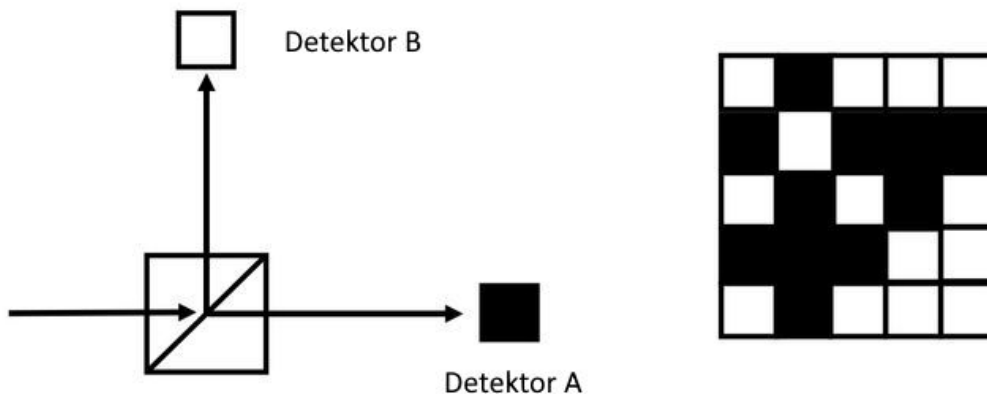


# ZUFALL AM STRAHLTEILER

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.

---



---

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

---



---

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

---



---



# 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!

② Stelle den Unterschied zwischen Korrelation und Informationsübertragung in eigenen Worten dar!

---

---

---

---

---

③ 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.

---

---

---

---

---



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

---

---

---

---

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

---

---

---

---

④ 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:

---

---

---

- ⑤ 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:

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---





[simpleclub](#)



[Dr. Froböse](#)

⑥ Finden in einem der oben genannten Videos eine fachliche Ungenauigkeit oder einen Fehler. Markiere die betreffenden Stellen im Transkript. Berichtigen 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:



[Transkript simpleclub](#)



[Transkript Dr. Froböse](#)

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---



**Für die Experten:**

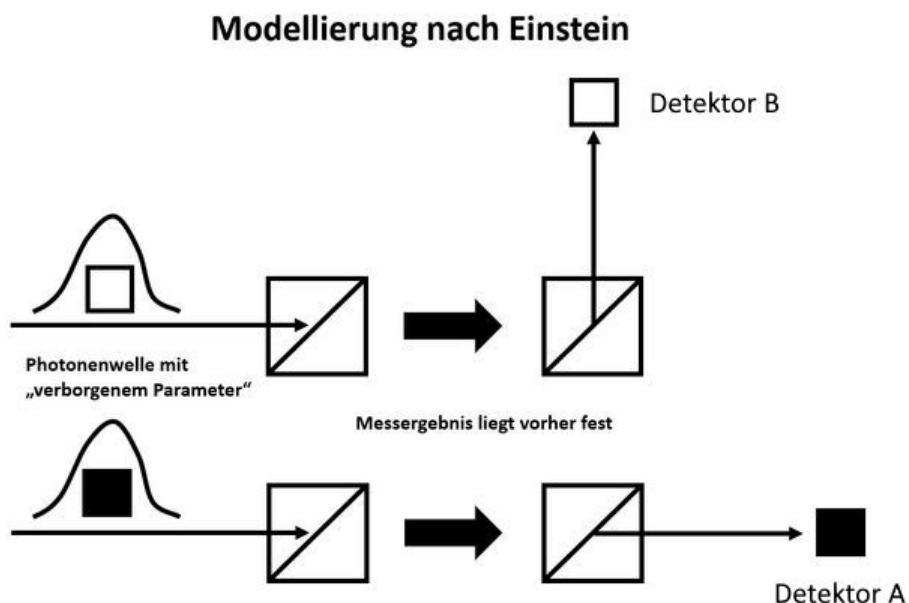
Suche dir weitere Videos aus dem Internet und beurteile sie auf ihre fachliche Richtigkeit. Gibt es fachlich falsche Ideen, die sich häufiger in Erklärungen finden?



