

Alexander Schuster

Technische Universität Dresden

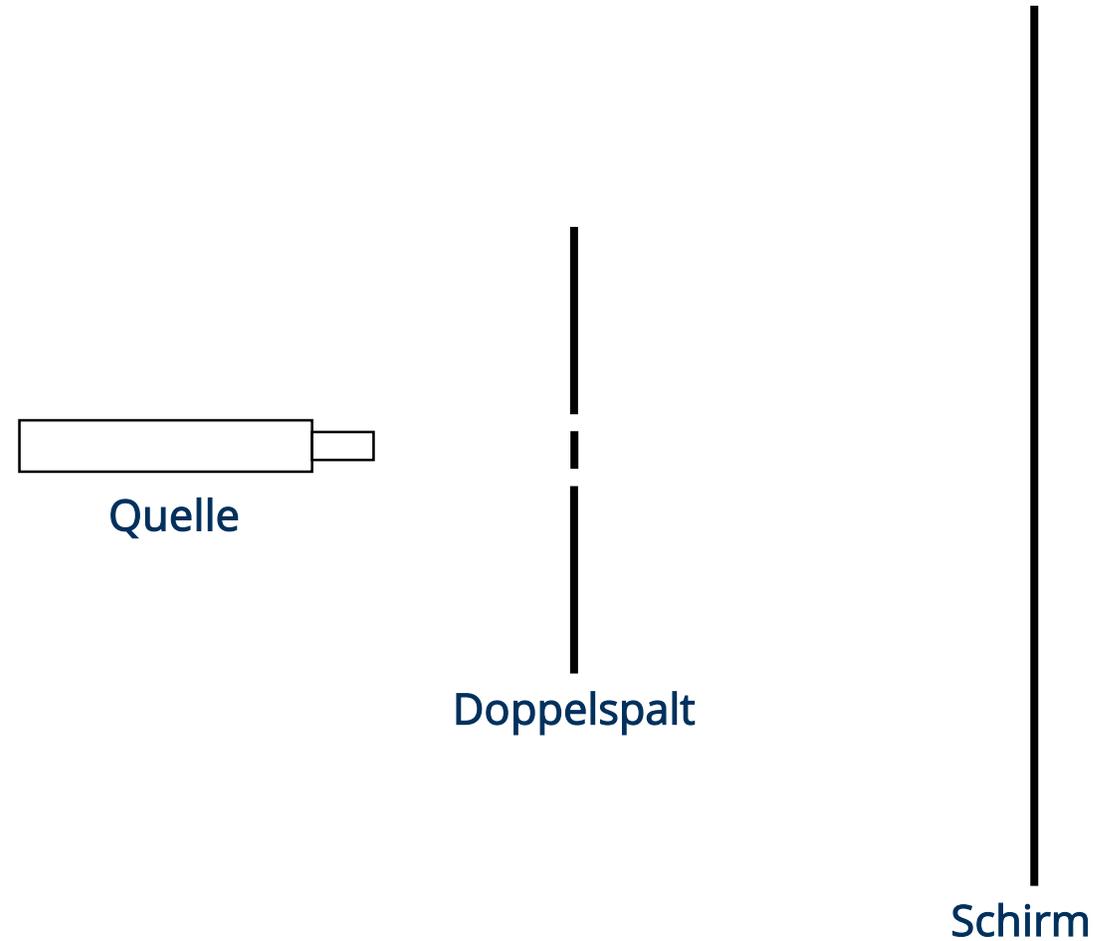
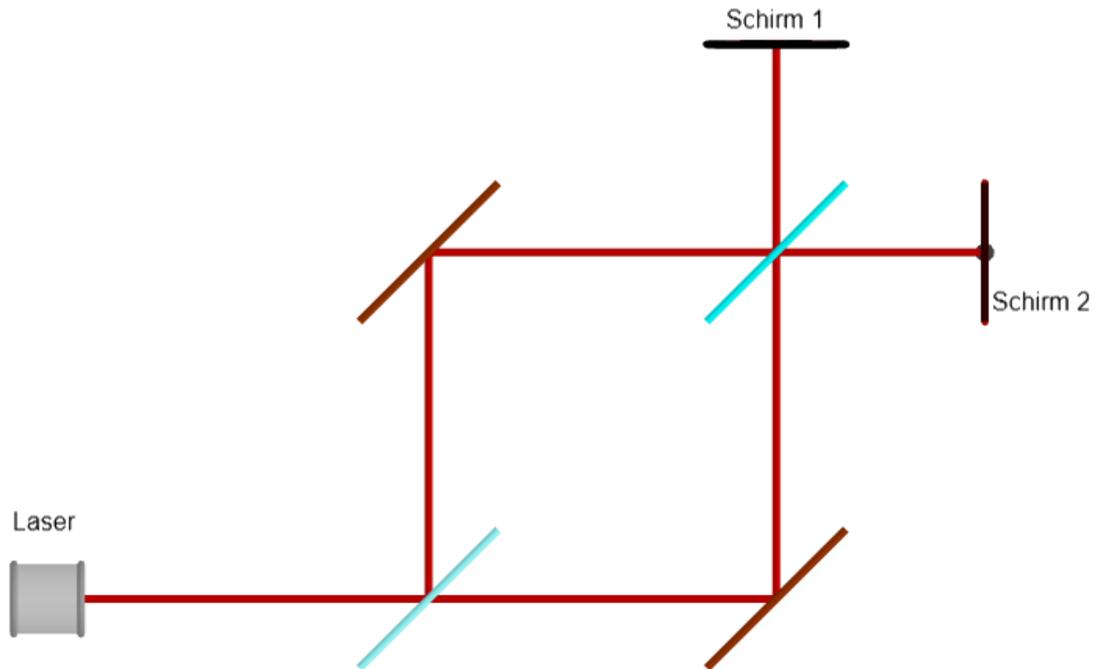
Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden

