

Grundlagen der Quantenphysik

12. Juni 2025

Aleksandr Sorokin

Entnommen aus
**QUANTENCOMPUTING IM
MINT-UNTERRICHT**

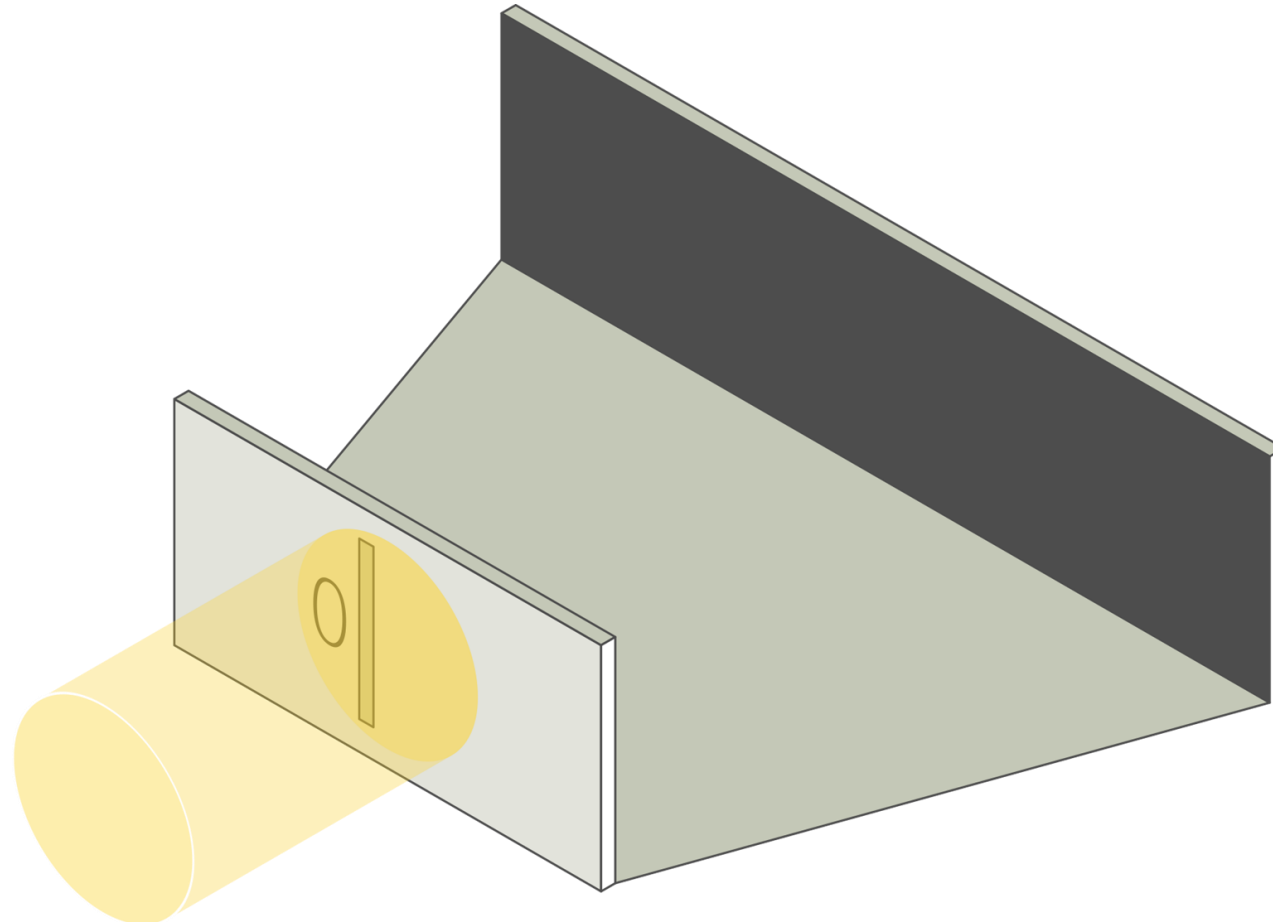


Gemeinsam für guten MINT-Unterricht



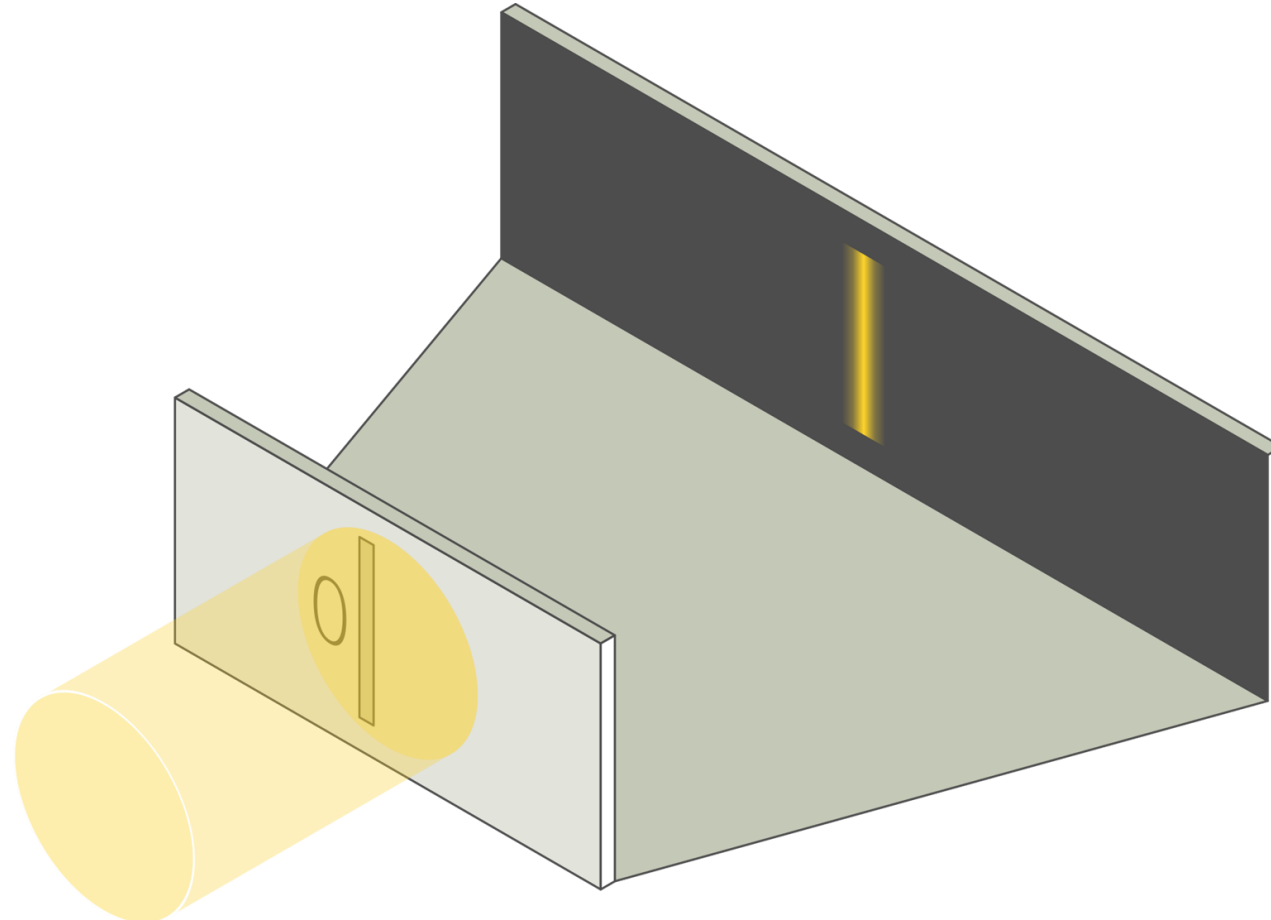
Das Young'sche Doppelspalt-Experiment

