3	0	1	1
4	1	0	0
5	1	0	1
6	1	1	0
7	1	1	1

Fazit zur Hypothese 3

Für gleiche Messeinstellungen erklärt die Theorie der verborgenen Variablen die Messergebnisse

Hypothese 3: Die Die „Theorie der verborgenen Variablen“ gilt auch bei Wahl unterschiedlicher Messeinstellungen

Alice: 0°, Bob: 60°

<i>i</i>	Alice			Bob		
5	1	0	1	0	1	0
	0°	60°	120°	0°	60°	120°

Messergebnisse:

$1_A \ 1_B$

Alice: 0°, Bob: 120°

<i>i</i>	Alice			Bob		
5	1	0	1	0	1	0

Messergebnisse:

$1_A \ 0_B$

Alice: 60°, Bob: 0°

<i>i</i>	Alice			Bob		
5	1	0	1	0	1	0

Gleiches Messergebnis: $\frac{2}{3}$ der Fälle
 Unterschiedliches Messergebnis: $\frac{1}{3}$ der Fälle

Messergebnisse:

$0_A \ 0_B$

Alice: 120°, Bob: 0°

<i>i</i>	Alice			Bob		
5	1	0	1	0	1	0

Messergebnisse:

$1_A \ 0_B$

Alice: 120°, Bob: 60°

<i>i</i>	Alice			Bob		
5	1	0	1	0	1	0

Messergebnisse:

$1_A \ 1_B$

Testen der Hypothese der „verborgenen Variablen“

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

Bei beliebiger Gewichtung: $P(\text{gleich}) \leq \frac{2}{3}$ bzw. $P(\text{ungleich}) \geq \frac{1}{3}$

Variante der Bell'schen Ungleichung (1964)

Testen der Hypothese der „verborgenen Variablen“

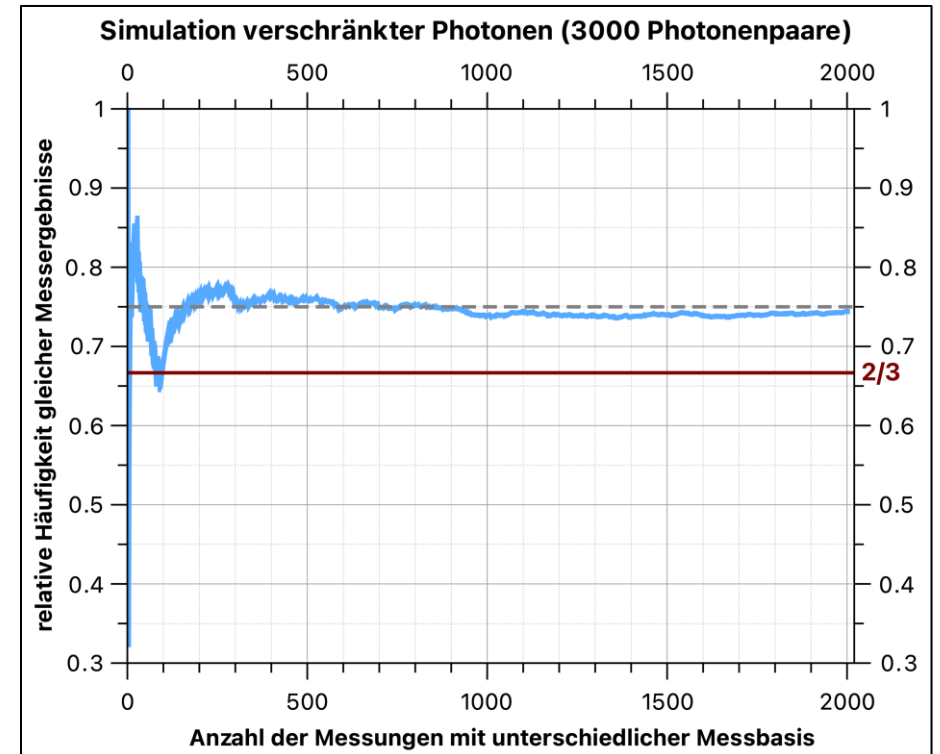
Messungen mit verschränkten Photonen liefern für den Fall der Messeinstellungen 0° , 60° und 120°
(verschieden für Alice und Bob)

$$P(\text{gleich}) = \frac{3}{4} > \frac{2}{3}.$$

- Wir haben also einen Widerspruch gefunden und die Hypothese muss verworfen werden.
- Simulation und Auswertung durch SuS möglich

Fazit zur Hypothese 3

Die Theorie der verborgenen Variablen erklärt die Messergebnisse nicht vollständig.



EPR-Experiment: Erklärung

- Verschränkter Zustand: Superposition
- z. B. einer der Bell-Zustände:

$$|\Psi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\underbrace{|\leftrightarrow\rangle} + \underbrace{|\updownarrow\rangle} \right)$$

Photon 1 ist horizontal
polarisiert und Photon 2
ist vertikal polarisiert

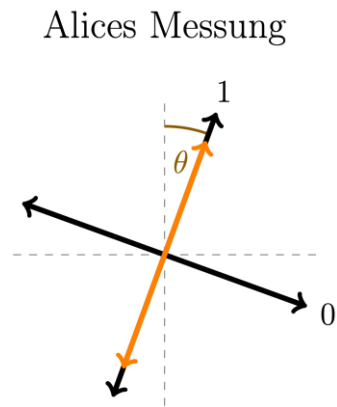
Photon 1 ist vertikal
polarisiert und Photon 2
ist horizontal polarisiert

