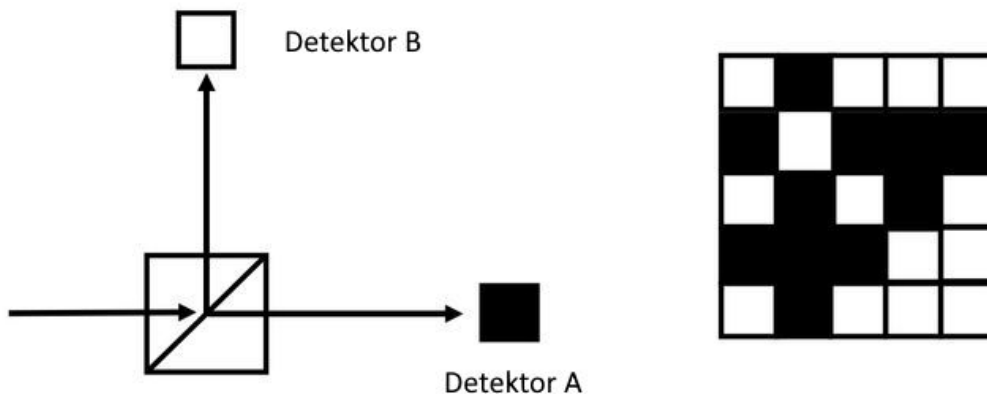


ZUFALL AM STRAHLTEILER

An einer Fensterscheibe wird der Großteil vom Licht reflektiert, ein kleiner Teil allerdings transmittiert. Da Licht aus Photonen besteht, kann ein ähnliches Experiment auch mit einzelnen Photonen durchgeführt werden. Inzwischen ist es experimentell möglich geworden, einzelne Photonen zu präparieren. Wie würden sich also einzelne Photonen an einer Glasscheibe verhalten: Reflektion oder Transmission? Kann diese Frage überhaupt beantwortet werden, und wenn ja, wie?



- ① Wie sich einzelne Photonen am Fensterglas verhalten, kann durch folgenden Versuch gezeigt werden. Dazu wird anstelle eines Fensterglases ein Strahlteilerwürfel verwendet. Man kann nun nach dem Strahlteiler Detektoren A und B platzieren, die jeweils einzelne Photonen messen können. Du kannst dir den Versuch im Video rechts ansehen. Beantworte mithilfe des Videos folgende Fragen:



a) Erkläre, was genau bedeutet das schwarz-weiße Muster bedeutet, welches sich nach den Messungen im Video ergeben hat.

Jedes schwarze Kästchen symbolisiert ein gemessenes Photon bei Detektor A

Jedes weiße Kästchen symbolisiert ein gemessenes Photon bei Detektor B

b) Nimm an, es werden 1000 Photonenwellen nacheinander in den Aufbau gesendet. Gib an, wie viele Detektionsereignisse du ungefähr an Detektor A erwartest.

Da beim Strahlteiler die Wahrscheinlichkeit jeweils 50% beträgt, kann man ca. 500 Photonen bei Detektor A erwarten.

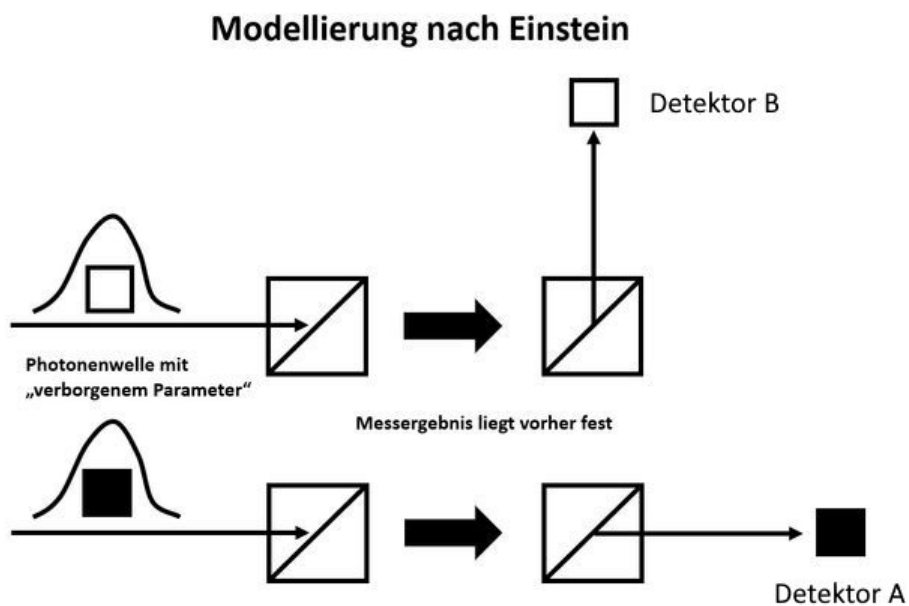


c) Können beide Detektoren gleichzeitig das Photon detektieren? Begründe deine Antwort.