- ▶ Ein Laserstrahl trifft auf einen schmalen Spalt.
- ▶ Was erscheint auf dem Bildschirm?



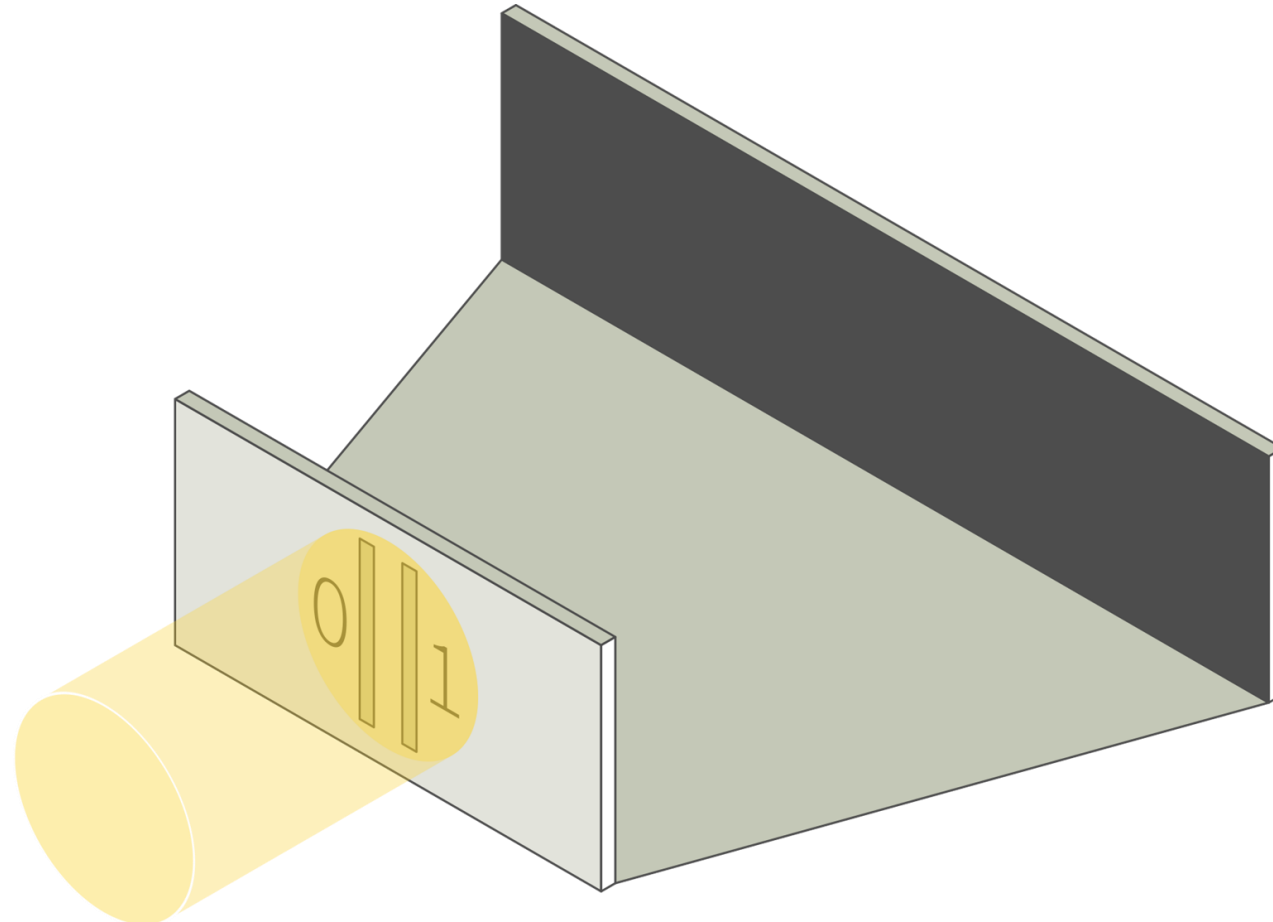
Das Young'sche Doppelspalt-Experiment

- ▶ Ein Laserstrahl trifft auf einen schmalen Spalt.
- ▶ Was erscheint auf dem Bildschirm?