Quantenphysik

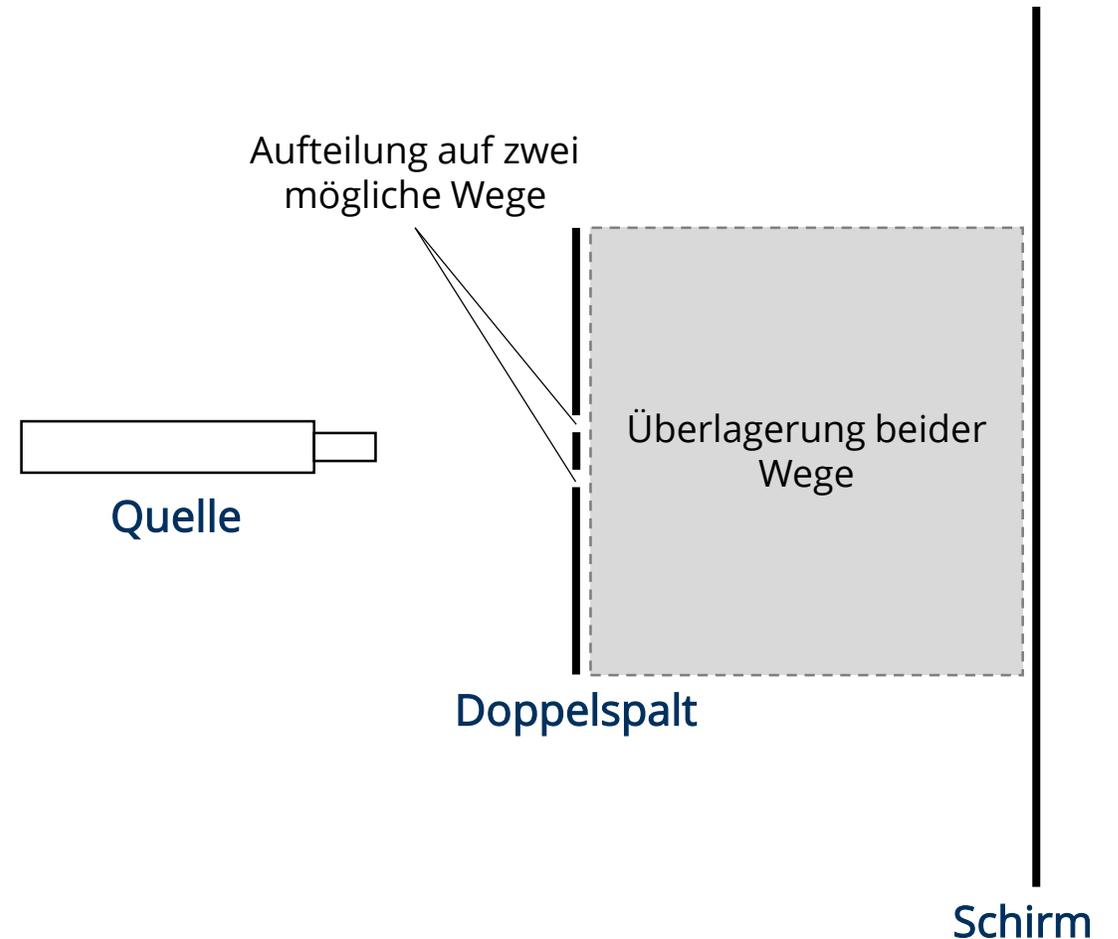
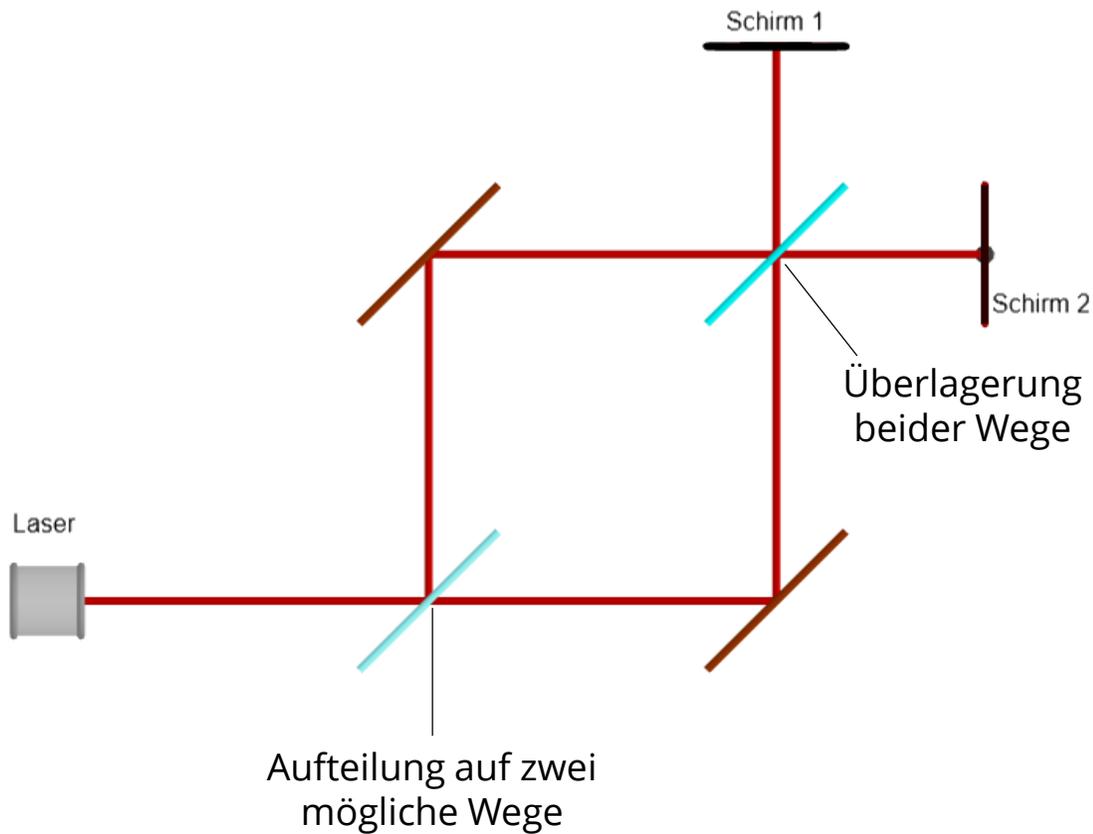
Doppelspaltexperiment und quantenphysikalisches Weltbild