Einzelphotonen können nur bei einem Detektor registriert werden, da sie bei Messung unteilbar sind.

Man hat lange überlegt, wie man den im Strahlteilerexperiment beobachteten Zufall erklären kann. Dabei gab es zwei Positionen, eine gemäß Einstein, eine andere gemäß der Quantenphysik (die unter anderem von Bohr und Heisenberg vertreten wurde).

② Einstein modellierte das Strahlteilerexperiment und auch andere experimentelle Beobachtungen mittels „verborgener Parameter“. Das folgende Bild illustriert seine Überlegung.

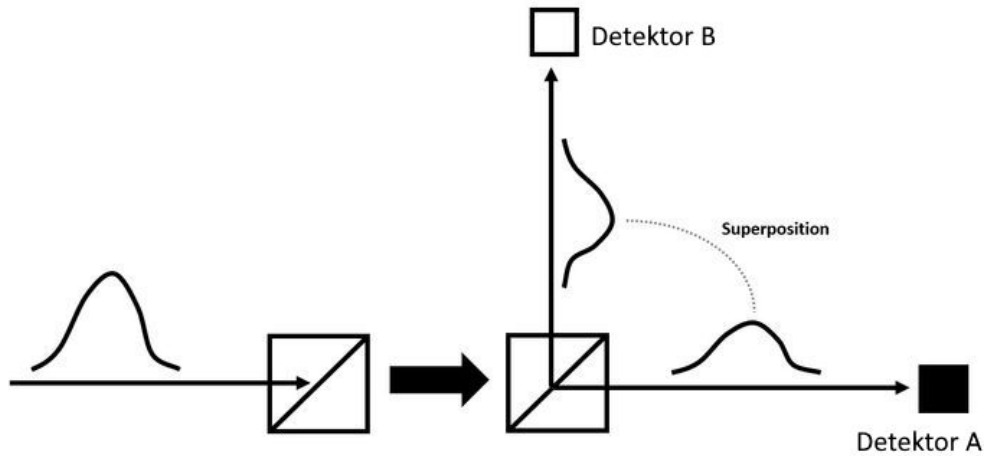


Fasse Einsteins Modellierung in eigenen Worten zusammen. Beschreibe dazu, besonders, wie er den Ausgang einer Messung beschreibt.

Nach Einstein ist das Messergebnis bereits vor der Messung durch verborgene Parameter vorherbestimmt, es gibt keinen Zufall nach Einstein in den Messungen.

- ③ Die quantenmechanische Modellierung des Photons am Strahlteilerwürfel erfolgt mittels Superpositionen. Das folgende Bild illustriert diese Überlegung.

Modellierung nach Quantenphysik



Fasse die quantenmechanischen Modellierungen in eigenen Worten zusammen. Beschreibe dazu, insbesondere wodurch das Messergebnis bestimmt wird.

In der Quantenphysik teilt sich die Wellenfunktion des Photons in beide Möglichkeiten auf und bildet eine Überlagerung (Superposition). Messung bei A entspricht konstruktiver Interferenz mit Detektor A, was automatisch zu destruktiver Interferenz bei B führt (und umgekehrt).

Der Zufall bestimmt über beide Möglichkeiten.

- ④ Einstein hat 1935 die Idee von verborgenen Parametern veröffentlicht. Erst 1964 wurde durch John Bell ein konkretes Experiment vorgeschlagen, mit dem Einsteins Standpunkt widerlegt werden kann. Die heutigen Messungen zeigen klar, dass Einstein verborgene Parameter nicht existieren. Überlege, was Einsteins 1935 zu seiner **deterministischen** Modellierung des Experiments veranlasst haben könnte.

Einsteins Annahme ist, dass lokale Wirkungen (Messungen) nur lokale Ursachen haben können.