EPR-Experiment: Erklärung

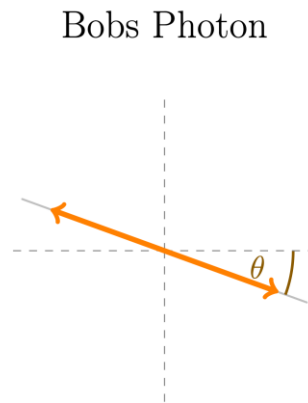


Lokalität in der Quantenphysik

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. (das ist weit mehr als die Aussage: Die Wellenfunktion ist überall im Raum von Null verschieden)



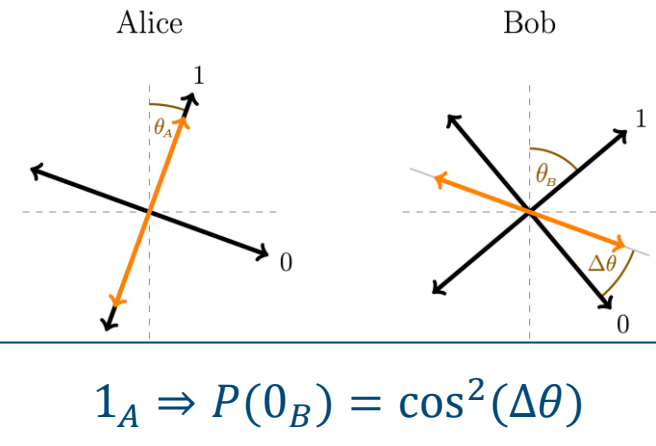
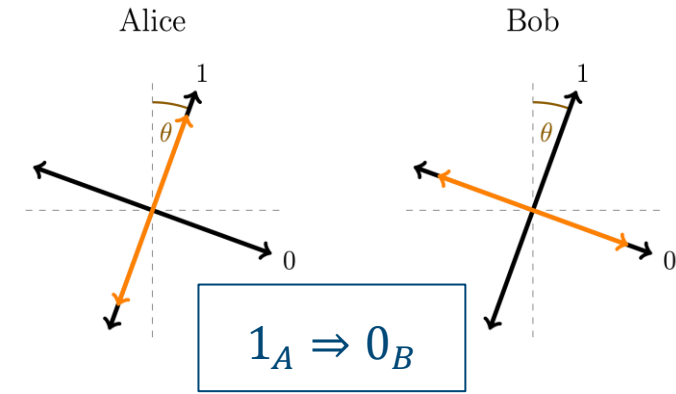
⇒



Gleiche Messeinstellung



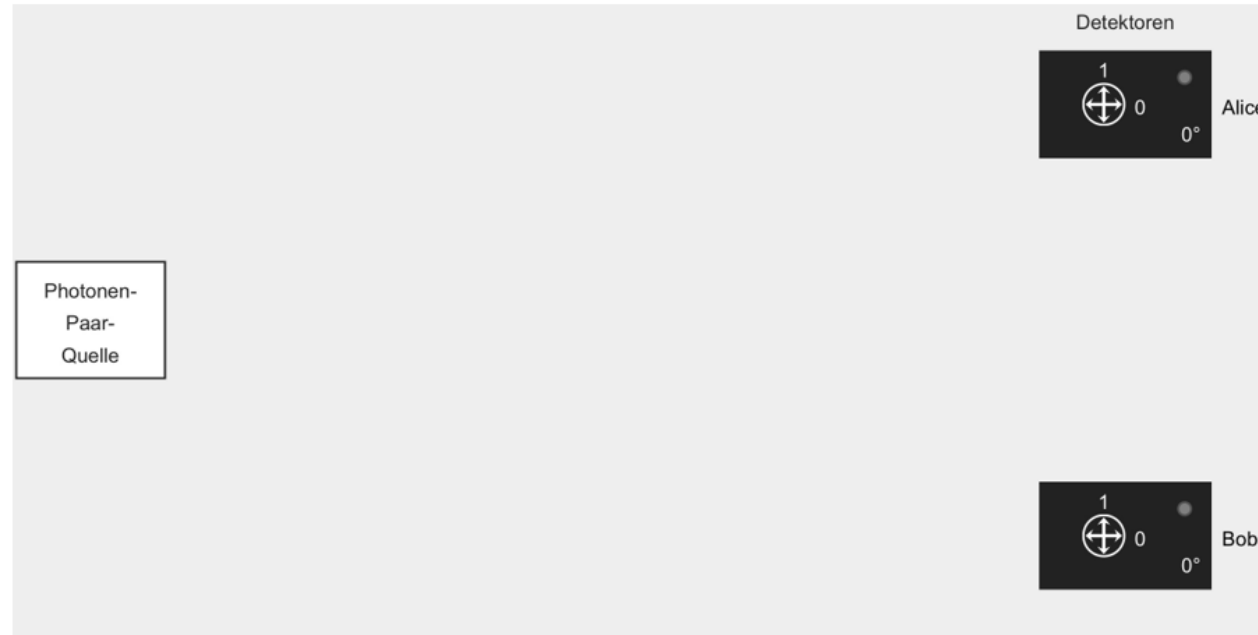
Ungleiche Messeinstellung

- Alices Messung zerstört Superposition, Kollaps der Wellenfunktion des Photonenpaares (überall im Raum)
→ siehe Definition der **Realität in der Quantenphysik**
- Instantane Realisierung des Polarisationszustandes von Bobs Photon
- Ohne Verletzung der spez. Relativitätstheorie:

*Es wird keine Information übermittelt, aber eine Messung bei Alice hat einen Einfluss auf Bob und umgekehrt (Kollaps der Wellenfunktion) **Nichtlokalität***

EPR-Experiment: Simulation



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



**UNIVERSITÄT
DES
SAARLANDES**

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit – Noch Fragen?