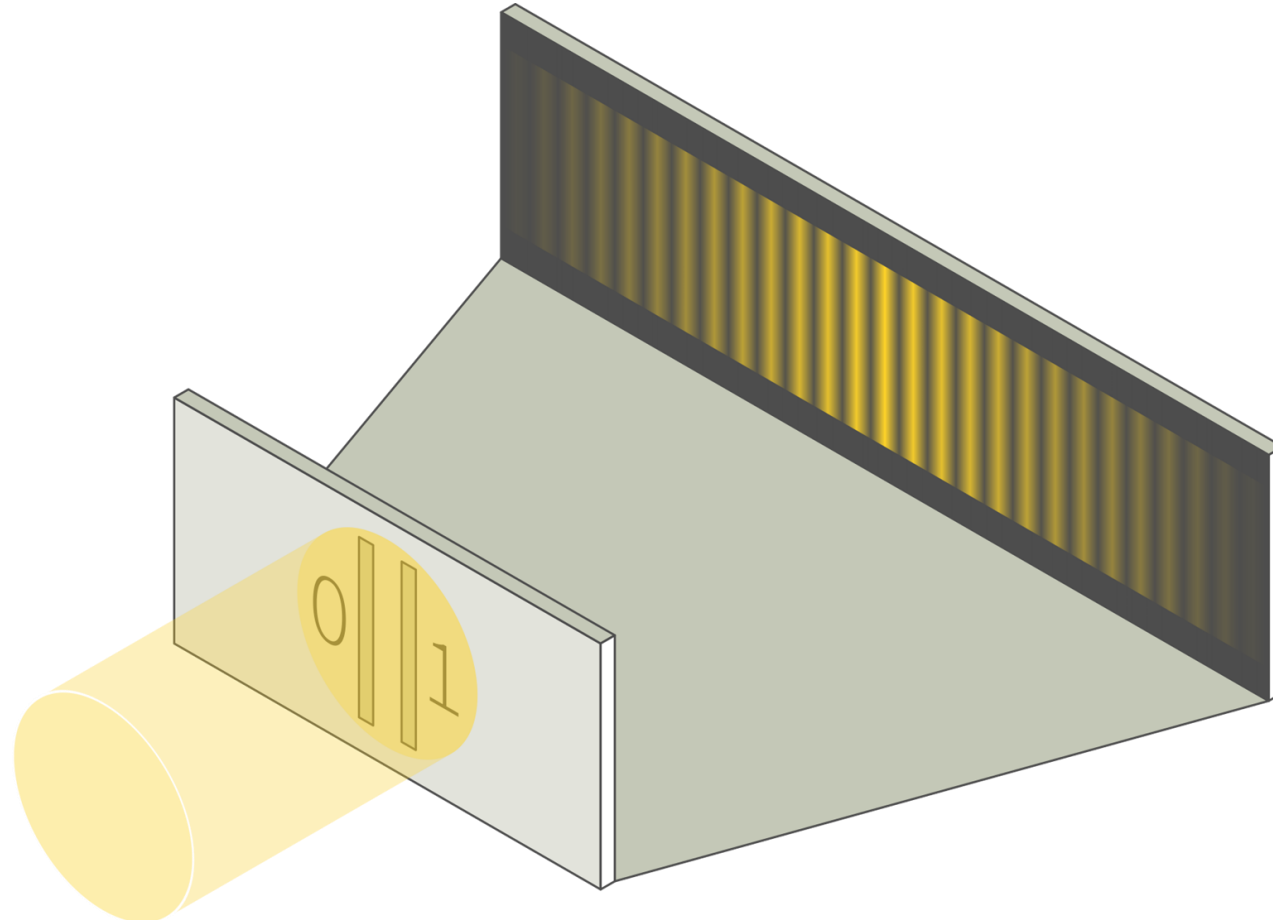
Das Young'sche Doppelspalt-Experiment

- ▶ Ein Laserstrahl trifft auf zwei schmale Spalte.
- ▶ Was erscheint auf dem Bildschirm?



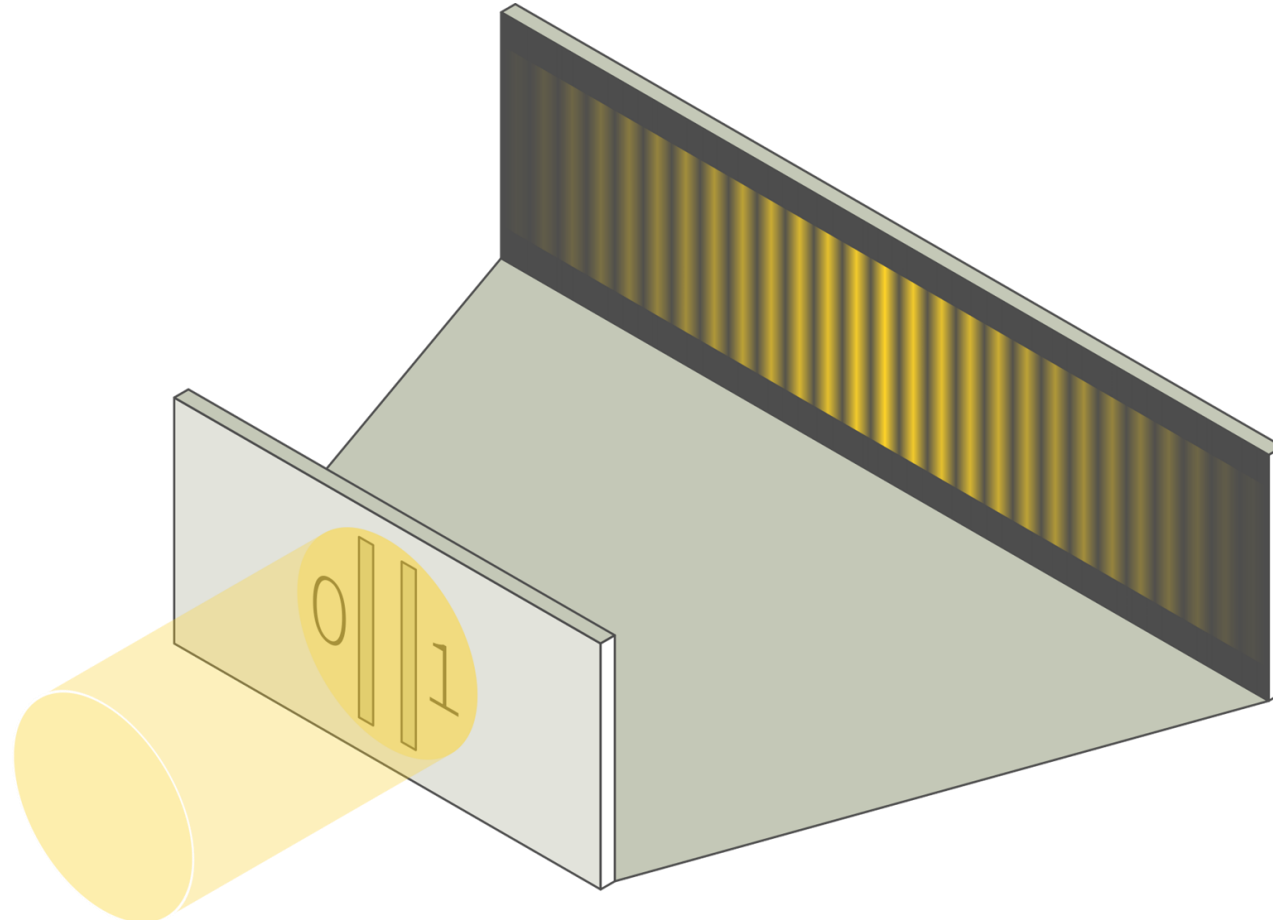
Das Young'sche Doppelspalt-Experiment

- ▶ Ein Laserstrahl trifft auf zwei schmale Spalte.
- ▶ Was erscheint auf dem Bildschirm?