Dresden, 2024

Interferometerexperimente → Doppelspaltexperiment



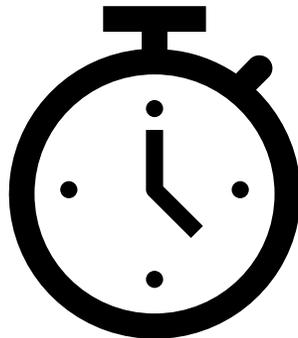
Interferometerexperimente → Doppelspaltexperiment



Der Quantenradierer am Doppelspalt

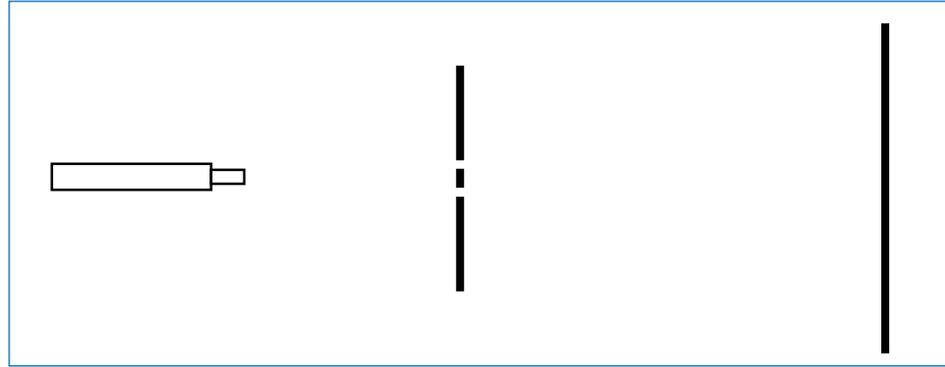
Aufgabe:

Wende dein Wissen zum Quantenradierer im Mach-Zehnder-Interferometer nun auf den Quantenradierer am Doppelspalt an. Verwende bei deinen Erklärungen dein Vorwissen zu den Interferometerexperimenten. Bearbeite dazu das Arbeitsblatt.



