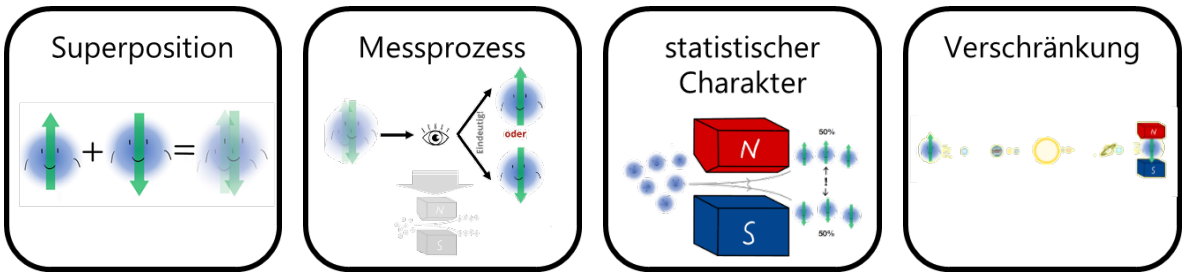
Die Wesenszüge der Quantenphysik

Was macht die Quantenphysik aus?

Als Wesenszüge der Quantenphysik bezeichnen wir vier besondere Phänomene, die

- in der Quantenphysik eine zentrale Rolle spielen und
- es in der klassischen Physik nicht geben kann.



➔ *Diese vier Phänomene benötigen wir, um die Funktionsweise von Quantencomputern verstehen zu können.*

Erkunde mithilfe der Simulation die Wesenszüge „Messprozess“, „statistischer Charakter“ und „Verschränkung“.

Wesenszug 1:
Superposition

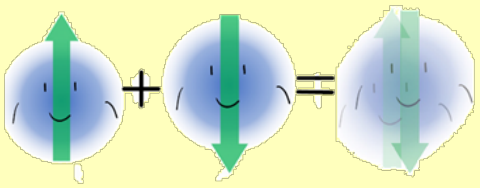
***Definition:* Superposition**

Kann sich ein Quantenobjekt in einem der beiden (sich klassisch ausschließenden) Zuständen A oder B befinden, dann kann es sich ebenfalls in einer quantenphysikalischen Überlagerung („Superposition“) C dieser beiden Zustände befinden: C = A + B.

Beispiel:

Spin eines Elektrons:

- Spin parallel zum Magnetfeld: Zustand A
- Spin anti-parallel zum Magnetfeld: Zustand B
- Spin gleichzeitig parallel und anti-parallel zum Magnetfeld: Zustand C = A + B



Lösungen

Aufgabe I c: richtig, richtig, falsch, richtig, falsch
Aufgabe II c: falsch, falsch
Aufgabe II e: richtig, richtig
Aufgabe III d: falsch, richtig, falsch, richtig, richtig, Münze, falsch

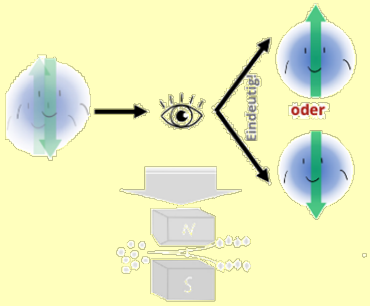
by Carsten Albert (2026), lizensiert unter CC BY-NC-SA 4.0

Wesenszug 2:
Messprozess*

***Definition:* Messprozess**

Der Messprozess in der Quantenphysik besitzt einen aktiven Charakter. Er zwingt das System, einen der möglichen Messwerte anzunehmen (Messergebnisse sind immer eindeutig) und verändert damit den Zustand des gemessenen Systems.

- Im Gegensatz zur „Messung“ in der klassischen Physik sprechen wir in der Quantenphysik vom „**Messprozess**“.
- Nach einem Messprozess befindet sich ein Quantenobjekt nicht mehr in einem Superpositionszustand („**Auflösen der Superposition**“).



