

Alexander Schuster

Technische Universität Dresden

Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden

Quantenphysik

Doppelspaltexperiment und quantenphysikalisches Weltbild

Dresden, 2024

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)

Wesenszüge der Quantenphysik 3

Statistischer Charakter

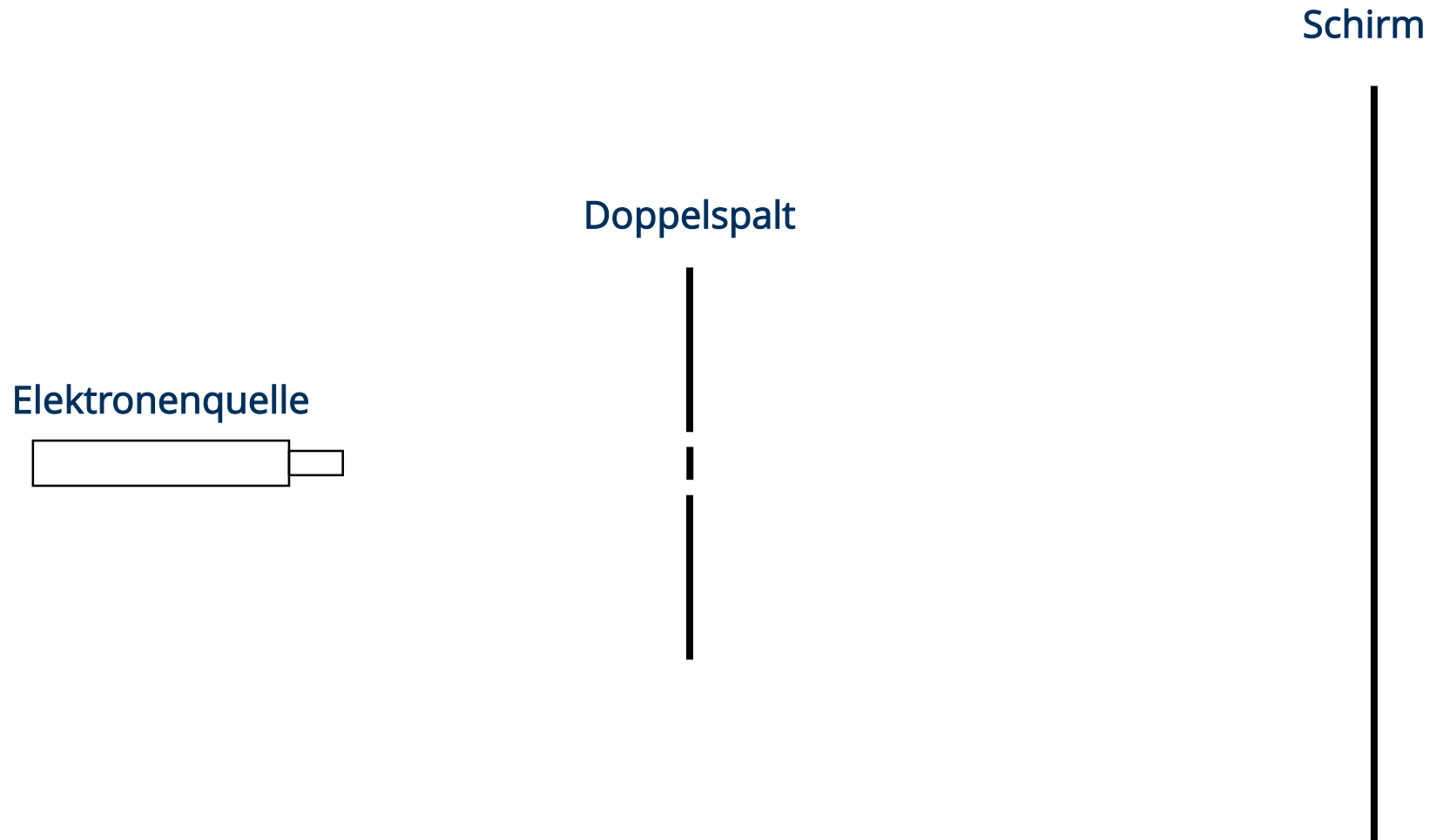
- **Einzelereignisse** sind in der Quantenphysik **zufällig/indeterministisch**, also lassen sich auch bei immer gleichen Bedingungen **nicht vorhersagen**.
- **Sehr viele** Quantenobjekte (**Ensemble**) verhalten sich nach einer **reproduzierbaren/deterministischen Wahrscheinlichkeitsverteilung**.