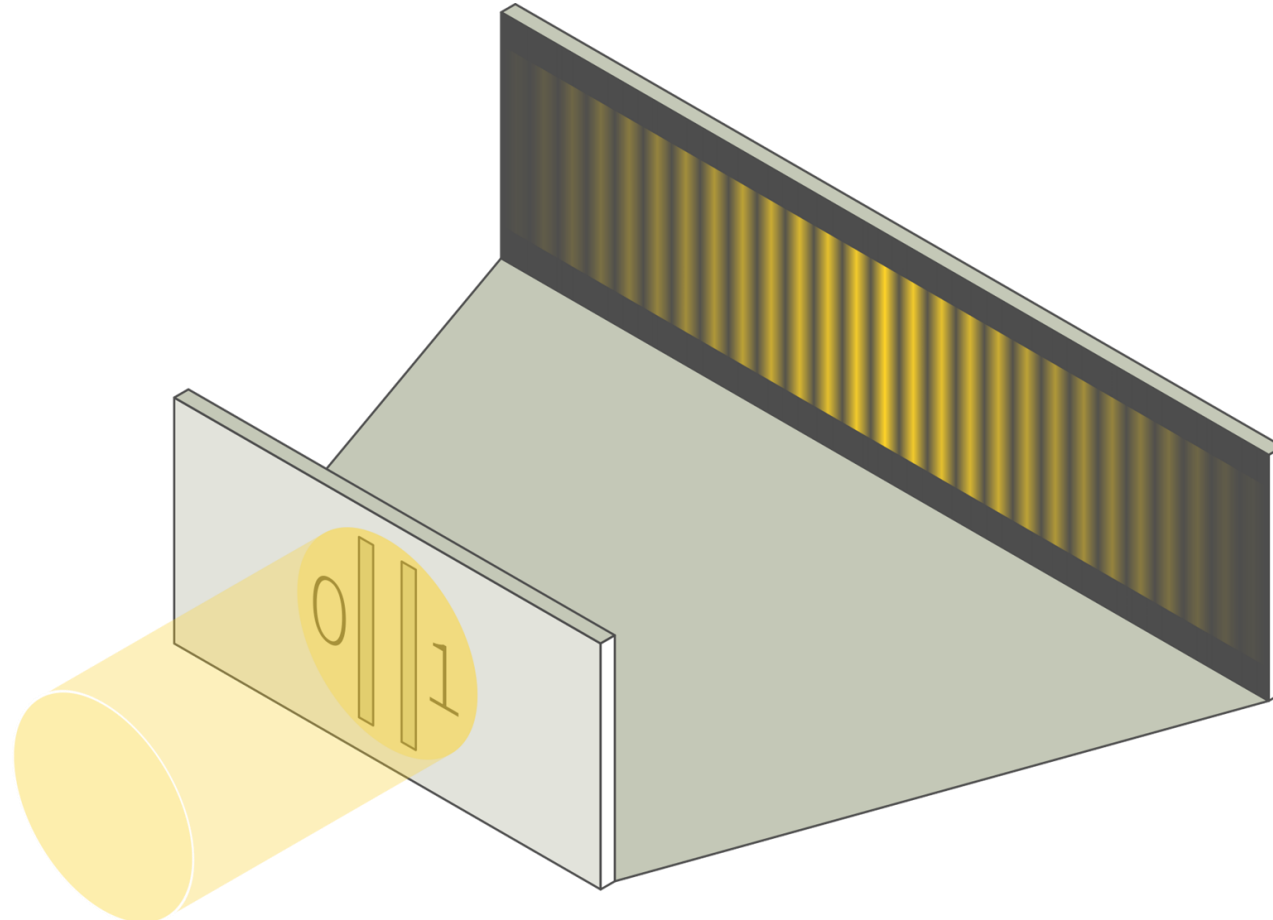
Das Young'sche Doppelspalt-Experiment

- ▶ Nun wird die Lichtintensität nach und nach verringert.
- ▶ Wie wirkt sich das auf das Streifenmuster aus?