Zeit: 15 min

Der Quantenradierer am Doppelspalt



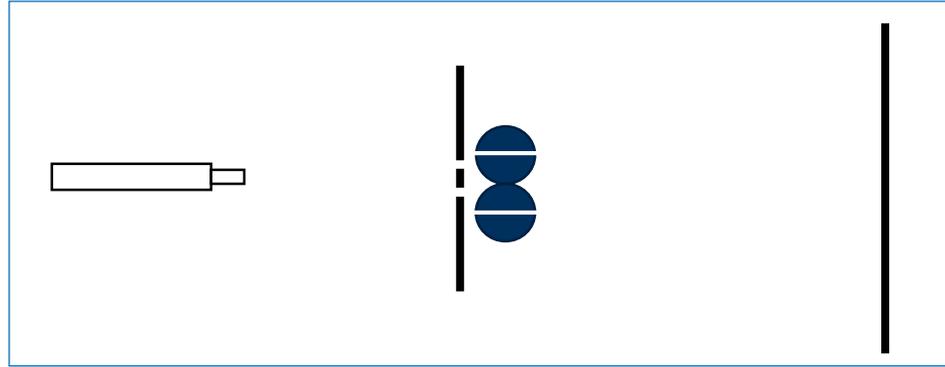
Für das Photon gibt es **klassisch** zwei Möglichkeiten:

- Photon geht durch Spalt 1
- Photon geht durch Spalt 2

In der Quantenphysik gibt es noch eine dritte Möglichkeit:

- Die **Überlagerung/Superposition** aus beiden klassischen Möglichkeiten

Der Quantenradierer am Doppelspalt (1)



Filter 1: 90°

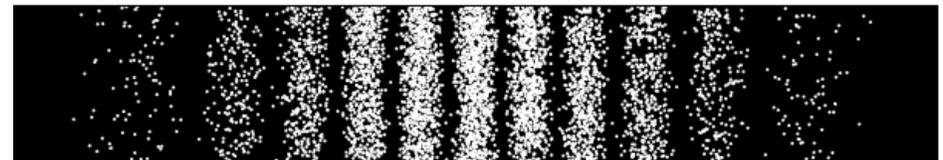
Filter 2: 90°

→ Photonen beider Spalte gleich polarisiert

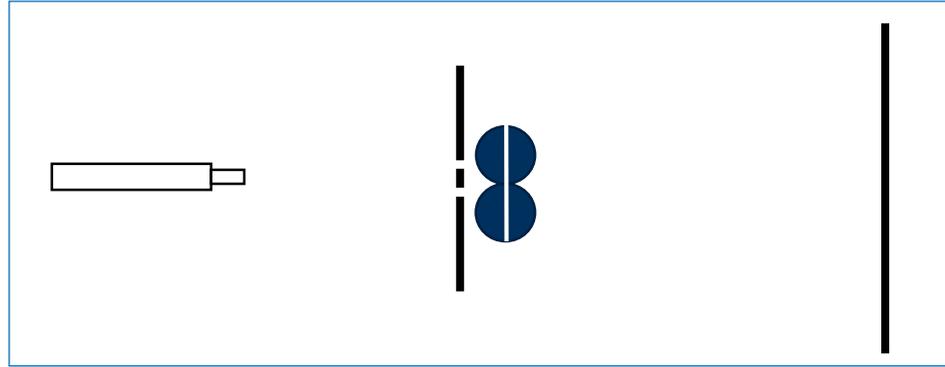
→ Ununterscheidbarkeit → Superposition beider Zustände

Es ist nicht möglich zu bestimmen, ob das Photon durch den rechten oder den linken Spalt gelaufen ist

→ **Interferenzmuster eines Doppelspalts**



Der Quantenradierer am Doppelspalt (2)