# MODELLIERUNG DES ZUFALLS NACH EINSTEIN UND GEMÄSS DER QUANTENPHYSIK

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).

- ⑦ 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.

---

---

---

---

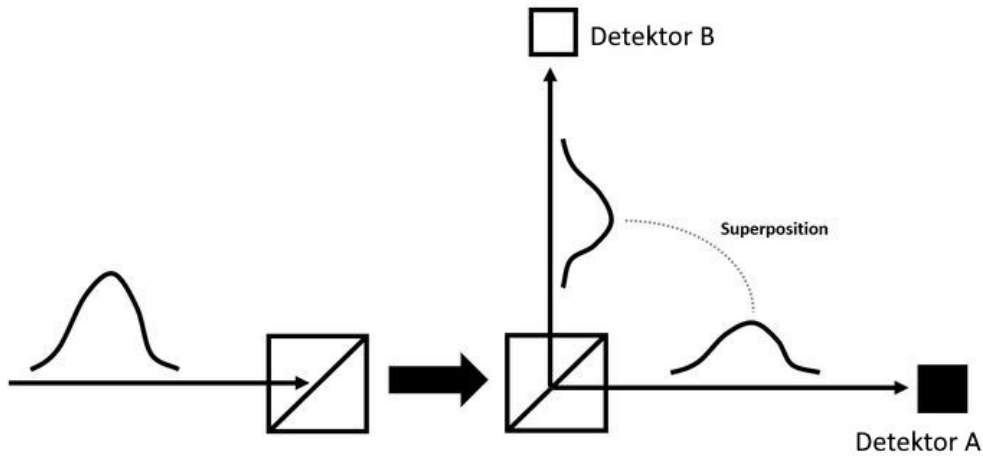
---

---

---

- ⑧ 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.

---



---



---



---



---



---



---

- ⑨ 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.