*Definition vgl. LEIFIphysik (o. J.) und Kuhn et al. (2000), siehe Lehrbuch S. 26

Aufgabe I:

a. Öffne Simulation 1 (Messprozess).

b. Erzeuge mehrfach ein **einzelnes Elektron** und lasse es durch die Stern-Gerlach-Apparatur fliegen. Notiere deine Beobachtungen.

Hinweis: Die Stern-Gerlach-Apparatur ist der Versuchsaufbau aus zwei s. g. magnetischen *Polschuhen* - einem „spitzen“ Nordpol und einem „flachen“ Südpol.

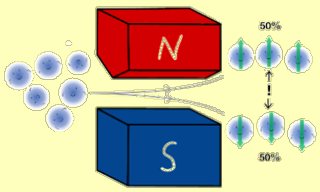
c. Beantworte folgende Fragen:

Aussage	Entscheidung
Im Experiment ist der Stern-Gerlach-Apparat ein Messgerät für den Elektronenspin.	☒ richtig ☐ falsch
Das Elektron befindet sich vor dem Durchlaufen des Stern-Gerlach-Apparates in einem Superpositionszustand.	☒ richtig ☐ falsch
Das Elektron befindet sich nach dem Durchlaufen des Stern-Gerlach-Apparates in einem Superpositionszustand.	☐ richtig ☒ falsch
Das Messergebnis ist in jedem Fall eindeutig.	☒ richtig ☐ falsch
Das einzelne Messergebnis kann sicher vorhergesagt werden.	☐ richtig ☒ falsch

Wesenszug 3:
Statistischer Charakter*

***Definition:* statistischer Charakter**

In der Quantenphysik können Einzelereignisse im Allgemeinen nicht vorhergesagt werden, es können nur Wahrscheinlichkeiten für Einzelereignisse angegeben werden. Bei vielen Wiederholungen ergibt sich damit jedoch eine Verteilung, die - bis auf statistische Schwankungen - reproduzierbar ist.



Einzel-Prinzip:

Wenn wir den Zustand eines Quantenobjektes kennen (z. B. durch vorherige Präparation), ist es uns möglich, ***Wahrscheinlichkeiten*** für die möglichen Ergebnisse eines Messprozesses an diesem Quantenobjekt anzugeben.

Ensemble-Prinzip:

Die häufige Wiederholung eines Messprozesses an sehr vielen identisch präparierten Quantenobjekten („Ensemble“) ergibt eine, bis auf statistische Schwankungen, reproduzierbare ***Verteilung*** der Messergebnisse.

*Definition vgl. LEIFIphysik (o. J.), siehe Lehrbuch S. 28

Aufgabe II:

a. Öffne Simulation 2 (Statistischer Charakter).

b. Erzeuge mehrfach (durch zehn-maliges Klicken des Buttons „Elektron erzeugen“) **zehn Elektronen** und lasse sie durch die Stern-Gerlach-Apparatur fliegen.
Notiere deine Beobachtungen auf dem Zähler:

Versuch	**Anzahl Elektronen oben** (Spin up)	**Anzahl Elektronen unten** (Spin down)
1		
2		
3		
4		

c. Beantworte auf Basis deiner Beobachtungen folgende Fragen:

Aussage	**Entscheidung**
Das Messergebnis ist für jedes einzelne Elektron vorhersagbar.	☐ richtig ☒ falsch
Die Verteilung (Anzahl der Elektronen mit Spin up/down) kann vorhergesagt werden.	☐ richtig ☒ falsch

d. Erzeuge mehrfach **100 Elektronen** auf einmal und lasse es durch die Stern-Gerlach-Apparatur fliegen.
Notiere deine Beobachtungen auf dem Zähler:

Versuch	**Anzahl Elektronen oben** (Spin up)	**Anzahl Elektronen unten** (Spin down)
1		
2		
3		
4		