Filter 1: 0°

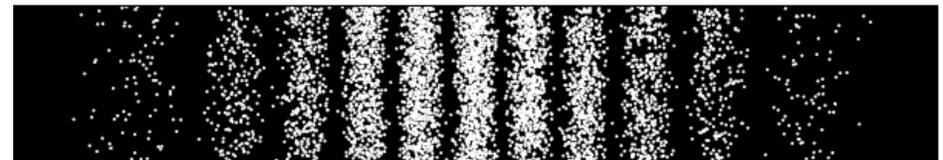
Filter 2: 0°

→ Photonen beider Spalte gleich polarisiert

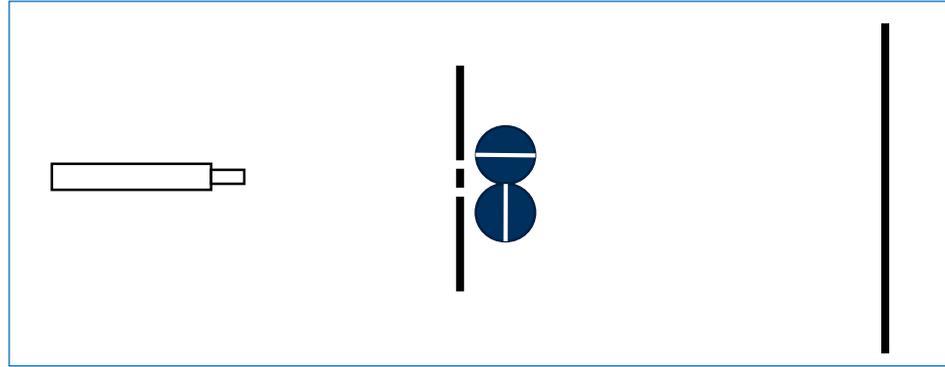
→ Ununterscheidbarkeit → Superposition beider Zustände

Es ist nicht möglich zu bestimmen, ob das Photon durch den rechten oder den linken Spalt gelaufen ist

→ **Interferenzmuster eines Doppelspalts**



Der Quantenradierer am Doppelspalt (3)



Filter 1: 90°

Filter 2: 0°

→ Photonen beider Spalte unterschiedlich, senkrecht zueinander polarisiert

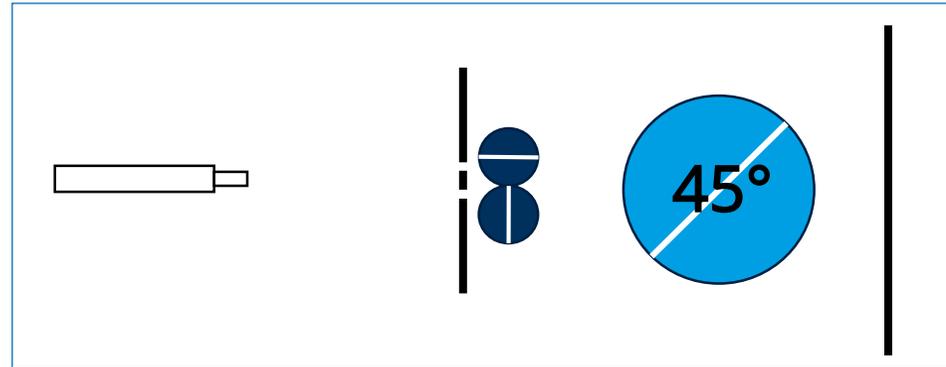
→ Unterscheidbarkeit

Es wäre grundsätzlich möglich zu bestimmen, ob das Photon durch den rechten oder den linken Spalt gelaufen ist

→ **Beugungsbild eines Einfachspalts**



Der Quantenradierer am Doppelspalt (4)



Filter 1: 90°

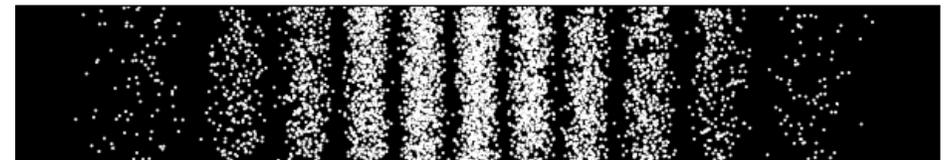
Filter 2: 0°

→ Photonen beider Spalte unterschiedlich, senkrecht zueinander polarisiert
 → Unterscheidbarkeit

→ Auf 45° eingestellter Polfilter „löscht“ Wegmarkierung wieder

→ Danach wieder Ununterscheidbarkeit → Superposition beider Zustände

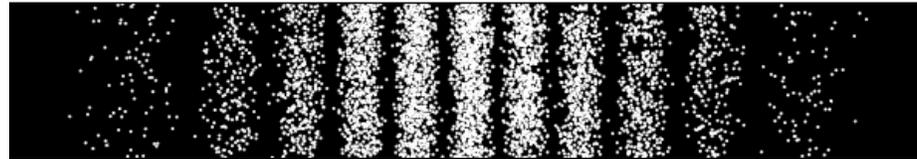
→ **Interferenzmuster eines Doppelspalts**



Der Quantenradierer am Doppelspalt (5)

- Photonen beider Spalte parallel zueinander polarisiert
 - Ununterscheidbarkeit → Superposition
 - „Welcher-Weg-Information“ nicht messbar

- **Interferenz**



- Photonen beider Spalte senkrecht zueinander polarisiert
 - Unterscheidbarkeit
 - „Welcher-Weg-Information“ messbar

- **Keine Interferenz**



Wesenszüge der Quantenphysik 2

Komplementarität

- **Interferenz** und **Unterscheidbarkeit** der Wege schließen sich aus
- Bereits nur die Möglichkeit die Quantenobjekte durch einen Messprozess unterscheiden zu können, beeinflusst das Versuchsergebnis.