---



---



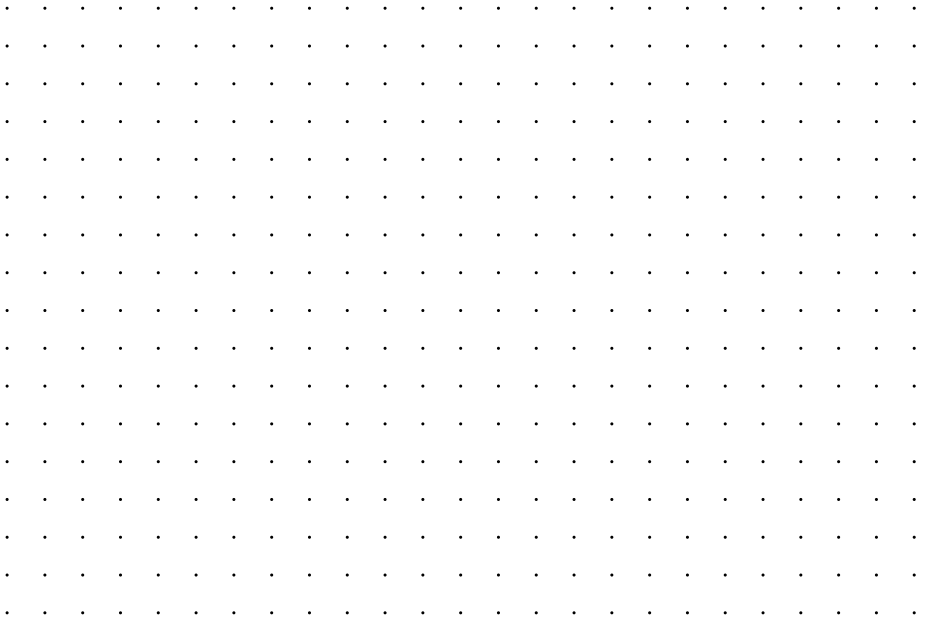
---



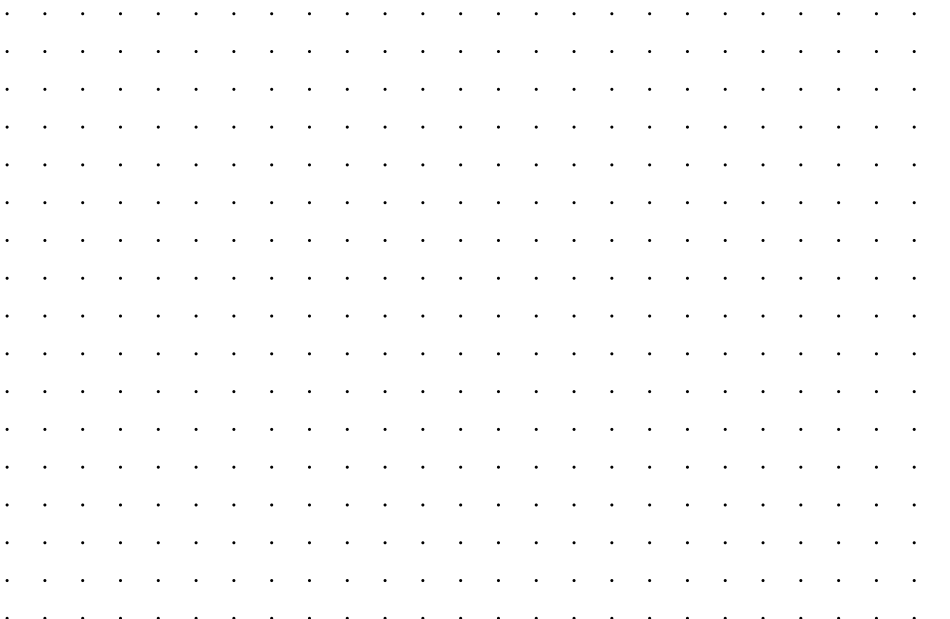
---



⑩ 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?



⑪ 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?

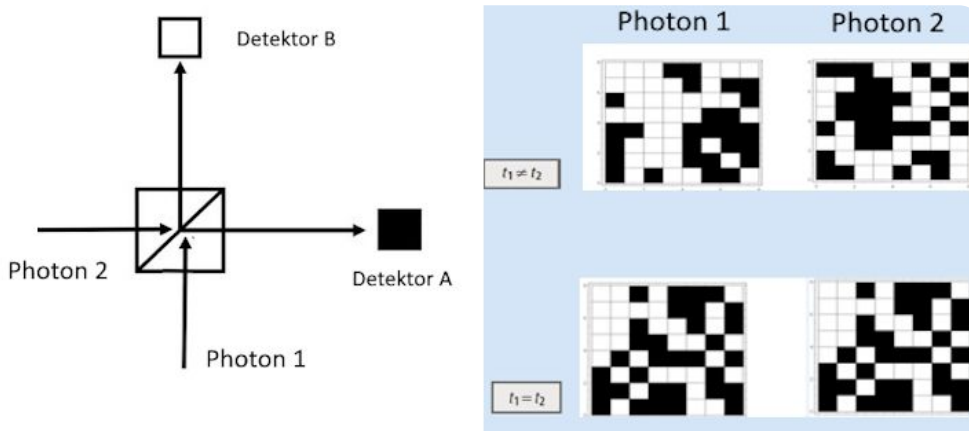






**Hong-Ou-Mandel In...**  
Nur wenn die Photonen zeitgleich am Strahlteiler ankommen, verhalten sie sich identisch, sonst nicht.

# VERBORGENE PARAMETER ODER QUANTENMECHANISCHE ÜBERLAGERUNG?



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.

- ⑫ 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.

# 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.

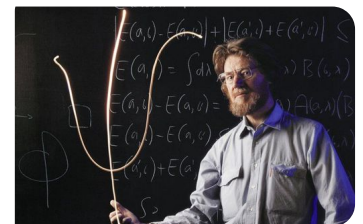
Übrigens ist damit nicht gezeigt, dass die Quantenphysik die richtige Theorie ist - es ist nur bewiesen, dass lokale, realistische Theorien nicht mit den Messungsergebnissen übereinstimmen.

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](http://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](#)