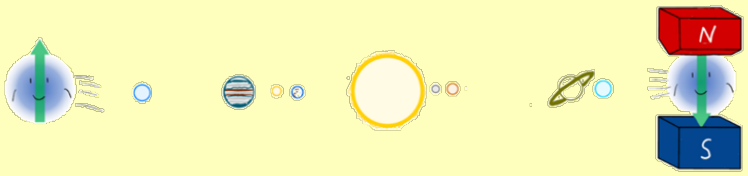
e. Beantworte auf Basis deiner Beobachtungen folgende Fragen:

Aussage	**Entscheidung**
Die Verteilung (Anzahl der Elektronen mit Spin up/down) kann bis auf statistische Schwankungen vorhergesagt werden.	☒ richtig ☐ falsch
Die Wahrscheinlichkeit für ein bestimmtes Messergebnis ist für jedes einzelne Elektron vorhersagbar. Das konkrete Ergebnis aber nicht.	☒ richtig ☐ falsch

Wesenszug 4:
Verschränkung* *(anhand des EPR-Experimentes)*

***Definition:* Verschränkung**

Zwei verschränkte Quantenobjekte bilden ein unteilbares Ganzes. Auch über große Entfernungen hinweg legt der Messprozess an einem Quantenobjekt auch den Zustand des anderen Quantenobjektes unverzüglich fest.



Experimentell kann man das z. B. anhand des ***„EPR-Experimentes“*** feststellen. Zwei verschränkte Elektronen („Cooper-Paar“) befinden sich in einem gemeinsamen Superpositionszustand. Wird eines der beiden Elektronen gemessen, steht unverzüglich auch der Spin des anderen Elektrons fest - er ist immer genau entgegengesetzt.

*Definition vgl. Quizlet (2023), siehe Lehrbuch S. 31

Aufgabe III:

a. Öffne Simulation 3 (Verschränkung/EPR) und führe eine vereinfachte Simulation des s. g. “**EPR-Experimentes“** durch, für dessen tatsächliche Umsetzung es 2022 den Physik-Nobelpreis gab.

b. Cooper-Paare sind zwei miteinander **verschränkte** (gekoppelte) Elektronen.
Lasse solche Cooper-Paare durch Klick auf den entsprechenden Button auseinanderfliegen.

c. Miss die Spins der jeweiligen Elektronen, indem du (per Drag&Drop) an verschiedene Stellen links und rechts Stern-Gerlach-Apparate in die Flugbahn stellst:

Position links	Position rechts	Elektronenspin links	Messzeit-punkt links	Elektronenspin rechts	Messzeit-punkt rechts
Innen	--				
Außen	--				
--	Innen				
--	Außen				
Innen	Außen				
Außen	Innen				
Mitte	Mitte				
Innen	Mitte				
Mitte	Innen				
Außen	Mitte				
Mitte	Außen				

d. Beantworte auf Basis deiner Beobachtungen an den verschränkten Elektronen folgende Fragen:

Aussage	Entscheidung
Die Verteilung der Messergebnisse (bei welchem Elektron wird welcher Spin gemessen) für jedes einzelne Elektronpaar ist vorhersagbar.	☐ richtig ☒ falsch
Steht der Spin des einen Elektrons fest, dann steht auch der Spin des anderen Elektrons fest.	☒ richtig ☐ falsch
Zwischen der Festlegung des linken und des rechten Spins vergeht immer eine gewisse Zeit.	☐ richtig ☒ falsch
Die Spins der beiden Elektronen sind immer entgegengesetzt.	☒ richtig ☐ falsch
Sobald eines der Elektronen gemessen wurde, steht das Messergebnis des anderen Elektrons fest – egal wo und wann man es dann misst.	☒ richtig ☐ falsch
Verschränkung bezeichnet man auch als „perfekte Quanten-Korrelation“. Welchem Korrelationstyp entspricht das Phänomen?	☐ Handschuh ☒ Münze
Durch Verschränkung können Nachrichten mit Überlichtgeschwindigkeit übertragen werden.	☐ richtig ☒ falsch