(frei nach Küblbeck und Müller, 2002)

Wesenszüge der Quantenphysik **Zusammenfassung**

Fähigkeit zur Interferenz

- Auch **einzelne Quantenobjekte** besitzen die Fähigkeit zur Interferenz

Komplementarität

- **Interferenz** und **Unterscheidbarkeit** der Wege schließen sich aus
 - Bereits nur die Möglichkeit die Quantenobjekte durch einen Messprozess unterscheiden zu können, beeinflusst das Versuchsergebnis.

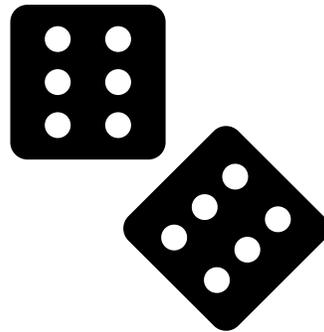
(frei nach Küblbeck und Müller, 2002)

Determinismus

Stellt euch vor, ihr werft einen Würfel.

Ist die geworfene Augenzahl wirklich zufällig?

Also kann man sie unter keinen Umständen vorhersagen?



Think-Pair-Share: 3 + 2 + 5 min

Determinismus

Die klassische Physik ist **deterministisch**.

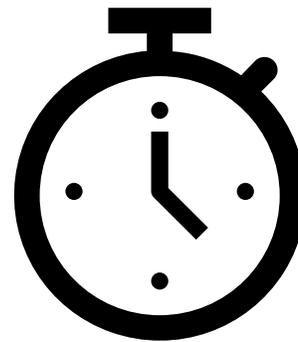
Bei **ausreichender Kenntnis** der Anfangs- und Versuchsbedingungen, ist der Zustand des Systems theoretisch zu späteren Zeiten berechenbar.

Warum erscheint uns das Losen der Lottozahlen oder ein Würfelwurf zufällig und wir können das Ergebnis nicht vorhersagen?

Das Doppelspaltexperiment mit Einzelphotonen

Aufgabe:

Erarbeitet euch selbstständig mit dem Simulationsexperiment zum Doppelspalt mit Einzelphotonen den statistischen Charakter der Quantenphysik. Nutzt dazu das Arbeitsblatt.



Zeit: 15 min

doppelspalt.quantensimulation.de

Statistischer Charakter

1 Photon



2 Photonen



3 Photonen



Statistischer Charakter

1. Es ist für jedes einzeln betrachtete Photon **nicht vorhersagbar**, wo dieses nach Durchgang durch den Doppelspalt auf dem Schirm auftreffen wird.
2. 100 Photonen treffen breit gestreut auf dem Schirm auf. Bei weiteren 100 Photonen, die den Doppelspalt durchlaufen, lassen sich langsam Bereiche auf dem Schirm erkennen, bei denen die Wahrscheinlichkeit für ein auftreffendes Photon scheinbar höher ist, als an anderen Stellen. Bei mehreren Tausend Photonen bildet sich auf dem Schirm eine Wahrscheinlichkeitsverteilung aus. Es lassen sich **Wahrscheinlichkeitsaussagen** für das Verhalten von Photonen treffen.

(Küblbeck und Müller, 2002)

Statistischer Charakter

Wiederholt noch einmal das Experiment mit...

1 Photon,

10 Photonen,

100 Photonen,

1000 Photonen,

...und vergleicht nach jedem Schritt euer Schirmbild mit einer anderen Gruppe

Statistischer Charakter

Einzelne Photonen:

Keine Vorhersage des Ortes auf dem Schirm möglich. Der Ort ist echt zufällig/indeterministisch.

Auch bei Wiederholung des Experiments, kommen die einzelnen Photonen immer wieder an neuen, zufälligen Orten auf dem Schirm auf.

Sehr viele gleichartige Photonen (Ensemble):

Durch das Gesetz der Großen Zahlen ergibt sich bei vielen Objekten immer wieder eine reproduzierbare Wahrscheinlichkeitsverteilung.

Einzelereignisse sind immer noch nicht vorhersagbar, aber es sind statistische Aussagen möglich.

(Küblbeck und Müller, 2002)

Statistischer Charakter

Beschreibe den Zusammenhang zwischen dem Histogramm und dem theoretischen Verlauf.

Je mehr Photonen durch den Versuchsaufbau gesendet werden, desto besser nähert sich das Experiment an den theoretischen Verlauf an.