Weiterhin nimmt er an, dass physikalische Eigenschaften real sind, also zu jedem Zeitpunkt im

Prinzip bestimmbar und damit Elemente der physikalischen Wirklichkeit sind.



WAS IST EIGENTLICH KORRELATION?

Der Begriff der "Verschränkung" ist zentral für das Verständnis und die Beschreibung moderner Quantentechnologien wie zum Beispiel Quantencomputern. Dazu müssen verschiedene Quantenobjekte durch bestimmte Präparationen in einigen Eigenschaften figurativ gesprochen "verbunden" werden. Dies kann zum Beispiel die Polarisierung sein. Wenn man die Polarisierung zweier auf bestimmte Art verschränkter Photonenwellen in dieselbe Richtung misst, so kommt immer dasselbe Ergebnis bei beiden Photonenwellen heraus: Wenn die eine Photonenwelle zum Beispiel einen Polfilter in horizontale Richtung passiert, dann wird die andere dies auch tun, egal wo sich beide Polfilter befinden. Man sagt: Die Messergebnisse von verschränkten Quantenobjekten **korrelieren** miteinander.

Aber Achtung: Nur weil eine der beiden Photonenwellen gemessen wird, heißt das nicht, dass sie die andere kausal beeinflusst. Wir wissen lediglich, dass die Photonenwelle mit der anderen korrelieren muss! Um wirklich nachzumessen, müssen wir zum anderen Polfilter reisen und uns vergewissern! Es findet keine Informationsübertragung zwischen den Polfiltern statt!

- ① Stelle den Unterschied zwischen Korrelation und Informationsübertragung in eigenen Worten dar!

Information entspricht digitalen Daten, die speicherbar und übertragbar sind. Korrelation

entspricht einem Zusammenhang zwischen verschiedenen Datenmustern (z.B. identische

Muster). Daten können korreliert sein, auch wenn man keine Kenntnis davon hat.

Erst durch Vergleich (nach Informationsübertragung) kann Korrelation nachgewiesen werden.

- ② Stelle dir folgende Situation vor: Du spazierst entlang der Straße und läufst auf eine Kreuzung zu. Als du auf die Ampel an der Straße blickst, siehst du, dass sie gelb ist. Nimm begründet Stellung zu folgenden Situationen.

a) Was weißt du über eine Ampel, die auf der anderen Straßenseite steht und in die andere Richtung Auskunft über die Ampelphase gibt? Nutze zur Begründung den Begriff der Korrelation.

Strenggenommen weiss ich nichts über die andere Ampel, solange ich diese nicht

beobachte. Es kann aber aus Alltagserfahrung Antikorrelation angenommen

werden: Rot bei mir ist Grün bei anderer Strasse. "Gelb" reicht noch nicht aus,

eine Aussage zu treffen. Erst wenn Gelb zu Rot oder Gelb zu Grün wird,

ist klar dass die Phase der anderen Ampel umgekehrt ist.



b) Was weißt du über die andere Ampel, wenn "deine" Ampel auf grün springt? Nutze zur Begründung den Begriff der Korrelation.

Aufgrund der Antikorrelation ist die andere Ampel dann "rot"

c) Wie kannst du sicher gehen, dass du Recht hattest? Nutze zur Begründung den Begriff der Informationsübertragung.

Erst durch Vergleich - hierzu kann Informationsübertragung maximal mit

Lichtgeschwindigkeit erfolgen.

- ③ Verschränkung ist ein physikalisches Phänomen, das oft falsch dargestellt und mystifiziert wird. Vor allem auf YouTube gibt es viele Videos, die irreführende Erklärungen liefern. Sieh dir das folgende Video an und bewerte, ob in dem Video der Unterschied zwischen „Information“ und „Korrelation“ deutlich wird. Sogar ohne genau zu wissen, was Verschränkung ist, kannst Du erkennen, ob dieser Unterschied im Video deutlich wird.



Folgende Aussagen zum Thema "Korrelation/Information" fand ich problematisch:

1:35, "das widerspricht der speziellen Relativitätstheorie" ist fachlich

falsch, da nur Korrelation besteht, aber keine Information dazu

ausgetauscht wird. Der Informationsaustausch ist durch

Lichtgeschwindigkeit begrenzt - in Einklang mit der speziellen Relativitätstheorie.