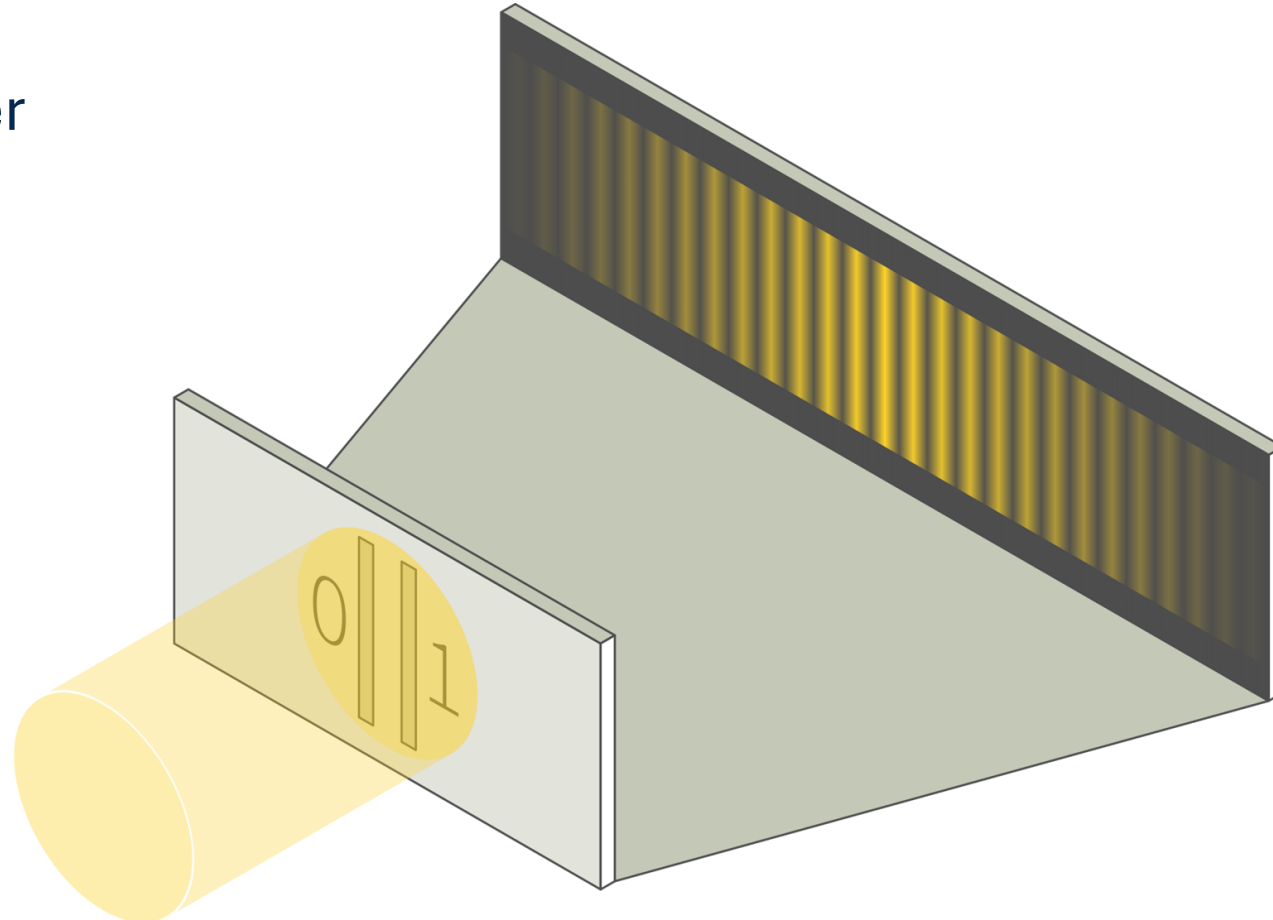
Das Young'sche Doppelspalt-Experiment

- ▶ Nun wird die Lichtintensität nach und nach verringert.
- ▶ Die Helligkeit der Streifen nimmt ab, während Position und Breite der Streifen gleich bleiben.



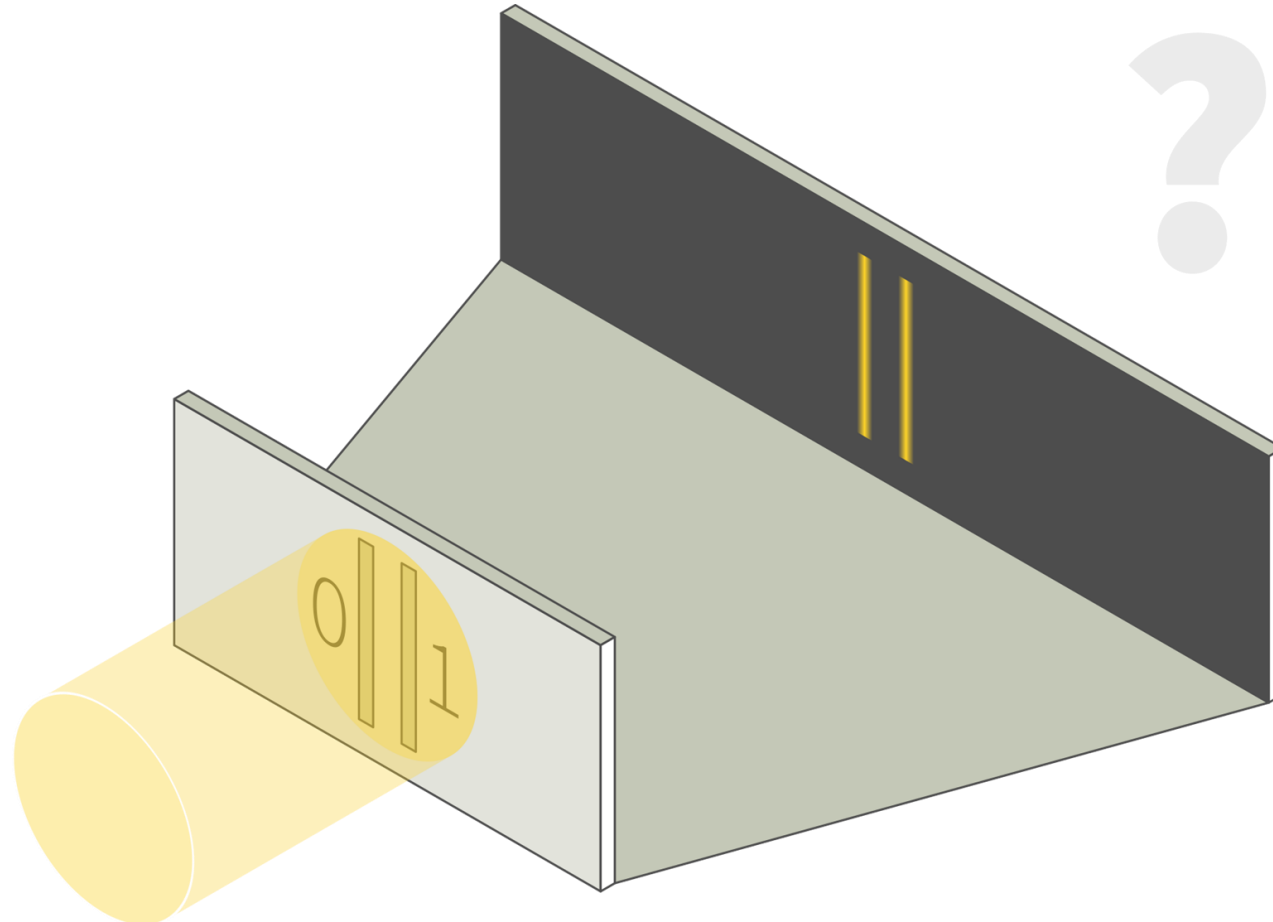
Das Young'sche Doppelspalt-Experiment

- ▶ Es gibt zwei Betrachtungsweisen: Die Energie des Laserstrahls wird entweder durch Wellen oder durch Teilchen (*Photonen*) transportiert.
- ▶ Was passiert, wenn nur noch zwei Photonen pro Sekunde durch die Spalte gelangen?



Das Young'sche Doppelspalt-Experiment

- ▶ Was passiert, wenn nur noch zwei Photonen pro Sekunde durch die Spalte gelangen?
- ▶ Die Photonen gelangen mit Sicherheit entweder durch den einen oder den anderen Spalt
... richtig?