(→ Gesetz der Großen Zahlen)

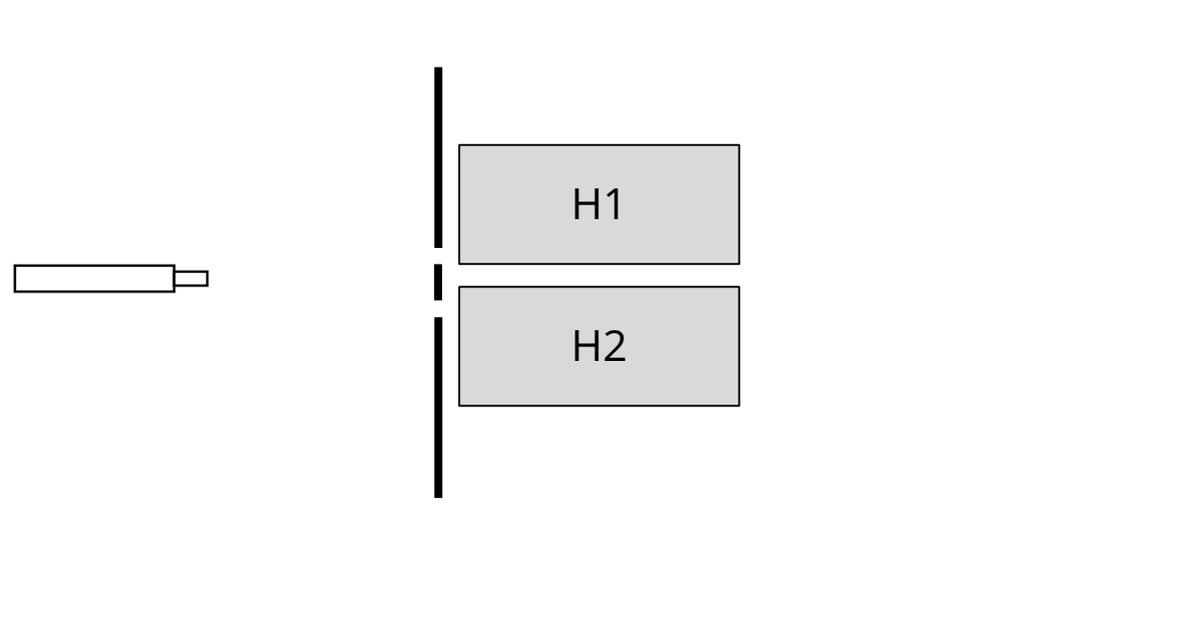
Wesenszüge der Quantenphysik 3

Statistischer Charakter

- **Einzelereignisse** sind in der Quantenphysik **zufällig/indeterministisch**, also lassen sich auch bei immer gleichen Bedingungen **nicht vorhersagen**.
- **Sehr viele** Quantenobjekte (**Ensemble**) verhalten sich nach einer **reproduzierbaren/deterministischen Wahrscheinlichkeitsverteilung**.

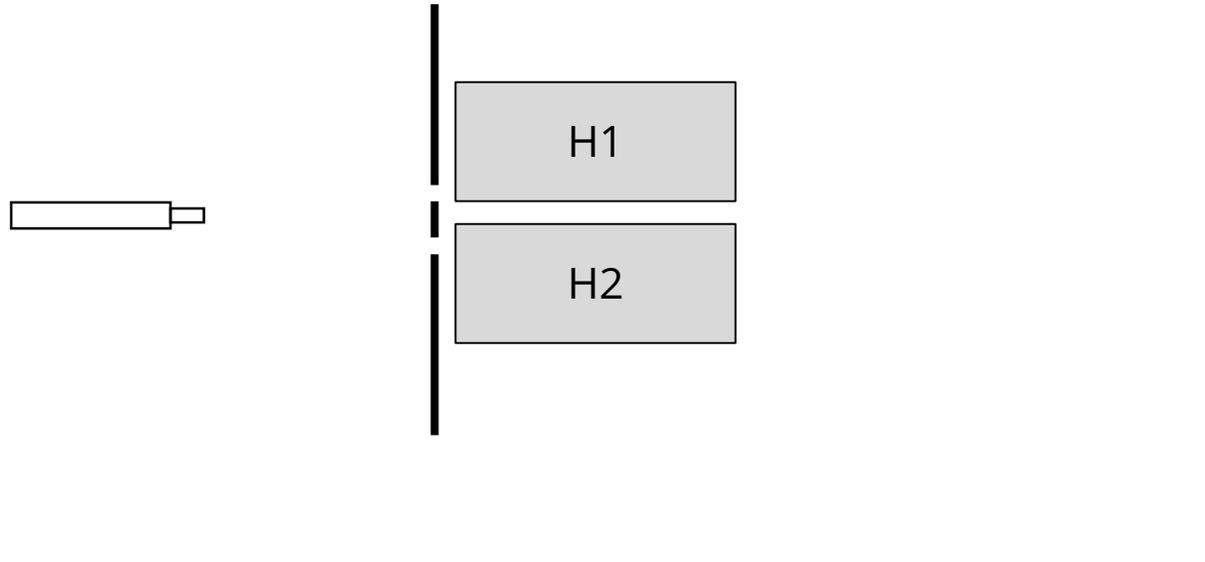
(frei nach Küblbeck und Müller, 2002)