Eindeutige Messergebnisse

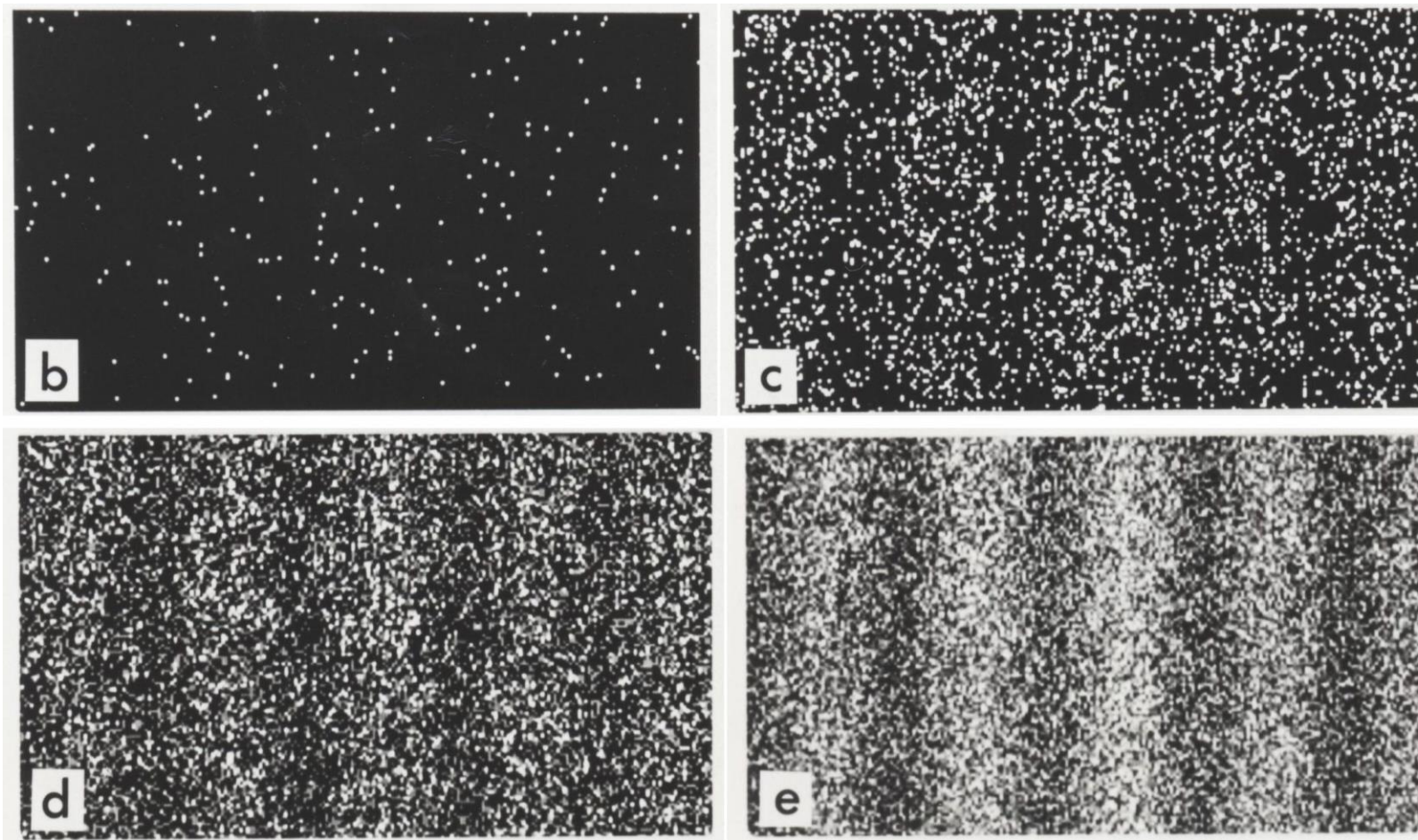
- Auch wenn die Quantenphysik im Allgemeinen indeterministisch ist, erhält man durch einen **Messprozess immer ein eindeutiges Ergebnis**.