Das Young'sche Doppelspalt-Experiment

NEIN

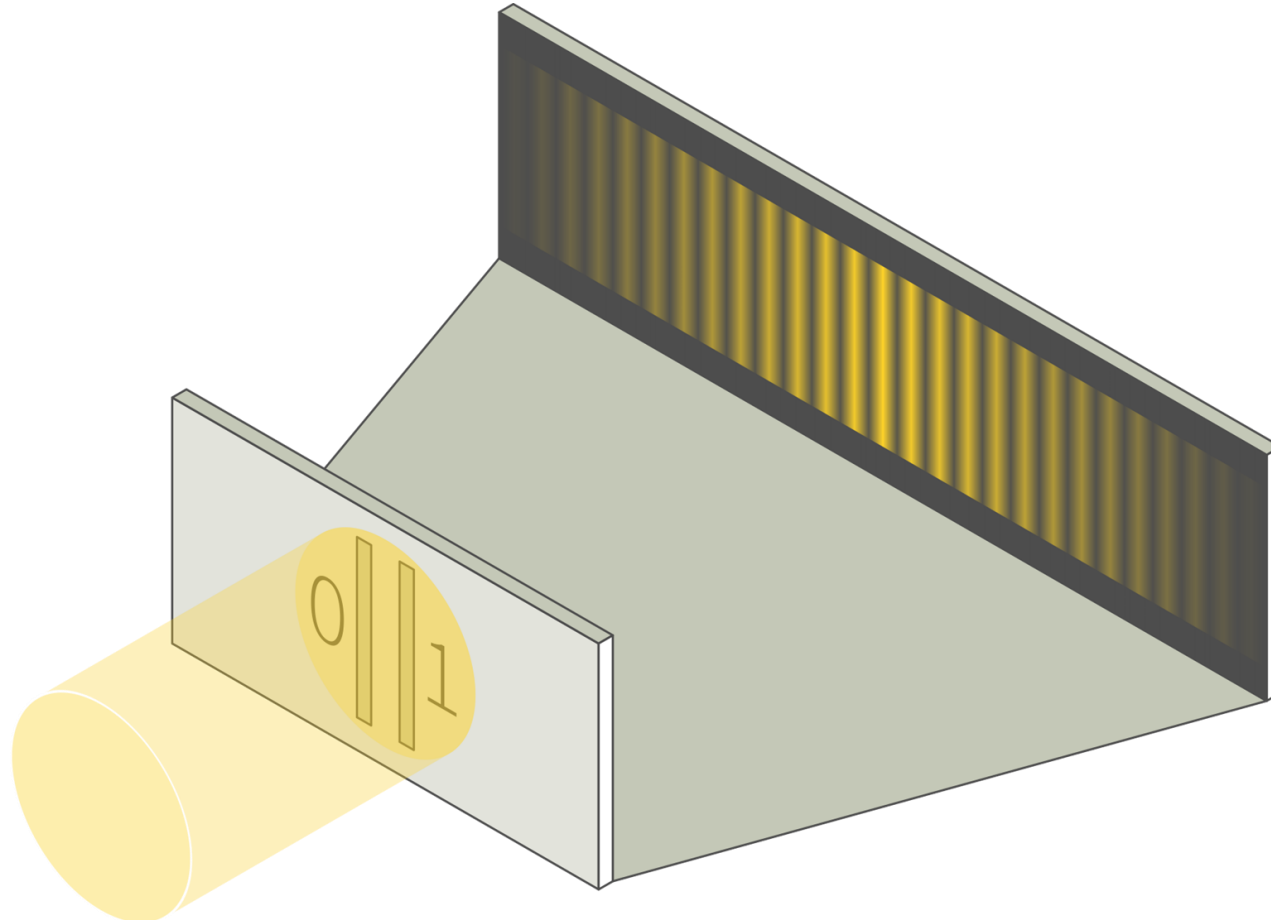
Das Young'sche Doppelspalt-Experiment

- ▶ Photonen treffen an bestimmten Stellen auf den Schirm (es handelt sich also tatsächlich um Teilchen).
- ▶ Das Muster suggeriert jedoch, dass sich diese Teilchen wie Wellen verhalten.



Zustand in der Quantenphysik

- ▶ Jedes Objekt kann durch einen *Zustand* beschrieben werden.
- ▶ Gelangt das Photon durch den Spalt 0, ist es im Zustand $|0\rangle$.
- ▶ Gelangt es durch den Spalt 1, ist es im Zustand $|1\rangle$.



Zustand in der Quantenphysik

- ▶ In der klassischen Physik sollte das Photon hinter den Spalten **entweder** im Zustand $|0\rangle$ **oder** im Zustand $|1\rangle$ sein.

- ▶ Die Quantenphysik sagt aber, dass es in einer **Superposition** der Zustände $|0\rangle$ und $|1\rangle$ sein kann.

Zustand in der Quantenphysik

- ▶ In der klassischen Physik sollte das Photon hinter den Spalten **entweder** im Zustand $|0\rangle$ **oder** im Zustand $|1\rangle$ sein.

$$|\psi\rangle = c_0|0\rangle + c_1|1\rangle$$

Das Photon gelangt **gleichzeitig** durch beide Spalte.

- ▶ Die Quantenphysik sagt aber, dass es in einer **Superposition** der Zustände $|0\rangle$ und $|1\rangle$ sein kann.

Zustand in der Quantenphysik

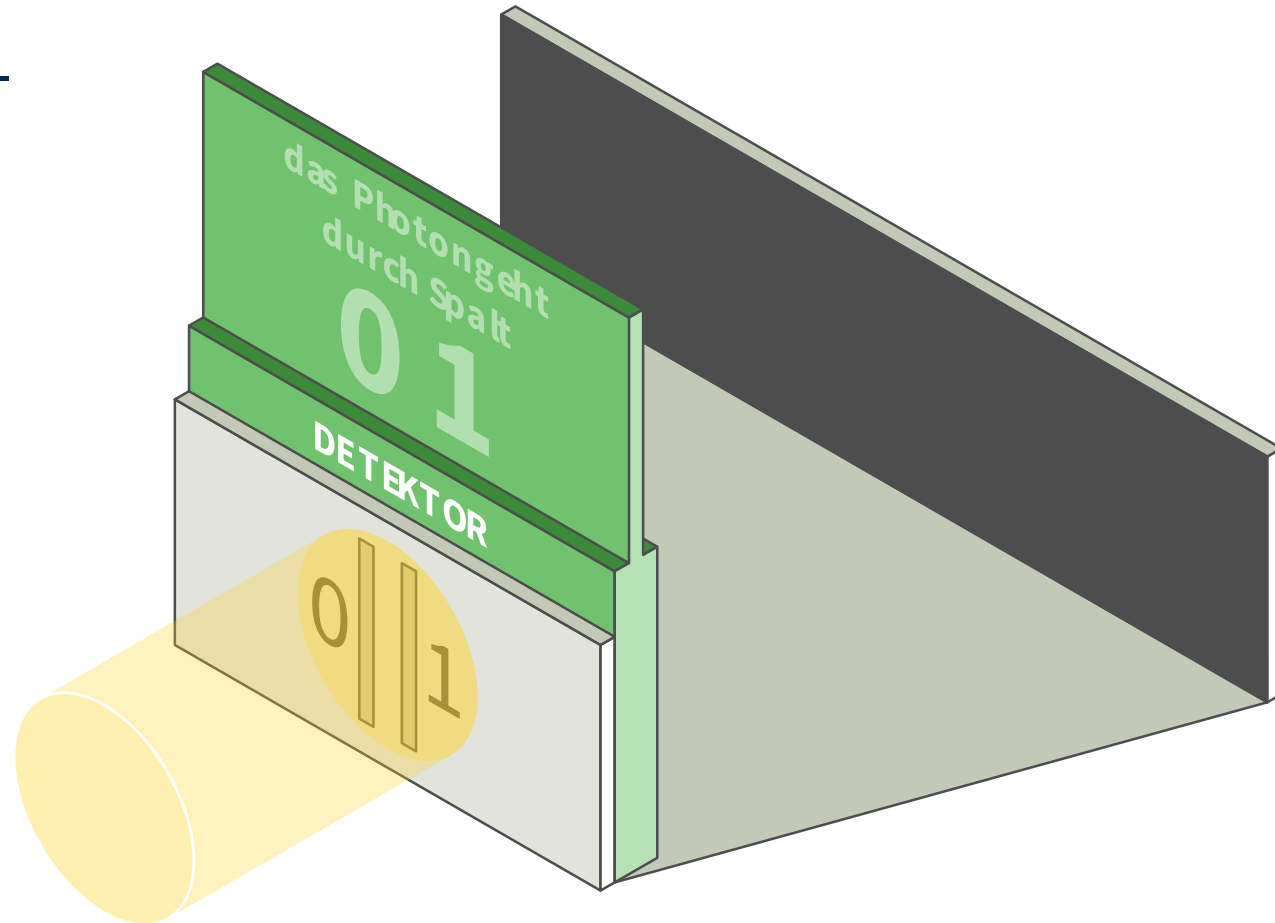
- ▶ $|c_0|^2$ und $|c_1|^2$ sind die **Wahrscheinlichkeiten**, dass das Photon durch Spalt 0 bzw. Spalt 1 gegangen ist.
- ▶ Man kann nicht genau wissen (es besteht eine Unsicherheit), durch welchen Spalt es gegangen ist.