Eindeutige Messergebnisse



Messprozess bezüglich des Orts in den Hohlräumen H1/H2

Eindeutige Messergebnisse



- Nie sprechen beide Detektoren in H1 und in H2 an
- Nie spricht keiner der Detektoren in H1 und in H2 an
→ Es spricht nur **entweder** der Detektor in H1 **oder** in H2 an

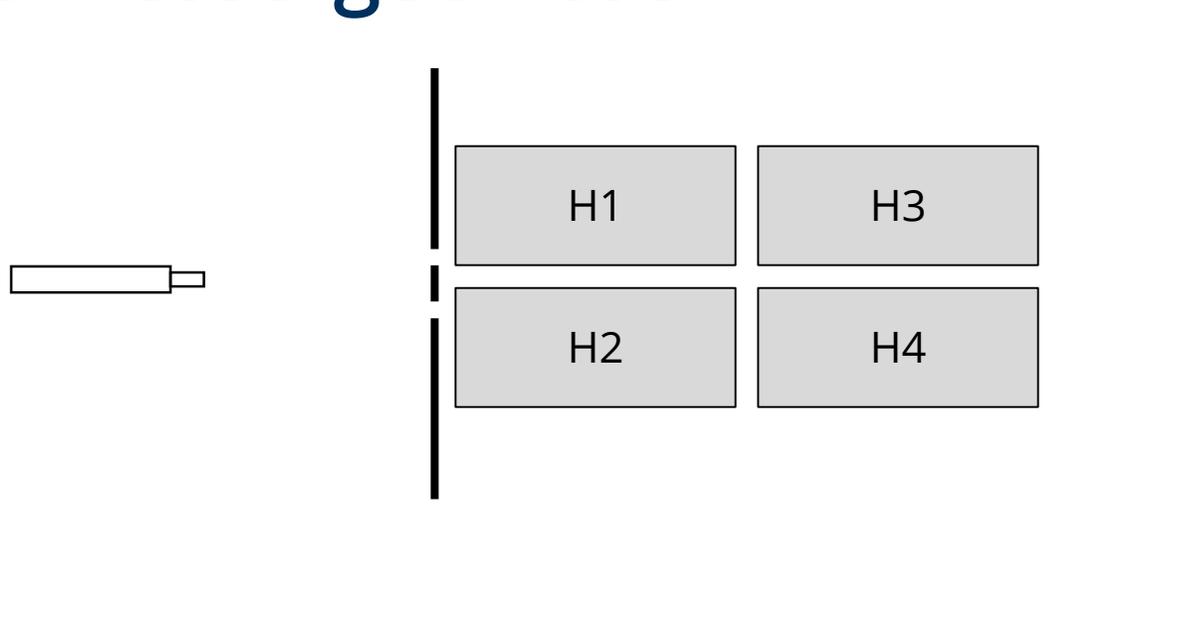
Wesenszüge der Quantenphysik 4

Eindeutige Messergebnisse

- Auch wenn die Quantenphysik im Allgemeinen indeterministisch ist, erhält man durch einen **Messprozess immer ein eindeutiges Ergebnis.**

(frei nach Küblbeck und Müller, 2002)

Eindeutige Messergebnisse



- Spricht Detektor in H1 an, spricht auch Detektor in H3 an
- Spricht Detektor in H2 an, spricht auch Detektor in H4 an

→ Gleiches Ergebnis der Ortsmessung auch bei wiederholtem Messprozess

Wesenszüge der Quantenphysik 4

Eindeutige Messergebnisse

- Auch wenn die Quantenphysik im Allgemeinen indeterministisch ist, erhält man durch einen **Messprozess immer ein eindeutiges Ergebnis.**

Der **Messprozess ist aktiv**, also erzeugt das **Messergebnis erst**, indem er das **Quantenobjekt auf diese Eigenschaft präpariert**. Dadurch wird die **Superposition aufgelöst**.

Ein wiederholter Messprozess bezüglich der gleichen Eigenschaft, ergibt somit auch wieder das gleiche Messergebnis.

(frei nach Küblbeck und Müller, 2002)

Quellenverzeichnis

Küblbeck, J., & Müller, R. (2002). *Die Wesenszüge der Quantenphysik Modelle, Bilder und Experimente* (2., überarbeitete Auflage). Aulis.