- ④ Sieh dir den Abschnitt im folgenden Transkript an. Markiere eine Aussage, die du fachlich für falsch hältst. Stelle sie dann begründet richtig.

00:00:57

Die Elektronen verhalten sich also so, dass der gesamt Spin immer bei null bleibt. Aber um das zu schaffen, müssten die Teilchen irgendwie miteinander kommunizieren, miteinander reden. Dass die Sache noch verblüffender ist, merken wir, wenn wir das ganze über weite Strecken betrachten.

00:01:12

Bringen wir zum Beispiel das eine Elektron auf die eine Seite des Universums und das andere auf die andere Seite des Universums, dann müsste es circa 45 Milliarden Lichtjahre dauern, bis eine Information mit Lichtgeschwindigkeit vom einen Elektron zum anderen gelangen könnte. Doch bei der Quantenverschränkung passiert die Umkehrung der Rotationsrichtung genau im gleichen Moment.

00:01:33

Das widerspricht der speziellen Relativitätstheorie, die besagt, dass Informationen nicht schneller als mit Lichtgeschwindigkeit übermittelt werden können. Hier passiert es anscheinend mit einer Geschwindigkeit, die weit jenseits der Lichtgeschwindigkeit liegt. Deswegen bezeichnete Einstein dies auch als spukhafte Fernwirkung.

Fachlich richtig müsste die markierte Stelle ungefähr wie folgt lauten:

Je nach gewählter Stelle - im Kern geht es um den Unterschied zwischen

Korrelation und Information.





[simpleclub](#)



[Dr. Froböse](#)

⑤ Finden in einem der oben genannten Videos eine fachliche Ungenauigkeit oder einen Fehler. Markiere die betreffenden Stellen im Transkript. Berichtigten dann die Aussage im Video.

- a) Es gibt ein Problem bei mit der Aussage aus Transkript _____ bei TimeCode _____.
- b) Die Stelle ist ungefähr so richtig:

Je nach gewählter Stelle - im Kern geht es um den Unterschied zwischen

Korrelation und Information.



[Transkript
simpleclub](#)



[Transkript Dr.
Froböse](#)

 **Für die Experten:**

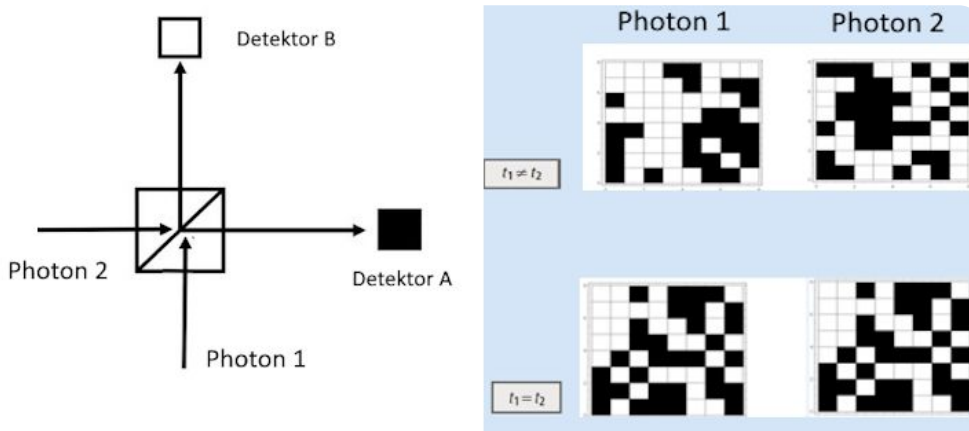
Suche dir weitere Videos aus dem Internet und beurteile sie auf ihre fachliche Richtigkeit. Gibt es fachlich falsche Ideen, die sich häufiger in Erklärungen finden?



VERBORGENE PARAMETER ODER QUANTENMECHANISCHE ÜBERLAGERUNG?



Expertenaufgabe



Hong-Ou-Mandel In...
Nur wenn die Photonen zeitgleich am Strahlteiler ankommen, verhalten sie sich identisch, sonst nicht.

Wir erweitern das Experiment am Strahlteiler nun und senden **zwei** Photonen wie im Bild gezeigt auf den Strahlteiler.

Kommen die Photonen nacheinander am Strahlteiler an ($t_1 \neq t_2$), ergeben sich zwei Zufallsmuster: Jeweils mit 50% Wahrscheinlichkeit Detektor A_1/B_1 für das erste Photon, und 50% Wahrscheinlichkeit Detektor A_2/B_2 für das zweite Photon.