(frei nach Küblbeck und Müller, 2002)

Das Doppelspaltexperiment mit Elektronen



Das Doppelspaltexperiment mit Elektronen



b: $N=200$

c: $N=6000$

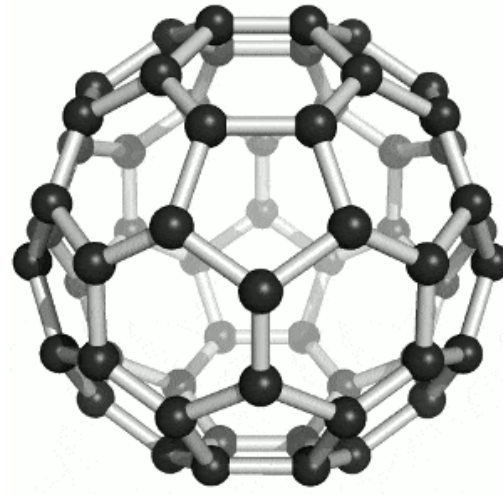
d: $N=40.000$

e: $N=140.000$

(Dr. Tonomura and Belsazar, o. D.)

Interferenz mit Quantenobjekten

Masselose Quantenobjekte	Massebehaftete Quantenobjekte
Photonen	Elektronen
	Neutronen
	Fullerene ($d \approx 1\text{nm}$)
	...



(Sponk, o. D.)

Interferenz mit Elektronen

Fragen:

- Wie kommt es, dass auch massebehaftete Quantenobjekte wie Elektronen Wellenphänomene, wie Interferenz zeigen können?
- Wie kann man die Wahrscheinlichkeit für das Verhalten eines Quantenobjektes berechnen?

Die quantenmechanische Zustandsfunktion

$$\psi(\vec{r}, t)$$

- Gibt quantenmechanischen Zustand eines Quantenobjektes an
- Funktionswert nicht messbar, Zustandsfunktion ist „mathematisches Tool“
- Betragsquadrat der Zustandsfunktion berechnet Wahrscheinlichkeit

Die quantenmechanische Zustandsfunktion

Bsp.: Doppelspaltexperiment mit Elektronen

- Beschreibung des Zustand der Elektronen durch Zustandsfunktion $\psi(\vec{r}, t) \rightarrow$ Gestalt einer Wellenfunktion
 - \rightarrow Wesenszug 1: **Fähigkeit zur Interferenz**
- Funktion von Ort und Zeit
- Betragsquadrat berechnet die Wahrscheinlichkeit ein Elektron zur Zeit t am Ort x am Schirm nachzuweisen

$$P(x) = |\psi(x, t)|^2$$

\rightarrow Wesenszug 3: **Statistischer Charakter**

Die quantenmechanische Zustandsfunktion

Bsp.: Doppelspaltexperiment mit Elektronen

- Superposition der Zustände entspricht Addition der Wellenfunktionen

$$\psi_{\text{Superposition}} = \psi_{\text{rechts}} + \psi_{\text{links}}$$

- Zeitliche Entwicklung ist durch Schrödingergleichung determiniert
- Messung an Quantenobjekt führt zu „Kollaps der Wellenfunktion“
 - Immer eindeutiges Messergebnis
 - Wesenszug 4: **Eindeutige Messergebnisse**
 - Ein Zustand kann zu verschiedenen Messergebnissen führen
 - Wesenszug 3: **Statistischer Charakter**