$$|\psi\rangle = c_0|0\rangle + c_1|1\rangle$$

$$|c_0|^2 + |c_1|^2 = 1$$

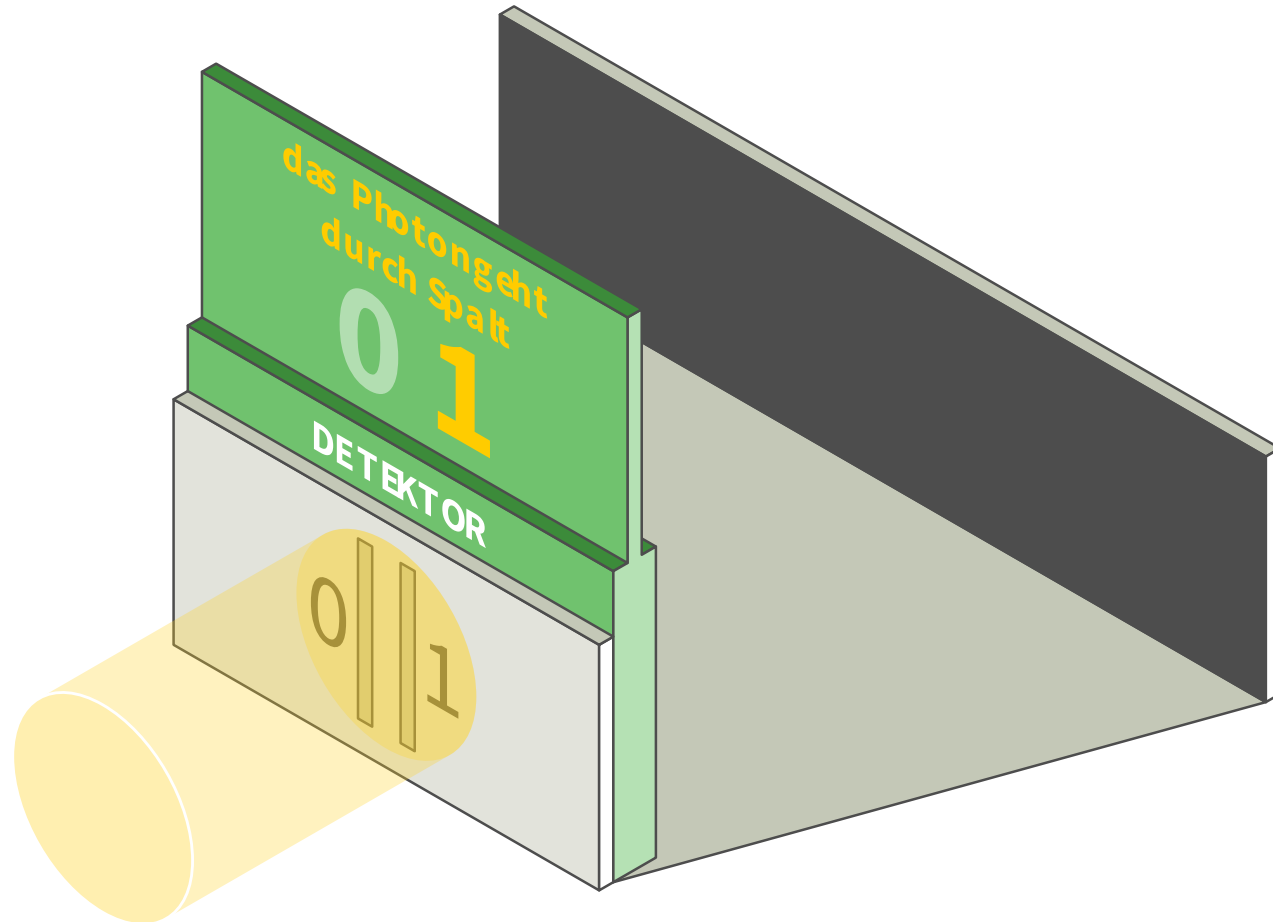
Messung

- ▶ Das Messergebnis ist eine Zahl (mit Einheiten) – genau wie in der klassischen Physik.
- ▶ Jedes Ergebnis wird mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit gemessen.



Messung

- ▶ Anders als in der klassischen Physik wird in der Quantenphysik bei einer Messung der ursprüngliche Zustand **zerstört**.
- ▶ Eine Messung hebt jegliche Unsicherheit auf.



Messung

- ▶ Anders als in der klassischen Physik wird in der Quantenphysik bei einer Messung der ursprüngliche Zustand **zerstört**.