Die vier Möglichkeiten (A_1, A_2) , (A_1, B_2) , (B_1, A_2) , (B_1, B_2) haben somit je 25% Wahrscheinlichkeit.

Wenn beide Photonen **gleichzeitig** am Strahlteiler auftreffen ($t_1 = t_2$), ändert sich das Verhalten: Beide Photonen verhalten sich immer **genau gleich**, es treten also nur die Ereignisse (A_1, A_2) , (B_1, B_2) mit je 50% Wahrscheinlichkeit auf.

Wie lassen sich Messdaten nun interpretieren? Wir vergleichen wieder den Ansatz von Albert Einstein, der vorherbestimmte Messdaten annimmt mit dem der Quantenphysik, bei dem die Photonen Überlagerungszustände bilden.

⑥ Deute das Experiment nach Einstein das Verhalten mit verborgenen Parametern. Du kannst gerne eine Skizze anfertigen. Wie kommt es zu der Änderung der Messergebnisse, wenn die Photonen gleichzeitig auftreffen?

Begründung nach Einstein: Beide Photonen kommen gleichzeitig im Strahlteiler an; so dass lokale Wechselwirkung möglich ist, die zu Korrelation führen kann. Es gibt aber keinen natürlichen Grund dafür, dass diese Korrelation entsteht - es ist eher eine "ad.hoc" Begründung.

⑦ Deute das Experiment im Rahmen der Quantenphysik mit Superpositionszuständen. Du kannst gerne eine Skizze anfertigen. Wie kommt es zu der Änderung der Messergebnisse, wenn die Photonen gleichzeitig auftreffen?

Beide Photonen bilden eine Überlagerung. Konstruktive und destruktive Interferenz liegen vor für "beide Photonen nehmen selben Ausgang" bzw. "beide Photonen nehmen unterschiedlichen Ausgang".

Die tiefere physikalische Begründung ist der Phasensprung von 90° bei Reflektion in Kombination mit der Ununterscheidbarkeit der Photonen, wenn sie gleichzeitig eintreffen. Mathematisch zeigt sich dann genau die Korrelation der Photonen auf identischen Ausgängen - beide Photonen sind verschränkt und verhalten sich gleich.



HINTERGRUNDMATERIAL UND WEITERFÜHRENDE INFORMATIONEN

Das Hong-Ou Mandel Experiment

Messdaten und weitere Informationen zum Aufbau des Experiments stehen unter diesem QR-Code zur Verfügung.



[Messdaten zur Hong-Ou-Mandel Interferenz](#)

Bell'sche Ungleichung

Die Frage, ob verborgene Parameter ausgeschlossen werden können, konnte zu Einsteins Lebzeiten nicht beantwortet werden. Erst **John Bell** hat 1964 ein Kriterium erdnen, mit dem eine Unterscheidung zwischen beiden Interpretationen gegeben werden konnte.

Aber auch danach hat es noch Jahrzehnte gedauert, diese Experimente mit verschränkten Photonen tatsächlich so durchzuführen, dass Theorien mit verborgene Parameter ausgeschlossen werden können.

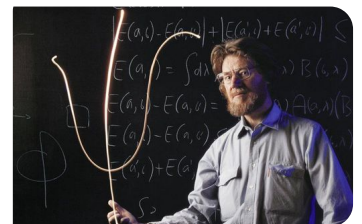
Übrigens ist damit nicht gezeigt, dass die Quantenphysik die richtige Theorie ist - es ist nur bewiesen, dass lokale, realistische Theorien nicht mit den Messungsergebnissen übereinstimmen.

Bislang hat die Quantenphysik aber jeden experimentellen Test bestanden.

QuantumVisions: Lehrvideos zur Quantenverschränkung

Das Institut für Didaktik der Physik der Universität Münster hat Lehrvideos zu vielen Themen der Quantenphysik produziert, die über die website www.quantumvisions.net abgerufen werden können.

Videos zum Experiment mit verschränkten Photonen (U1-11) sowie zur Bell'sche Ungleichung (U1-12) können über diese QR-Codes abgerufen werden.



John Bell (1928-1990)



[Experiment mit verschränkten Photonen](#)



[Bell'sche Ungleichung](#)