Determinismus / Indeterminismus

Einzelereignisse:

- in der Regel zufällig/indeterministisch
- z. B. keine Vorhersage möglich, wo ein einzelnes Photon auf Schirm auftritt

Ausnahme:

- mehrfacher Messprozess bezüglich der gleichen Eigenschaft

Ensembleereignisse:

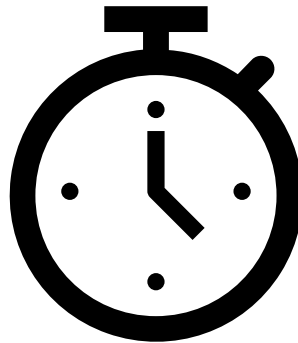
- bei vielen Objekte Wahrscheinlichkeitsaussagen möglich
(Gesetz der großen Zahlen), **Determinierte Zufallsverteilung**

Die quantenmechanische Zustandsfunktion

Aufgabe:

„Die Ergebnisse von Experimenten mit Quantenobjekten sind zufällig, aber nicht beliebig.“

Erläutere die Aussage an einem Beispiel.



Zeit: 10 min

Das quantenphysikalische Weltbild

Wie wir gesehen haben ist Quantenphysik ganz anders als wir es aus dem Alltag kennen....

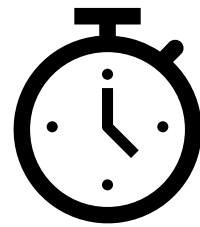
Aber widerspricht die Quantenphysik unserem Alltagsverständnis?

Das quantenphysikalische Weltbild

Realität, Kausalität

Aufgabe:

Diskutiert und nehmt begründet mit eurem Wissen über Quantenphysik Stellung zu der gegebenen Definition, inwiefern diese auch in der Quantenphysik ihre Gültigkeit behält oder nicht.



Zeit: 20 min

Realität

Definition Realität:

Objekte und ihre Eigenschaften, zusammen mit Werten existieren unabhängig von Beobachtungen und Messungen.

- Quantenphysik:
 - Quantenobjekte existieren
 - i.d.R. keine Existenz von Werten für Eigenschaften ohne Messprozess
 - Messprozess erzeugt Eigenschaft
 - Existenz von Zustandsüberlagerungen (Superpositionen)

Kausalität

Definition Kausalität:

Jeder Wirkung lässt sich eindeutig eine Ursache zuordnen (**Determinismus**).

- Quantenphysik:
 - Einzelereignisse sind i.d.R. **indeterministisch**
 - Bei Ensemble sind Wahrscheinlichkeitsaussagen möglich
- **Aber:** Determinierte Zufallsverteilung,