- ▶ Eine Messung hebt jegliche Unsicherheit auf.

$$|\psi\rangle = c_0|0\rangle + c_1|1\rangle$$



MESSUNG

$$|\psi'\rangle = |1\rangle$$

Messung

- ▶ Aber wie erhalten wir c_0 und c_1 , wenn wir eine Messung nicht wiederholen können, ohne den Zustand zu zerstören?

$$|\psi\rangle = c_0|0\rangle + c_1|1\rangle$$

MESSUNG

$$|\psi'\rangle = |1\rangle$$

Messung

- ▶ Aber wie erhalten wir c_0 und c_1 , wenn wir eine Messung nicht wiederholen können, ohne den Zustand zu zerstören?
- ▶ Man kann einfach viele Kopien des Experiments machen.

Nr.	Ergebnis	Nr.	Ergebnis	Nr.	Ergebnis
1	$ 1\rangle$	7	$ 1\rangle$	13	$ 1\rangle$
2	$ 1\rangle$	8	$ 1\rangle$	14	$ 0\rangle$
3	$ 1\rangle$	9	$ 1\rangle$	15	$ 1\rangle$
4	$ 0\rangle$	10	$ 0\rangle$	16	$ 1\rangle$
5	$ 1\rangle$	11	$ 1\rangle$	17	$ 0\rangle$
6	$ 1\rangle$	12	$ 1\rangle$	18	$ 1\rangle$

Verschränkung

- ▶ Zwei Photonen, A und B, gelangen durch einen Doppelspalt.
- ▶ Wie kann man den Zustand dieser beiden Photonen beschreiben?

Verschränkung

- ▶ Zwei Photonen, A und B, gelangen durch einen Doppelspalt.
- ▶ Wie kann man den Zustand dieser beiden Photonen beschreiben?

$$|\psi_A\rangle = c_{A0}|0_A\rangle + c_{A1}|1_A\rangle$$

$$|\psi_B\rangle = c_{B0}|0_B\rangle + c_{B1}|1_B\rangle$$

Verschränkung

- ▶ Was ändert sich, wenn beide Photonen nicht unabhängig voneinander sind?

$$|\psi_A\rangle = c_{A0}|0_A\rangle + c_{A1}|1_A\rangle$$

$$|\psi_B\rangle = c_{B0}|0_B\rangle + c_{B1}|1_B\rangle$$

Verschränkung

- ▶ In dem Fall können die beiden Photonen nicht unabhängig voneinander beschrieben werden.
- ▶ Das Zwei-Photonen-System wird als Ganzes beschrieben.

$$\begin{aligned} |\psi\rangle = & c_{00}|0_A 0_B\rangle \\ & + c_{01}|0_A 1_B\rangle \\ & + c_{10}|1_A 0_B\rangle \\ & + c_{11}|1_A 1_B\rangle \end{aligned}$$

Verschränkung

- Man kann die Schreibweise vereinfachen, indem man die Indizes A und B weglässt. Die Reihenfolge von 0 und 1 ist aber immer noch wichtig.

$$\begin{aligned} |\psi\rangle &= c_{00}|00\rangle \\ &+ c_{01}|01\rangle \\ &+ c_{10}|10\rangle \\ &+ c_{11}|11\rangle \end{aligned}$$

Verschränkung

- ▶ Zwei Photonen A und B sind im Zustand $|\psi\rangle$. Es wird **nur** Photon **A** gemessen.

- ▶ Was kann man über den Zustand von Photon **B** sagen?

$$|\psi\rangle = c_{01}|01\rangle + c_{10}|10\rangle$$

Entanglement

- ▶ Zwei Photonen A und B sind im Zustand $|\psi\rangle$. Es wird **nur** Photon **A** gemessen.

$$|\psi\rangle = c_{01}|01\rangle + c_{10}|10\rangle$$

A ist durch den Spalt **0** gegangen



B ist durch den Spalt **1** gegangen

A ist durch den Spalt **1** gegangen



B ist durch den Spalt **0** gegangen

- ▶ Was kann man über den Zustand von Photon **B** sagen?

Verschränkung

- ▶ Die Messung des Zustands des einen Photons gibt einem Auskunft über den Zustand des anderen Photons.
- ▶ Die Zustände der Photonen sind **verschränkt**.

$$|\psi\rangle = c_{01}|01\rangle + c_{10}|10\rangle$$

A ist durch den Spalt **0** gegangen



B ist durch den Spalt **1** gegangen

A ist durch den Spalt **1** gegangen



B ist durch den Spalt **0** gegangen

Aufgaben und Aktivitäten



Gemeinsam für guten MINT-Unterricht



Aufgabe: Zustände und Messungen

- ▶ Das System wird in dem Zustand $0,6 |0\rangle - 0,8 |1\rangle$ präpariert.
 - ▶ Wenn das System im Zustand $|i\rangle$ ist, ist das Messergebnis i .
 - ▶ Es wird nun eine Messung am System durchgeführt.
-
- ▶ Kannst du das Ergebnis der Messung bestimmen? Erkläre.

Aufgabe: Zustände und Messungen

- ▶ Das System wird in dem Zustand $0,6 |0\rangle - 0,8 |1\rangle$ präpariert.
- ▶ Wenn das System im Zustand $|i\rangle$ ist, ist das Messergebnis i .
- ▶ Es wird nun eine Messung am System durchgeführt.
- ▶ Angenommen, das Messergebnis ist 0. Es wird nun direkt nach der ersten Messung eine weitere Messung durchgeführt.

- ▶ Kannst du jetzt das Ergebnis der Messung bestimmen? Erkläre.

Aufgabe: Zustände und Messungen

- ▶ Das System wird in dem Zustand $0,6 |0\rangle - 0,8 |1\rangle$ präpariert.
- ▶ Wenn das System im Zustand $|i\rangle$ ist, ist das Messergebnis i .
- ▶ Es wird nun eine Messung am System durchgeführt.
- ▶ Es werden 1000 identische Kopien des ursprünglichen Systems hergestellt und an jedem System wird eine Messung durchgeführt.
- ▶ Schätze ab, wie oft das Ergebnis 0 und wie oft das Ergebnis 1 gemessen wird.

Aufgabe: Zustände und Messungen

- ▶ Das System wird in dem Zustand $0,6 |0\rangle - 0,8 |1\rangle$ präpariert.
- ▶ Wenn das System im Zustand $|i\rangle$ ist, ist das Messergebnis i .
- ▶ Es wird nun eine Messung am System durchgeführt.
- ▶ Es werden 1000 identische Kopien des ursprünglichen Systems hergestellt und an jedem System wird eine Messung durchgeführt.

- ▶ Schätze den Mittelwert der Ergebnisse ab.

Aktivität: Eine Messung modellieren



Gemeinsam für guten MINT-Unterricht