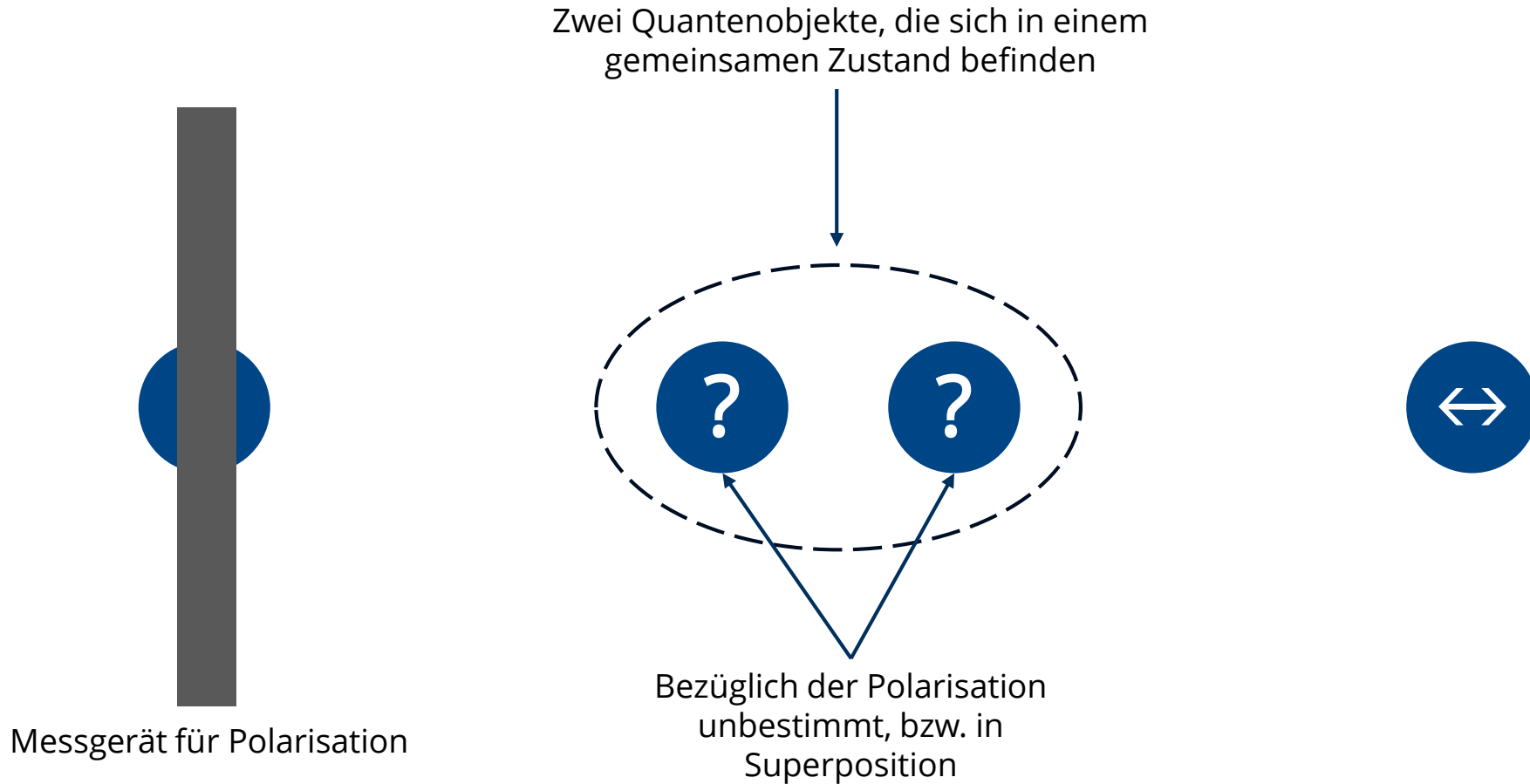
Lokalität

Definition Lokalität:

Räumlich getrennte Systeme haben keinen Einfluss aufeinander. Deren Physik kann lokal beschrieben werden. Eine Messung an dem einen System hat keinen Einfluss auf das andere System.

- Quantenphysik:
 - Existenz von Zuständen von Objekten, die nur gemeinsam beschrieben werden können, auch bei räumlicher Trennung
- Verschränkung




Das EPR-Experiment



Verschränkung

- Zwei oder mehr, auch möglicherweise weit voneinander entfernte Quantenobjekte können sich in einen **gemeinsamen Zustand** befinden
 - Messprozess an einem Objekt führt auch zur Auflösung der Superposition bei anderem Objekt
- Ohne Zeitverzug, über beliebige Distanzen
- Instantaner Kollaps der gemeinsamen Zustandsfunktion

Quantenphysik ist...

Lokalität	Realität	Kausalität
 <ul style="list-style-type: none">• Verschränkung	 <ul style="list-style-type: none">• Superposition	 <ul style="list-style-type: none">• Superposition• i.d.R. indeterministischer Messprozess

...nicht lokal-realistisch und folgt der Definition von Kausalität nicht im strengen Sinne.

Quellenverzeichnis

Sponk (o. D.) (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Buckminsterfullerene_animated.gif), *Buckminsterfullerene animated*, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode>

Tonomura & Belsazar (o. D.). (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Double-slit_experiment_results_Tanamura_four.jpg), *Double-slit experiment results Tanamura four*, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode>