Technische Universität Dresden

Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden

ctd.qmat
Complexity, Topology and Dynamics in Quantum Matter

QUBITS4PUPILS
QUANTENPHYSIK MACHT SCHULE

Quantenphysik

Von Schrödingers Katze zum Quantencomputer…

Doppelstunde 1

Literatur- und Quellenangaben sind im Lehrbuch zum Kurs zu finden!

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

Hinweis:

Zum Schutz von Urheberrechten sind einige Abbildungen in dieser Datei entfernt. An der entsprechenden Stelle wird mit einem Platzhalter auf den Inhalt und ggf. einen externen Link hingewiesen.

Eine neue Version mit lizenzfreien Abbildungen wird in Zukunft veröffentlicht.

MENTIMETER

www.bit.ly/menti-ds1

Quantencomputer: Tagesschau



https://www.youtube.com/watch?v=PSshTCmTrDo

Quantencomputer: Funktionsweise (Fraunhofer-Gesellschaft)

Vorschaubild Video (Link siehe unten)

https://www.youtube.com/watch?v=3s2bPNzOlFM

Zwischenthema: Primfaktorzerlegung

Eine Primzahl ist eine natürliche Zahl

- größer als 1,
- die nur durch sich selbst und durch 1 ohne Rest teilbar ist.

Ein Gesetz der Mathematik besagt, dass sich jede natürliche Zahl größer als 1, die selbst keine Primzahl ist, als Produkt von mindestens zwei Primzahlen ausdrücken lässt.

Arbeitsheft S. 1

Zeit: 10 Minuten

INFO

Primfaktorzerlegung und Shor-Algorithmus

Ein Beispiel für ein mathematisches Problem, das mit einem Quantencomputer besser/schneller gelöst werden kann, als mit einem klassischen Computer, ist die Zerlegung von Zahlen in ihre Primfaktoren.

Das Multiplizieren von zwei großen Primzahlen, z. B. 131.071 und 524.287, ist kein Problem. Die Umkehroperation, also das Finden dieser beiden Primfaktoren, ist aber extrem aufwendig. Wir haben kein schnelles Rechenverfahren dafür, sondern müssen nacheinander alle Primzahlen durchprobieren.

$$131.071 \cdot 524.287 = \quad ? \qquad \textbf{leicht}$$
$$? \quad \cdot \quad ? \quad = 68.718.821.377 \qquad \textbf{schwer}$$

1994 stellte Peter Shor einen Algorithmus, vor, mit dessen Hilfe man sehr effizient große Zahlen in wenigen Minuten mit einem Quantencomputer faktorisieren kann. Weil die Daten im Internet (Online-Banking, PayPal, E-Mails, etc.) mithilfe von Primzahlen verschlüsselt werden, wird die Entwicklung von Quantencomputern sehr genau beobachtet. Funktionierende Quantencomputer knacken jede normale (auf Primzahlen beruhende) Verschlüsselung in Minuten – darum werden neue Verfahren zur abhörsicheren Kommunikation benötigt.

Quantencomputer (Motivation)

Quantencomputer…

- nutzen keine elektrischen Schaltkreise, sondern Eigenschaften von **Quantenobjekten**.
- nutzen statt Bits s. g. „**Qubits**“ (Quanten-Bits) als Recheneinheiten (mit denen im Prinzip **mehrere Rechnungen gleichzeitig** ausgeführt werden können).
- können bestimmte Probleme der Informatik sehr viel **effizienter und schneller** lösen als klassische (Super-)Computer.
  Beispiel: Verschlüsselung umgehen durch effektive Primfaktorzerlegung

Ziel der nächsten Stunden:

- Phänomene der Quantenphysik kennen
- genauer Verstehen, wie ein Quantencomputer funktioniert

→ Los geht’s ☺

MENTIMETER

www.bit.ly/menti-ds1

Teilgebiete der Physik

Lies im Lehrtext Kapitel 1.1 (Seite 4 - 6) und fülle die Tabelle auf dem AB aus.

Zeit: 10 Minuten

Klassische Physik

→ Die Teilgebiete der klassischen Physik entstanden ca.

Teilgebiet	Womit beschäftigt sich das Teilgebiet?
(Newtonsche) Mechanik	Bewegungen von festen, flüssigen und gasförmigen Körpern unter dem Einfluss von Kräften, inkl. Wellenlehre und Akustik
Elektrizitätslehre und Optik	elektrische und magnetische Phänomene und das Verhalten von Licht
Wärmelehre	Energieaustausch in Form von Wärme

Moderne Physik

→ Die Teilgebiete der modernen Physik entstanden ca.

Teilgebiet	Womit beschäftigt sich das Teilgebiet?
Relativitätstheorie	Struktur von Raum und zeit
Quantenphysik	Verhalten kleinster Objekte wie Elektronen oder Atome

Teilgebiete der Physik

Hausaufgabe:

AH S. 2 Nr. 2

Technische Universität Dresden

Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden

ctd.qmat
Complexity, Topology and Dynamics in Quantum Matter

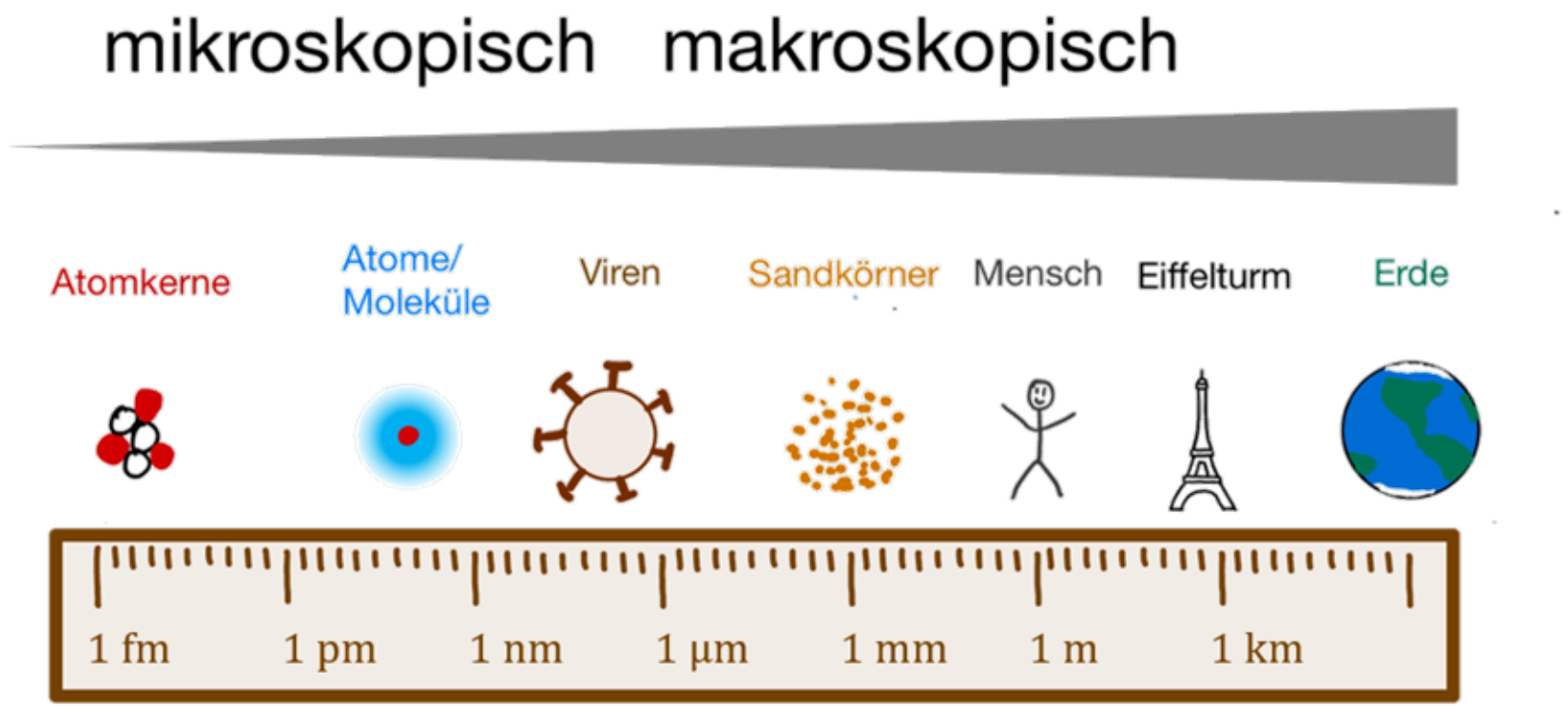
QUBITS4PUPILS
QUANTENPHYSIK MACHT SCHULE

Quantenphysik

Von Schrödingers Katze zum Quantencomputer…

Doppelstunde 2

Von der Mikro- zur Makroebene



MENTIMETER

www.bit.ly/menti-ds2

Determinismus in der klassischen Physik



https://www.youtube.com/watch?v=7HX-fF1YH3Q

Determinismus in der klassischen Physik

In der klassischen Physik gilt für alle Vorgänge und Experimente:

- **klassische Physik ist deterministisch**
  (Der aktuelle Zustand eines Systems legt den Zustand zu späteren Zeiten bereits fest.)

- **Messungen sind passiv**
  (Bei einer Messung stellt man nur eine vorher schon feststehende Eigenschaft fest.)

Quantenphysik ist anders!
Schrödingers Katze



https://www.youtube.com/watch?v=bitYXYlmT2Y

„Katze Q – Ein Quanten-Adventure“

Spielvorstellung und Idee

Carsten Albert
(Doktorand)
Didaktik der Physik TU Dresden, IFW Dresden und Exzellenzcluster ct.qmat

ct.qmat

Julius-Maximilians-Universität Würzburg

Technische Universität Dresden

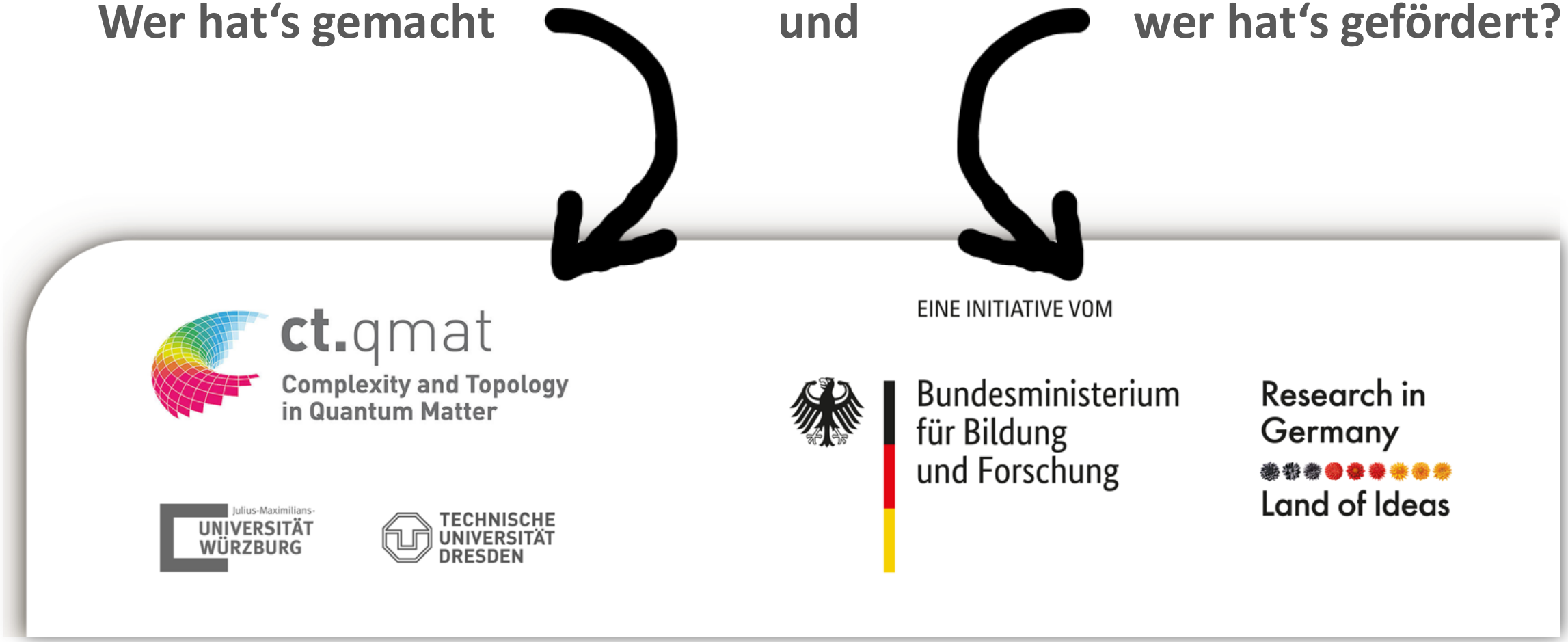
Katze Q – Ein Quanten-Adventure

- **digitales Spiel** für Handy & Tablet
- soll Kinder und Jugendliche ab 11 Jahren für Physik begeistern
- weltweiter Release am 13.10.2021 in deutscher und englischer Sprache
- **kostenlos, ohne Werbung & ohne In-App-Käufe**
- Vorbild für die App ist das bekannte Gedankenexperiment zur Quantenmechanik „**Schrödingers Katze**“ von Erwin Schrödinger (1887 – 1961);
- Ur-Enkelin und Enkel des Nobelpreisträgers haben Schirmherrschaft übernommen
- Spiele-App mit mehr **als 20 spannenden Rätseln**, die auf wissenschaftlichen Fakten der Quantenphysik basieren

Vorstellung der App

ct.qmat

Wer hat‘s gemacht und wer hat‘s gefördert?



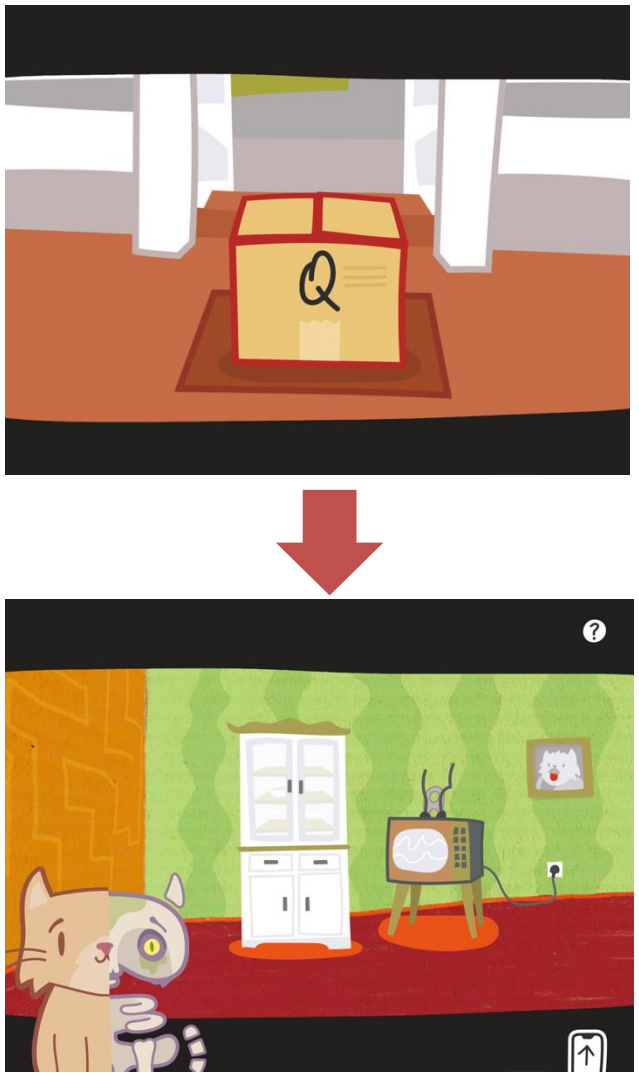
Wer hat‘s designet?

Foto beim Spielen von KatzeQ mit dem Entwickler
(Foto nicht öffentlich zugänglich)

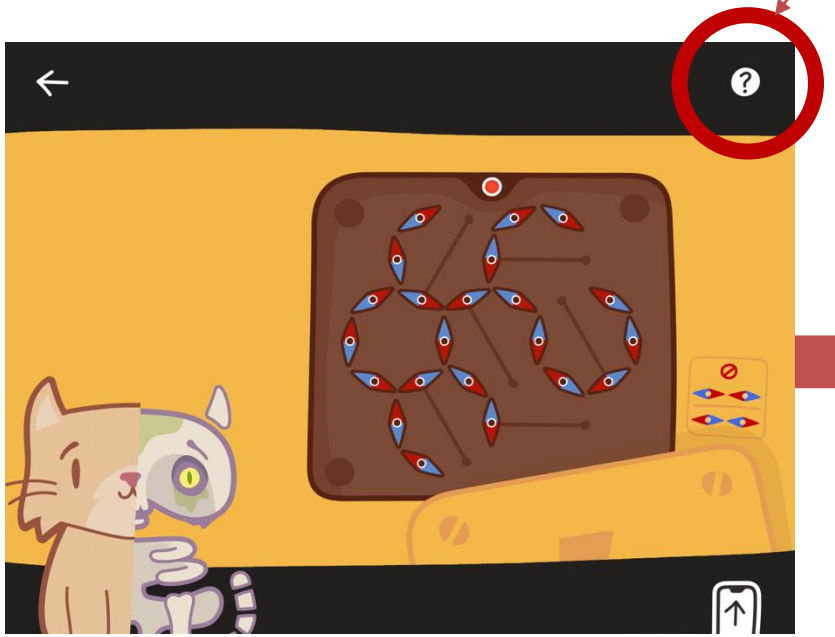
Foto Entwickler und Team von KatzeQ
(https://www.kamibox.de/bilder/katzeq/DSC02066.jpg))

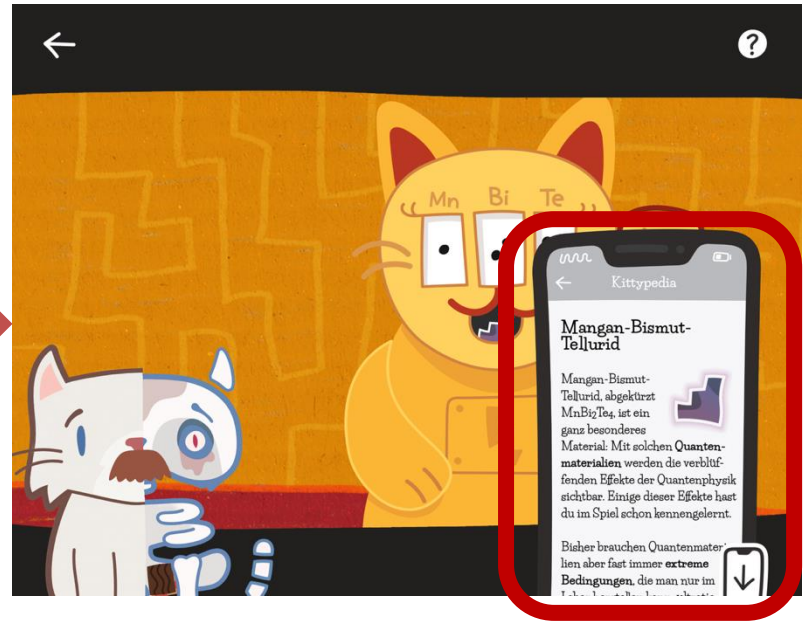
ct.qmat

Spielinhalt / Spielkonzept



Tipps zum Rätsel





Kittypedia-Artikel

Quantenphysik mit KatzeQ entdecken…

AH S. 8 Sonderaufgabe 2:

Löse das Kreuzworträtsel mithilfe der Kittypedia-Einträge vollständig.

Die schnellste Gruppe (vollständiges Kreuzworträtsel) erhält einen kleinen Preis ☺

Zeit: 60 Minuten

Technische Universität Dresden

Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden

ctd.qmat
Complexity, Topology and Dynamics in Quantum Matter

QUBITS4PUPILS
QUANTENPHYSIK MACHT SCHULE

Quantenphysik

Von Schrödingers Katze zum Quantencomputer…

Doppelstunde 3

Erläutere am Beispiel die zwei Grundprinzipien der klassischen Physik:

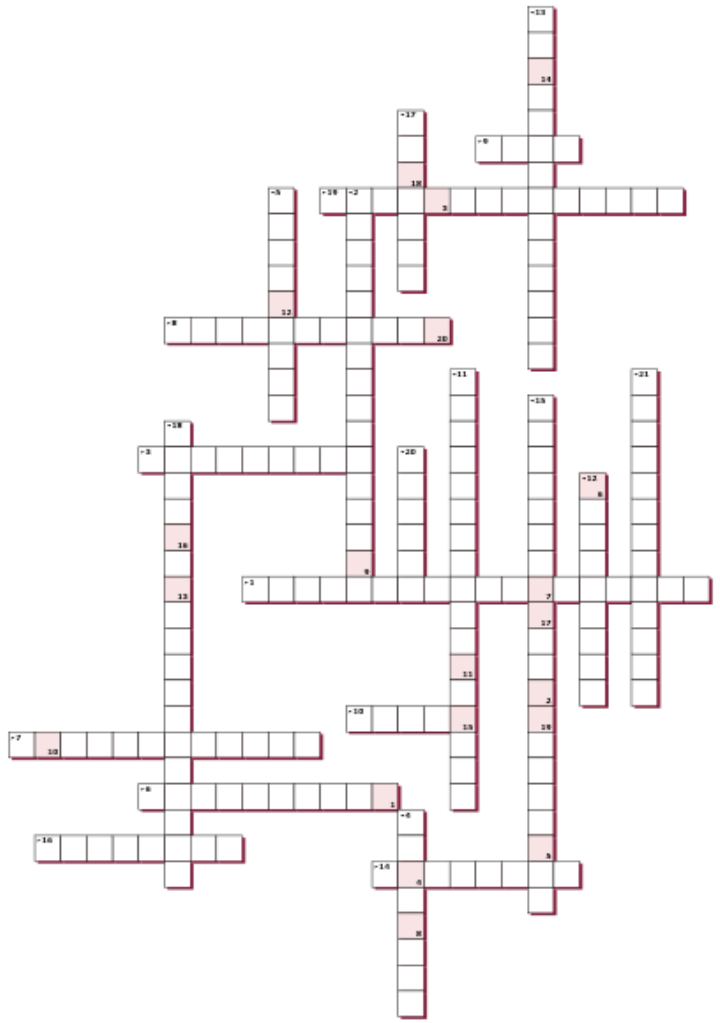


https://www.publicdomainpictures.net/pictures/340000/velka/darts-board-1588674026hec.jpg

Klassische Physik ist **deterministisch**.

Messungen haben in der klassischen Physik einen **passiven Charakter**.

Was sind die Grundprinzipien der Quantenphysik?



Quantenphysik unterscheidet sich grundsätzlich von klassischer Physik – denn die Quantenphysik ist

1	2	3	4	5	-	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Das heißt, der Ausgang eines Versuches in der Quantenphysik ist (oft) rein zufällig. Man spricht auch von „echtem Quantenzufall“.

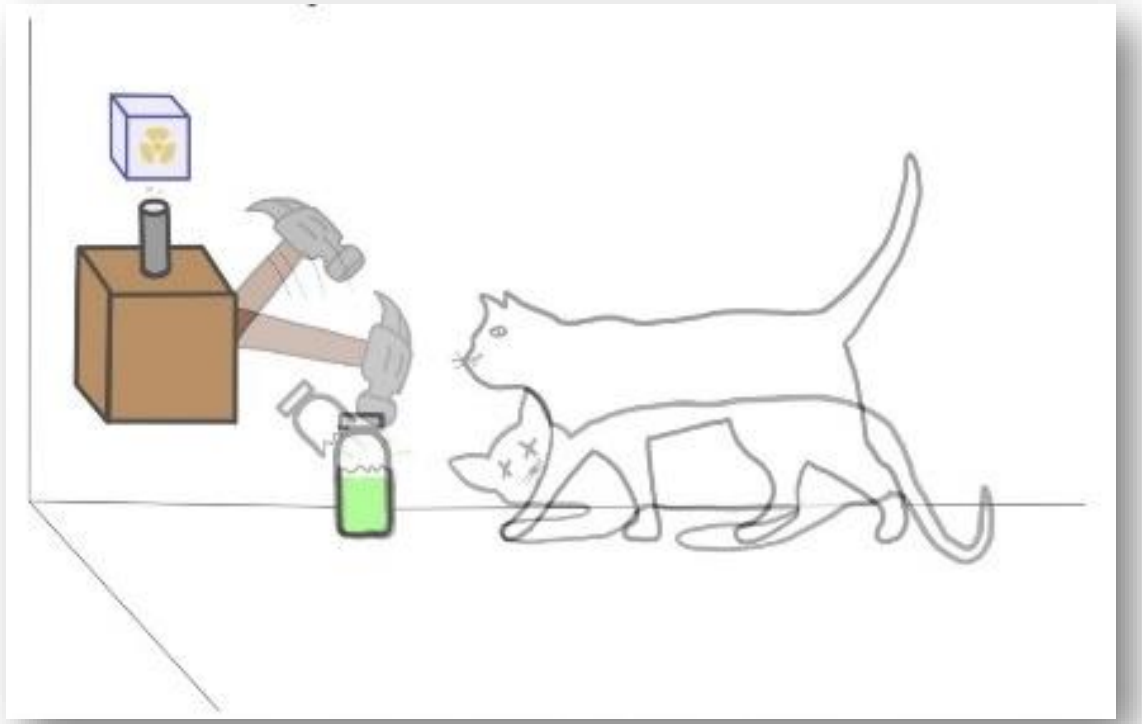
7

Quantenphysik unterscheidet sich grundsätzlich von klassischer Physik – denn die Quantenphysik ist

Das heißt, der Ausgang eines Versuches in der Quantenphysik ist rein zufällig.
Man spricht auch von “echtem Quantenzufall”

QUBITS4PUPILS
QUANTENPHYSIK MACHT SCHULE
Technische Universität Dresden
Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden
ctd.qmat
Complexity, Topology and Dynamics in Quantum Matter

Beispiel: Gedankenexperiment “Schrödingers Katze”





Paradigmenwechsel – Grundprinzipien der Quantenphysik

Erwin Schrödinger verdeutlichte die Prinzipien der Quantenphysik in seinem Gedankenexperiment **“Schrödingers Katze”** (nicht wirklich durchgeführt!).

→ Zeigt, wie unsere makroskopische Welt wäre, wenn auch hier die Grundprinzipien der Quantenphysik gelten *würden*…

Konkret ist die Idee, dass eine lebendige **Katze** zusammen mit einer s. g. **„Höllenmaschine“** in eine blickdichte Kiste eingeschlossen wird. Die Höllenmaschine besteht aus einem radioaktiven Atom, einem Detektor, einer Giftampulle und einem Hammer.

Sobald das Atom radioaktiv zerfällt -also sich verändert- schlägt der Hammer auf die Giftampulle und wird die Katze somit von der Maschine getötet. Der radioaktive Zerfall gehorcht dabei den Gesetzen der **Quantenphysik**: Man kann nicht vorhersagen, wann das Atom radioaktiv zerfallen wird.

Solange man die Kiste nicht öffnet und nachschaut (oder genauer: **solange man keinen Messprozess durchführt**), ist das Atom nun gleichzeitig zerfallen und nicht zerfallen. Nicht, weil man nicht weiß, ob es zerfallen ist. Sondern durch das Nachsehen und den Messprozess wird überhaupt erst festgelegt, ob das Atom zerfallen ist. Entsprechend entscheidet sich auch erst dann, ob die Katze tot oder lebendig ist. Vorher ist sie quasi beides gleichzeitig – man sagt, sie befindet sich in einem **„Überlagerungszustand“ (genauer: „Superpositionszustand“)** aus tot und lebendig.



Natürlich beobachtet man niemals eine Katze wirklich in einem solchen Superpositionszustand. Wir wissen nicht einmal, was ein solcher Superpositionszustand bedeuten könnte.

Grundprinzipien der klassischen Physik und der Quantenphysik

Worin unterscheiden sich die Teilgebiete ganz grundsätzlich?

Grundprinzipien der klassischen Physik und Quantenphysik

klassische Physik

deterministisch &
Messungen sind passiv

Quantenphysik

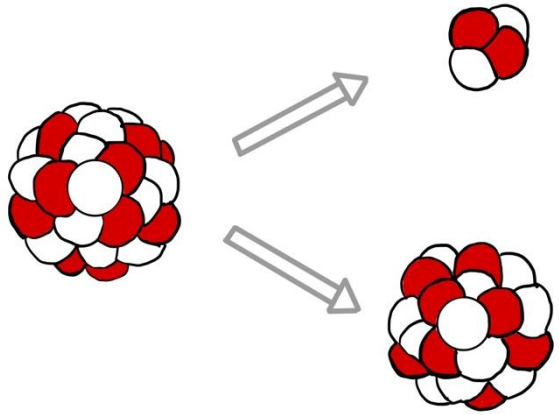
nicht-deterministisch &
Messprozesse sind aktiv

Foto Lottomaschine
(Link siehe rechts)

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ziehung_der_Lottozahlen,_Ziehungsger%C3%A4t_im_Main_Tower.jpg

https://meteoalemania-austria.blogspot.com/

Abbildung einer Wetterkarte im Fernsehen (Abbildung nicht mehr zugänglich)



Technische Universität Dresden
Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden
ctd.qmat Complexity, Topology and Dynamics in Quantum Matter

	Vorbestimmtheit von Versuchsergebnissen	Charakterisierung des Messprozesses	Beispiele zur Verdeutlichung
KLASSISCHE PHYSIK	**Determinismus** Der aktuelle Zustand eines physikalischen Systems legt durch die Gesetze der klassischen Physik den Zustand zu späteren Zeiten bereits fest. Man kann ihn nur nicht immer vorhersagen.	**Messungen sind passiv** Bei einer Messung stellt man nur eine vorher schon feststehende Eigenschaft fest.	• Lotto (deterministisch, nicht vorhersagbar) • Wetter • Ballweitwurf
QUANTENPHYSIK	**Nicht-Determinismus** Ausgänge von Versuchen sind i. d. R. zufällig und damit grundsätzlich nicht vorhersagbar. Spätere Zustände eines physikalischen Systems sind damit zumeist unbestimmt.	**Messprozesse sind aktiv** Das Ergebnis eines Versuches wird i. d. R. erst festgelegt, wenn ein Messprozess durchgeführt wird. Davor hat ein Quantenobjekt die zu bestimmende Eigenschaft einfach gar nicht. Das Messergebnis ist vom Zufall bestimmt.	Zerfall eines Atomkerns ☐ ohne Messprozess weder zerfallen, noch nicht zerfallen ☐ Entscheidung erst durch den Messprozess

Grundprinzipien der klassischen Physik und Quantenphysik

Aufgabe:

AH. S. 10,12 Nr. 1, 3a-b

(für Schnelle auch Nummer 2 auf Seite 9 ☺)

Zeit: 10 Minuten

Grundbegriffe

- Lehrtext S. 13-15 durchlesen
- Nur Definitionen übernehmen (Zustand, Präparation, Eigenschaft) → Überschrift: *Grundbegriffe*
- AH. S. 10 Nr. 1

Zeit: 15 Minuten

Zweizustandssysteme

- Lehrtext S. 18 durchlesen
- Definition von „Zweizustandssystem“ übernehmen
- AH. S. 15 Nr. 1

Zeit: 15 Minuten

Qubits und Elektronenspin

Definition Zweizustandssystem (ZZS):

= physikalisches System, bei dem nur eine charakteristische Eigenschaft betrachtet wird. Weitere Eigenschaften werden vernachlässigt bzw. als unveränderlich angenommen. Die betrachtete Eigenschaft kann in einem ZZS nur zwei mögliche Messwerte annehmen.

Aufgabe:

Notiere auf den Kärtchen Beispiele von Zweizustandssystemen (aus deinem Alltag, aus der Quantenphysik, aus der Technik, ...) und hefte sie an die Tafel.

Technische Universität Dresden

Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden

ctd.qmat
Complexity, Topology and Dynamics in Quantum Matter

QUBITS4PUPILS
QUANTENPHYSIK MACHT SCHULE

Quantenphysik

Von Schrödingers Katze zum Quantencomputer…

Doppelstunde 4

Qubits und Elektronenspin

Definition Zweizustandssystem (ZZS):

= physikalisches System, bei dem nur eine charakteristische Eigenschaft betrachtet wird. Weitere Eigenschaften werden vernachlässigt bzw. als unveränderlich angenommen. Die betrachtete Eigenschaft kann in einem ZZS nur zwei mögliche Messwerte annehmen.

Klassisches ZZS

- Bezeichnung: Bit
- Beispiel: Bit im Computer (Strom an/aus), Katze (tot/lebendig)

Quantenphysikalisches ZZS

- Bezeichnung: Qubit
- Beispiel: Atomkern (zerfallen/nicht zerfallen), Elektronenspin (up/down)

Aufgabe:

Lies im Lehrtext Kapitel 4 (S. 18-21) und/oder suche im Internet nach den Themen „Elektronenspin“ und „Stern-Gerlach-Experiment“

Erstellt in Gruppen jeweils eine Mind-Map oder ein kleines Plakat zum Thema „Wie der Spin das Elektron zum Qubit macht“. Die Mind-Map muss insbesondere die wesentlichen Fakten zum Elektronenspin sowie zum Stern-Gerlach-Experiment und dessen Ergebnis enthalten.

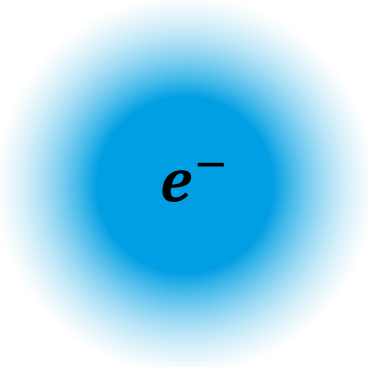
Stern-Gerlach-Versuch:
- Ziel
- Aufbau
- Ergebnis

Der Spin von Elektronen:
- Was ist das?
- schematische Darstellung
- Ausrichtung im Magnetfeld

Zeit: 25 Minuten

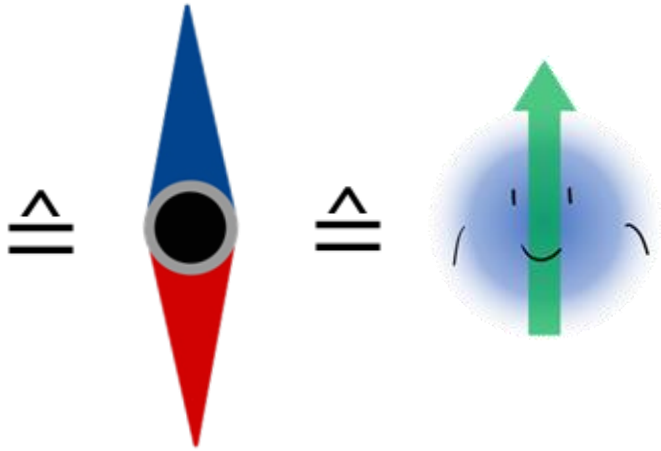
Der “Spin” eines Elektrons als Qubit

Masse



Ladung

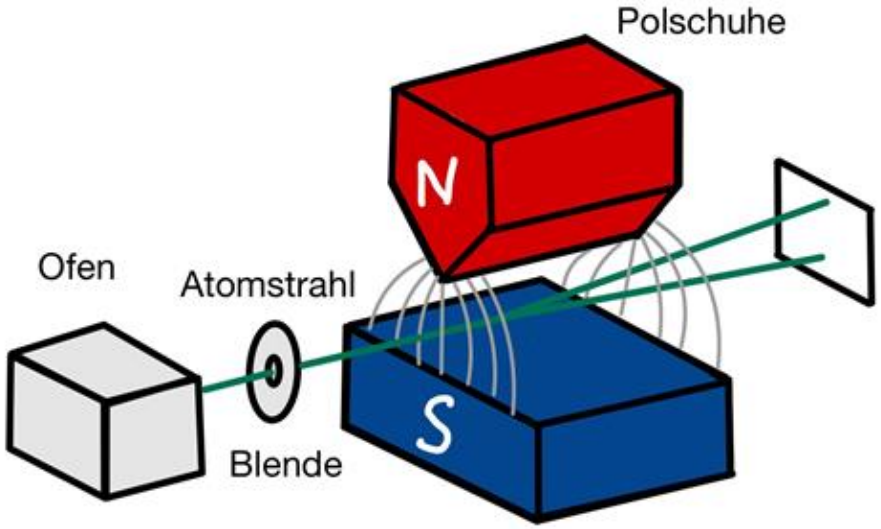
magnetische Eigenschaften



Der Spin von Elektronen

- Jedes Elektron verhält sich wie eine Kompass-Nadel
- Die Richtung des Südpols dieser Nadel nennen wir „**Spin**“
- Einen Spin kann man vereinfacht als **Pfeil** darstellen

Stern-Gerlach-Experiment:



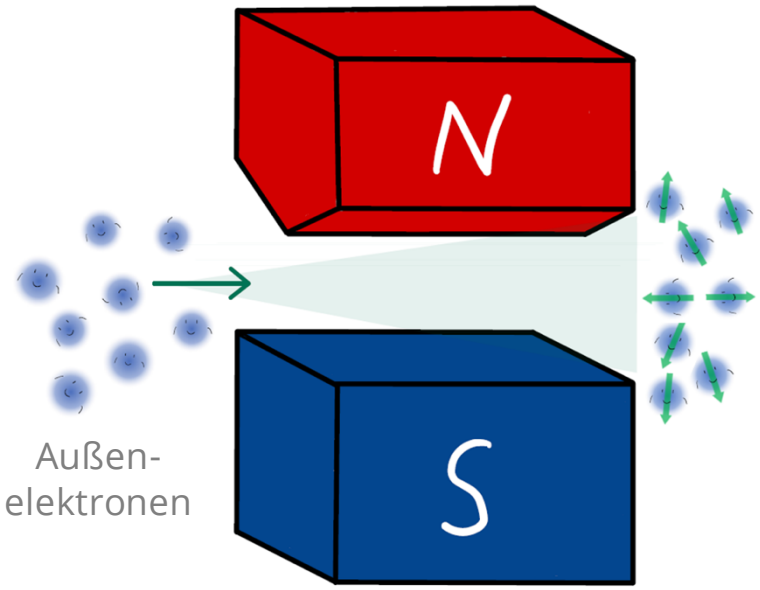
QUBITS4PUPILS
QUANTENPHYSIK MACHT SCHULE

ctd.qmat
Complexity, Topology and Dynamics in Quantum Matter

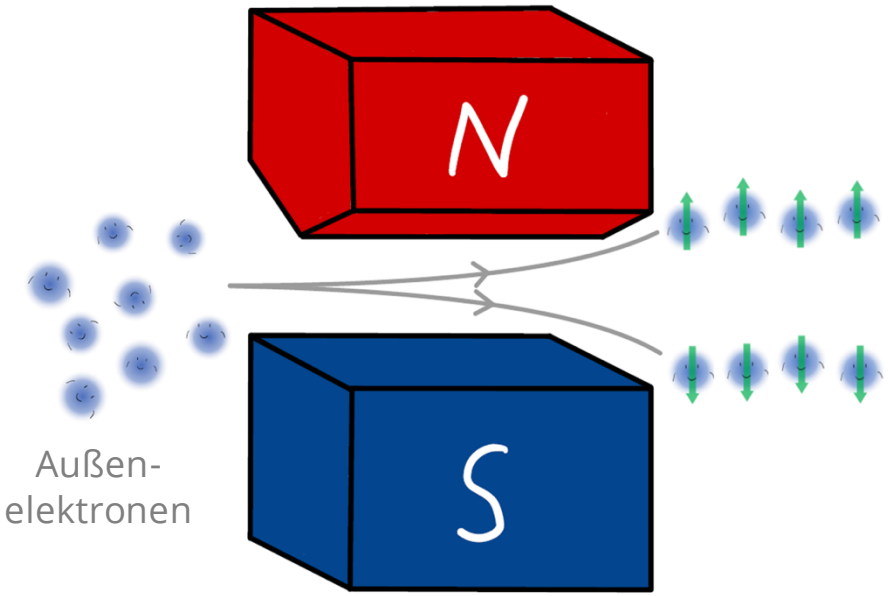
Der “Spin” eines Elektrons als Qubit

Stern-Gerlach-Versuch

Was man klassisch erwartet



Was tatsächlich herauskommt



→ Der Spin von Elektronen ist ein Qubit, denn:

1. das Elektron ist ein Quantenobjekt
2. sein Spin kann nur parallel oder anti-parallel zum äußeren Magnetfeld ausgerichtet sein (nichts dazwischen)

Elektronenspin als Qubit

magnetische Eigenschaft

Modell: Elektron ≙ mini Stabmagnet

Darstellung: z.B. als Pfeil

die Eigenschaft „Spin"

Ausrichtung im Magnetfeld: nur ↑ oder ↓

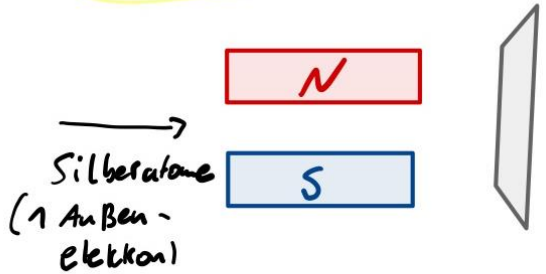
Elektron (Spin) = Qubit

Elektron hat im Magnetfeld nur Spin ↑ oder ↓ (nichts dazwischen)

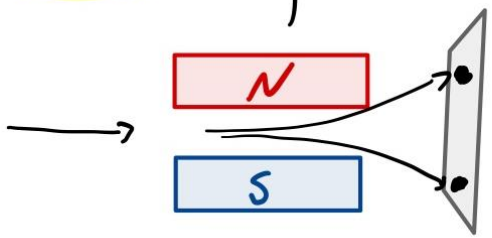
Ziel: Messung des Elektronenspins (Ausrichtung)

Stern - Gerlach-Experiment

Aufbau:



Ergebnis



Ablenkung nur nach oben oder nach unten

MENTIMETER

Alles klar?!

www.bit.ly/menti-ds3

Aufgabe:

Arbeitsheft S. 16 Nr. 3 und 4

Selbstkontrolle: Lösungen auf Lehrertisch

Zeit: 10 Minuten

Technische Universität Dresden

Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden

ctd.qmat
Complexity, Topology and Dynamics in Quantum Matter

QUBITS4PUPILS
QUANTENPHYSIK MACHT SCHULE

Quantenphysik

Von Schrödingers Katze zum Quantencomputer…

Doppelstunde 5

Leitfrage:

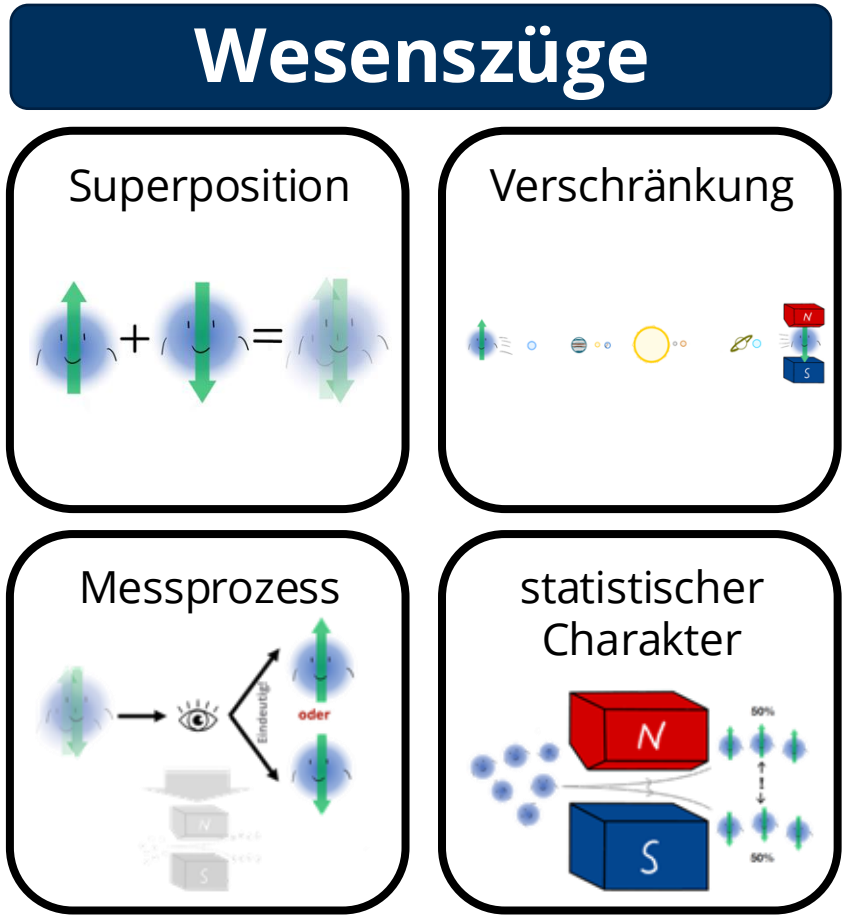
Was macht die Quantenphysik besonders?

Die Wesenszüge der Quantenphysik

Die Wesenszüge der Quantenphysik

= vier besondere Phänomene, …

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



Wesenszug 1
Superposition

Überlagerung/Superposition

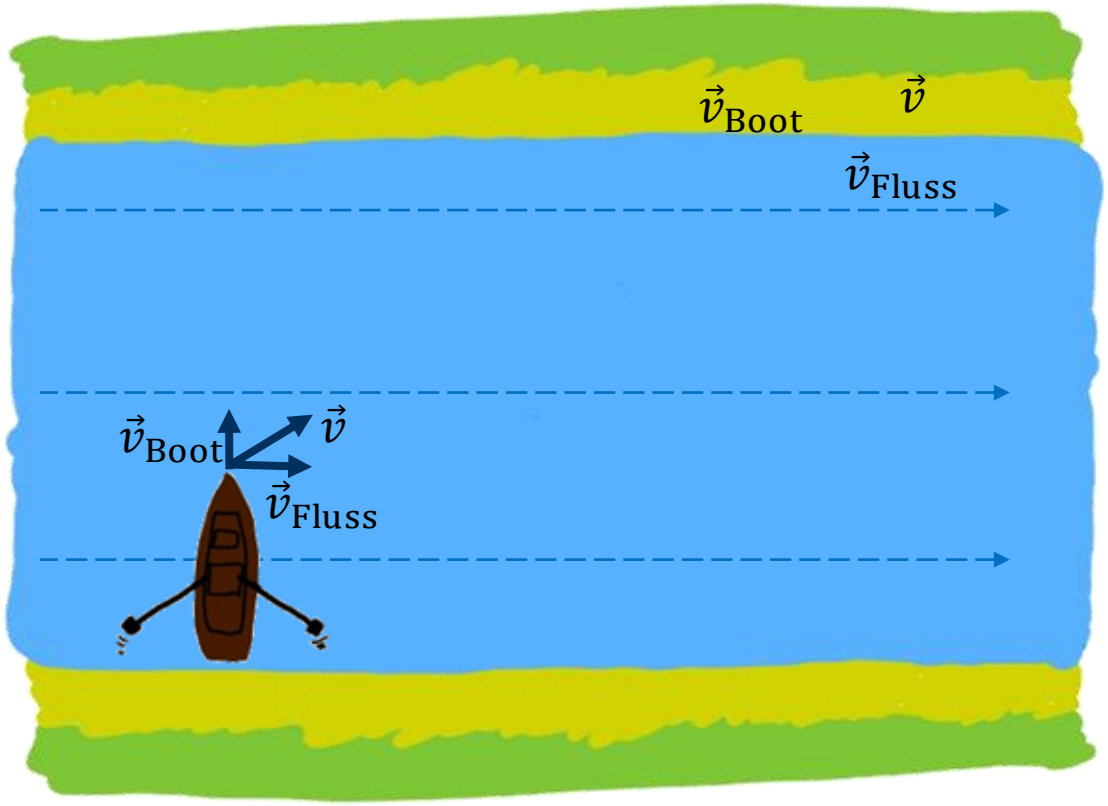
Überlagerung in der klassischen Mechanik



https://www.youtube.com/watch?v=Wj9OxuzLUg4

Überlagerung/Superposition

Überlagerung in der klassischen Mechanik



Überlagerung

Gleiche physikalische Größen können sich überlagern, ohne sich gegenseitig zu behindern.

Zwei Bewegungen in verschiedene können z. B. zur gleichen Zeit ablaufen.

$$\vec{v} = \vec{v}_{\text{Boot}} + \vec{v}_{\text{Fluss}}$$

Überlagerung/Superposition

Superposition in der Quantenphysik



https://www.youtube.com/watch?v=lGzE6lqmp0U

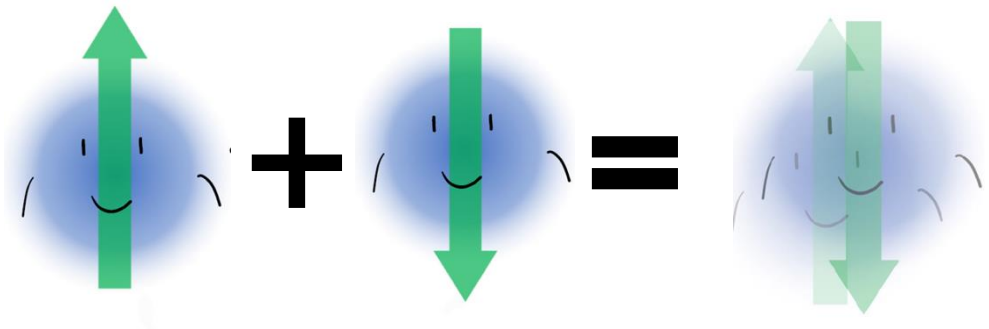
Überlagerung/Superposition

Superposition in der Quantenphysik

Erinnerung: Elektronenspin

Zustand A = Spin parallel zum Magnetfeld

Zustand B = Spin anti-parallel zum Magnetfeld



A + B = C

Superposition

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

C = A + B

Auch hier gilt: Beide Zustände liegen damit praktisch gleichzeitig vor.

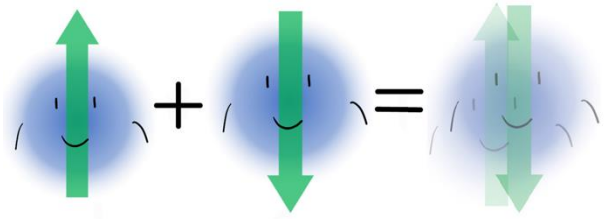
Superposition

Superposition in der Quantenphysik

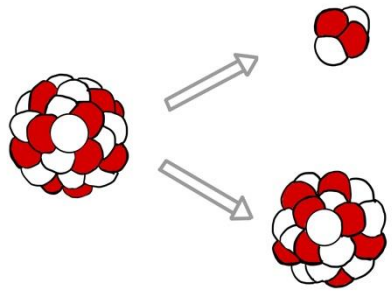
Kann sich ein Quantenobjekt in einem der beiden (sich ausschließenden) Zuständen befinden, dann kann es sich ebenfalls in einer Superposition dieser beiden Zustände befinden.

Beide Zustände liegen damit praktisch gleichzeitig vor.

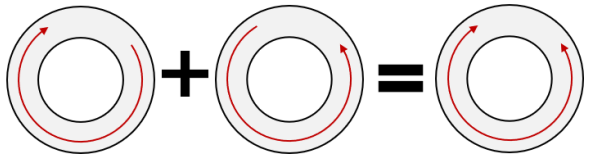
Elektronenspin



radioaktiver Zerfall



Ringstrom



Physik-Nobelpreis 2022
Für die Erforschung der ***Quanten-Verschränkung***



https://www.youtube.com/watch?v=hlHGRHTaivU

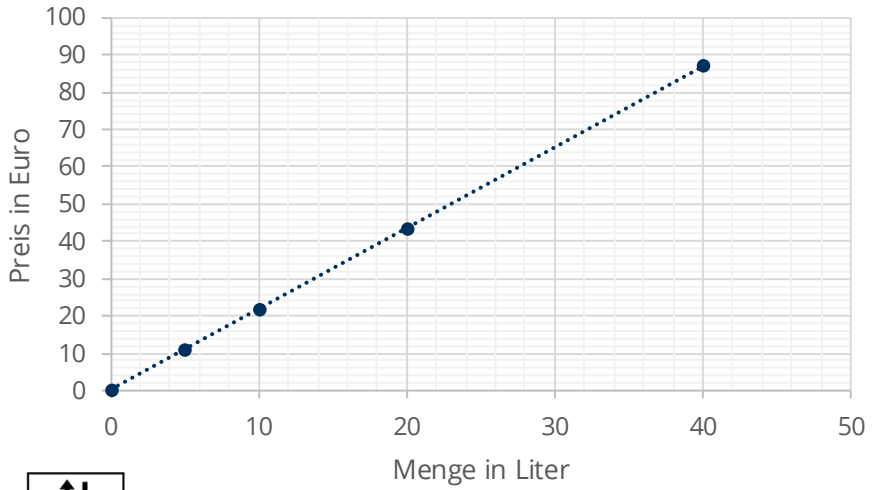
Zur Vorbereitung

„Korrelationen“

Verschränkung

Vorab: Korrelationen

Foto Preistafel Tankstelle
(https://www.radioleipzig.de/beitrag/preis-wahnsinn-an-leipzigertankstellen-716479/)



Korrelation

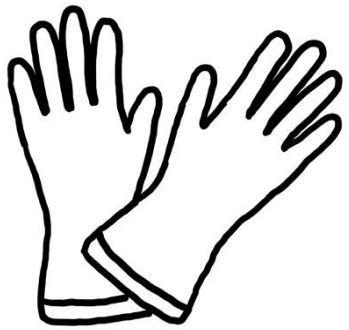
Ausdruck, der angibt, dass zwischen zwei Größen ein Zusammenhang besteht.

Beispiel:
Zwischen Benzinmenge und Gesamtpreis besteht eine (sehr eindeutige und einfache) Korrelation.

Verschränkung

Handschuh-Korrelation*

Stellt dir vor, dass du im Winter früh das Haus verlässt. Beim Verlassen des Hauses nimmst du aber aus Versehen nur einen Handschuh mit.



linker Handschuh eingepackt
↔
rechter Handschuh zuhause

---

rechter Handschuh eingepackt
↔
linker Handschuh zuhause

→ **diese Korrelation erscheint uns ganz natürlich**

→ schon vor dem Nachschauen steht fest, welcher Handschuh zuhause ist

Münzen-Korrelation*

Stell dir vor, dass du sehr oft **zwei** Münzen wirfst. Bei jedem Münzwurf zeigen beide jeweils zwei genau entgegengesetzte Seiten.

Münze 1	Münze 2
Zahl	Kopf
Kopf	Zahl
Kopf	Zahl
Kopf	Zahl
Zahl	Kopf
Kopf	Zahl
Zahl	Kopf



→ **diese Korrelation erscheint uns spukhaft**

→ vor dem Wurf steht nicht fest, auf welche Seite die Münzen fallen werden

*vgl. Kübelbeck (2022), siehe Lehrbuch S. 31

Aufgabe

Erarbeitet anhand der Simulation die verbleibenden drei „Wesenszüge der Quantenphysik“:

- **Messprozess**
- **Statistischer Charakter**
- **Verschränkung**

Führe dafür die Simulationen 1, 2 und 3 aus und beobachtet, was passiert.

Löst Schritt für Schritt die Aufgaben auf dem Arbeitsblatt in 2er-Teams.

Nachdem ihr alle Aufgaben gelöst habt, vergleicht ihr eure Ergebnis mit der Lösung (Rubbelfeld Vorderseite).

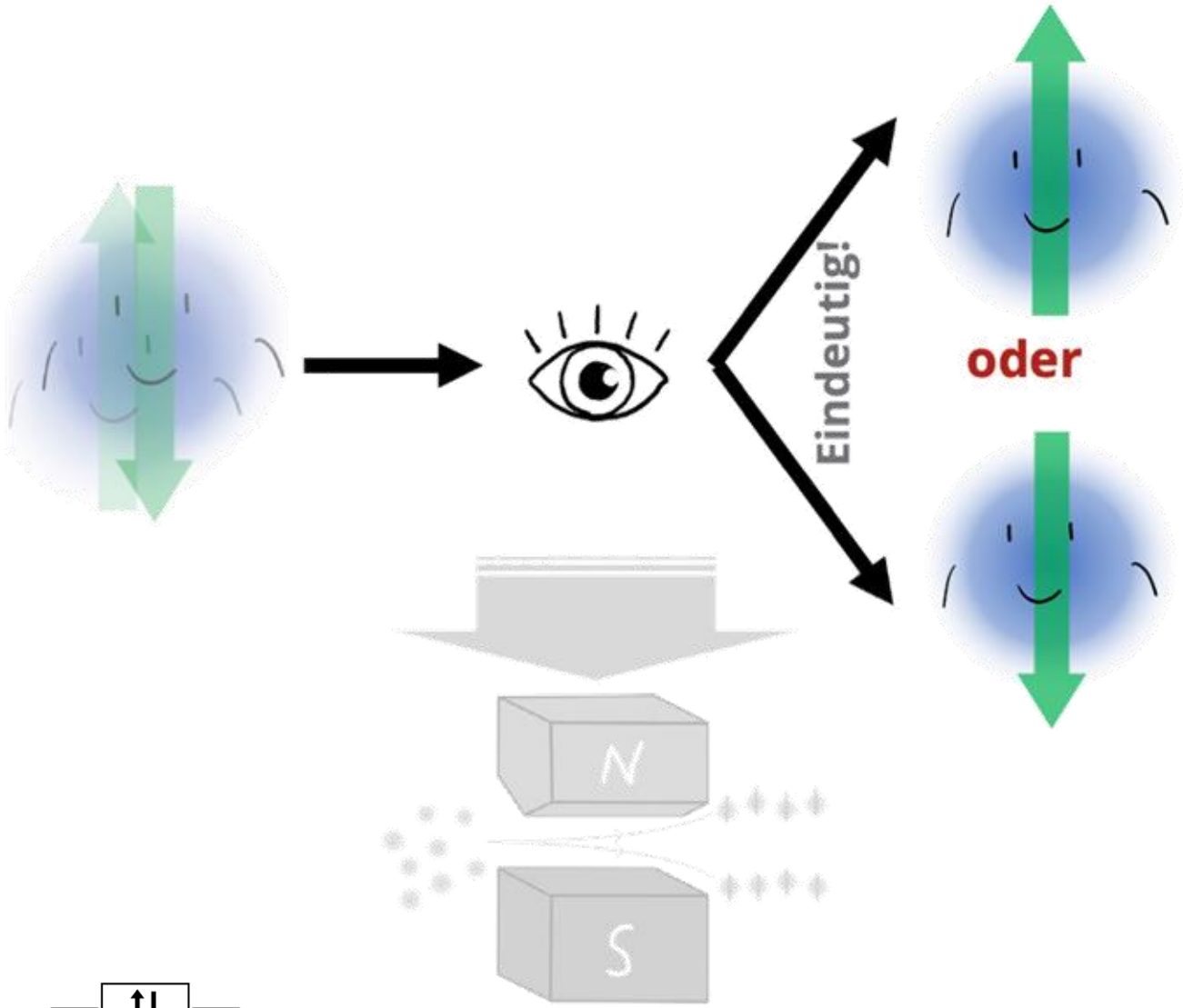
Zeit: 40 Minuten

Die drei restlichen Wesenszüge

Messprozess, statistischer Charakter, Verschränkung

Messprozess

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



Messprozess*

Quantenphysikalische Messprozesse haben einen aktiven Charakter: sie zwingen ein System, einen der möglichen Messwerte anzunehmen. Ein quantenphysikalischer Messprozess verändert den Zustand des Systems, an dem der Messprozess vorgenommen wird.

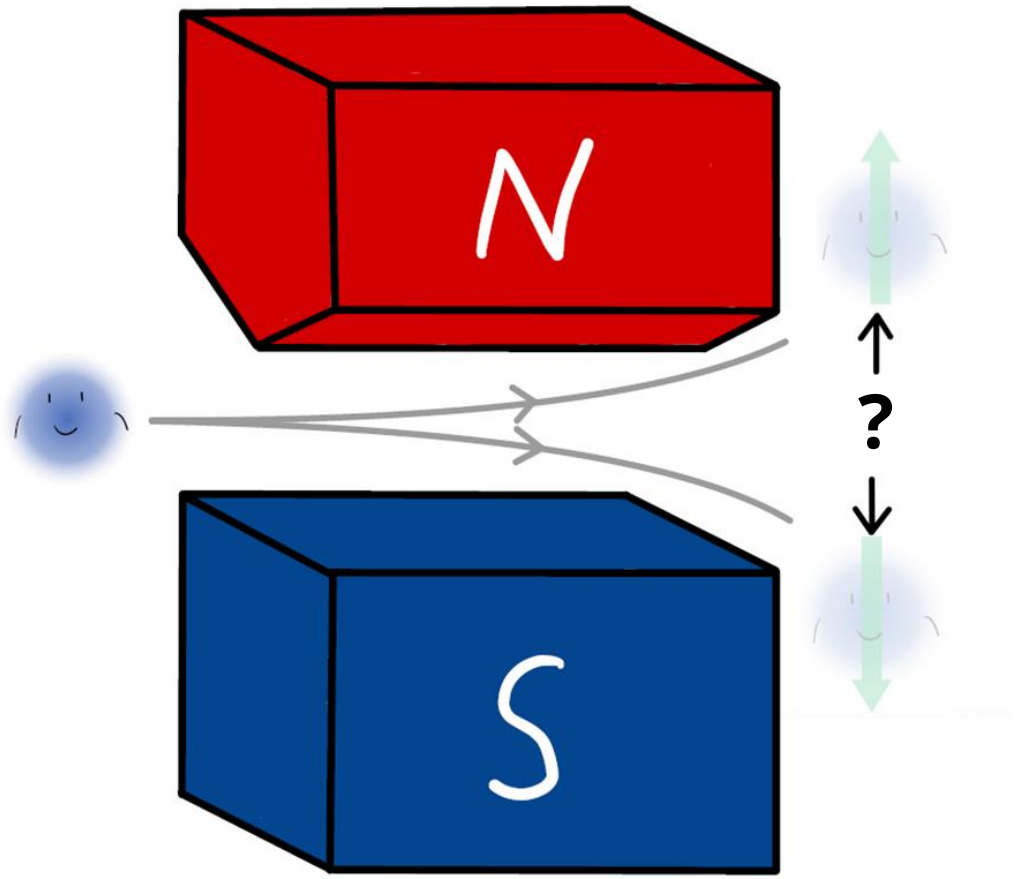
Auflösen der Superposition

Messergebnisse sind immer **eindeutig**.

→ Wenn ein Messprozess an einem Quantenobjekt stattfindet, wird es „gezwungen“, sich für einen der Zustände aus der Superposition zu „entscheiden“.
→ Das nennt man auch **„Auflösen der Superposition“.**

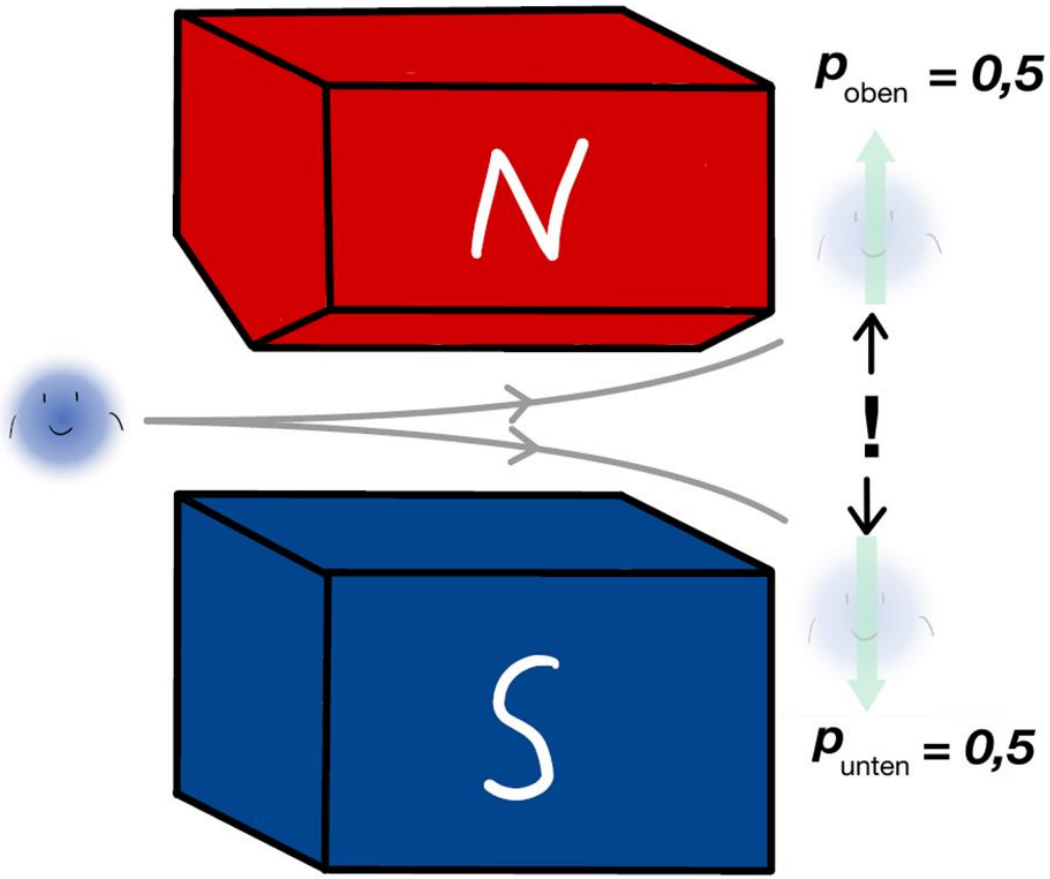
Statistischer Charakter

Einzel-Prinzip



Statistischer Charakter

Einzel-Prinzip



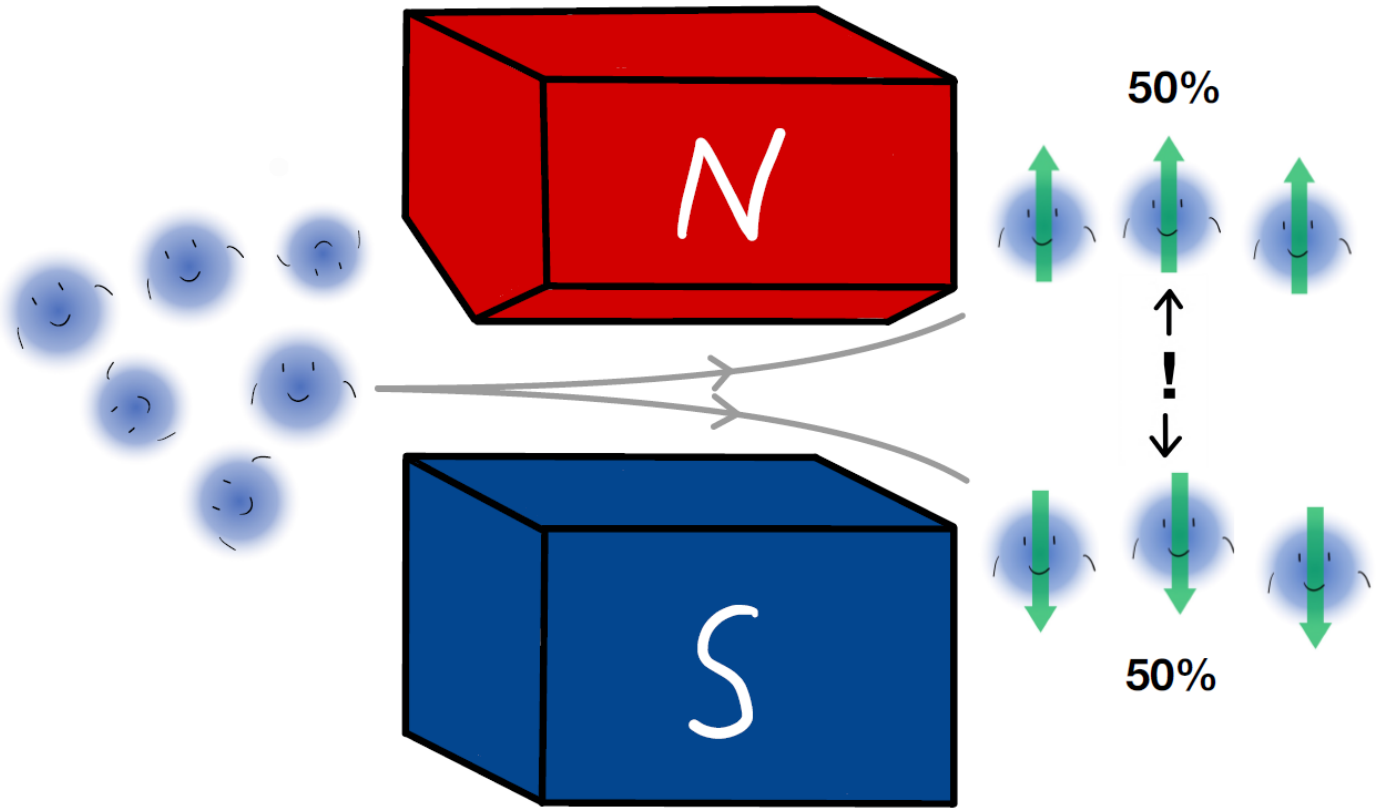
Einzel-Prinzip

Wir können das Messergebnis bei einem einzelnen Messprozess an einem Quantenobjekt **nicht vorhersagen**.

Wir können aber **Wahrscheinlichkeiten** für die verschiedenen möglichen Ergebnisse angeben.

Einzel- vs. Ensemble-Prinzip

Ensemble-Prinzip

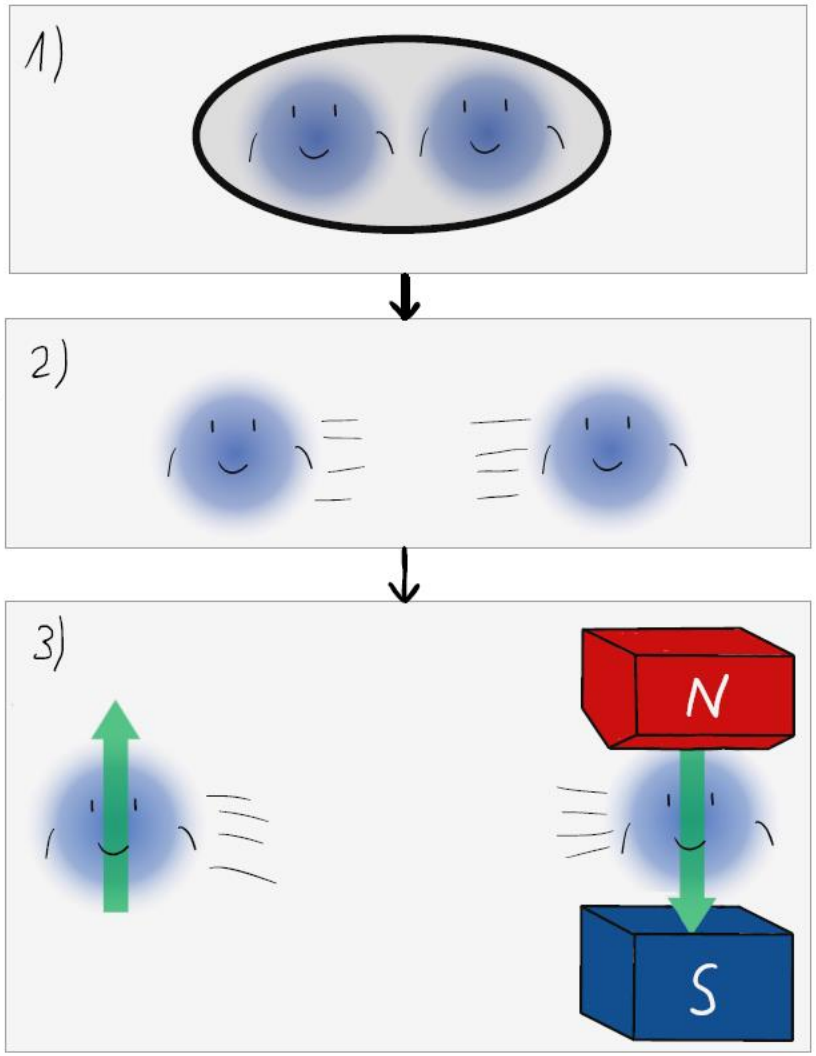


Ensemble-Prinzip

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

Statistische Vorhersagen sind möglich, einzelne Vorhersagen nicht!

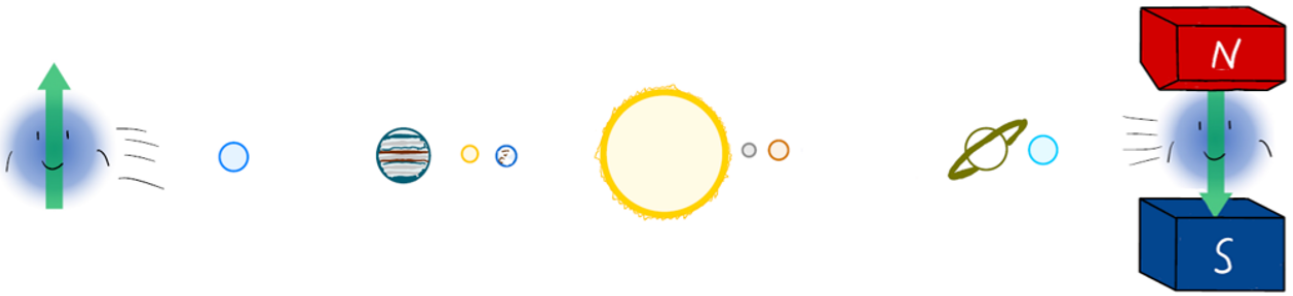
Verschränkung



EPR-Experiment

Zwei verschränkte Quantenobjekte (hier: Elektronen) fliegen auseinander. Man misst die beiden Objekte (hier: den Spin) und stellt fest, dass eine perfekte Korrelation zwischen den Messwerten besteht (hier: Spins sind immer entgegengesetzt, aber zufällig).

Verschränkung



„Münzen-Korrelation“

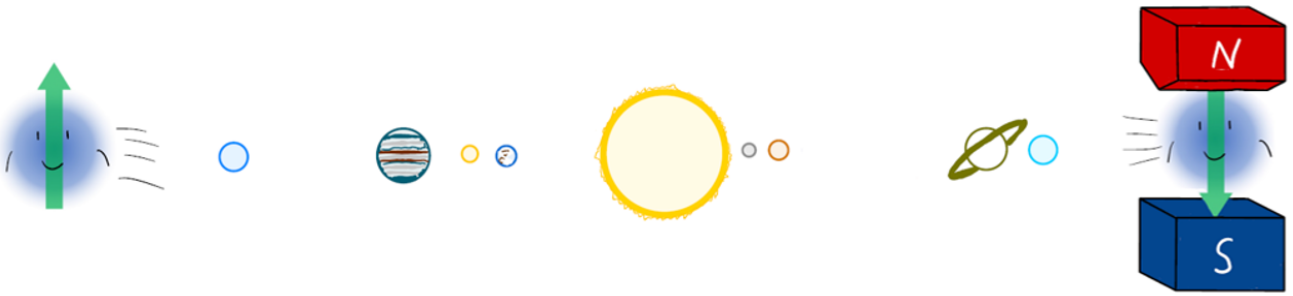
Verschränkung*

Zwei verschränkte Quantenobjekte bilden ein unteilbares Ganzes. Sie verhalten sich dann nicht unabhängig voneinander.

Auch über große Entfernungen hinweg legt der Messprozess an einem Quantenobjekt auch den Zustand des anderen Quantenobjektes unverzüglich fest

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

Verschränkung



„Münzen-Korrelation“

Kann man durch Verschränkung mit Überlichtgeschwindigkeit Nachrichten versenden?

Nein, denn die einzelnen Messergebnisse sind ja zufällig. Außerdem widerspricht das der Relativitätstheorie.

Bezeichnung
Superposition und Messprozess: Basiszustände

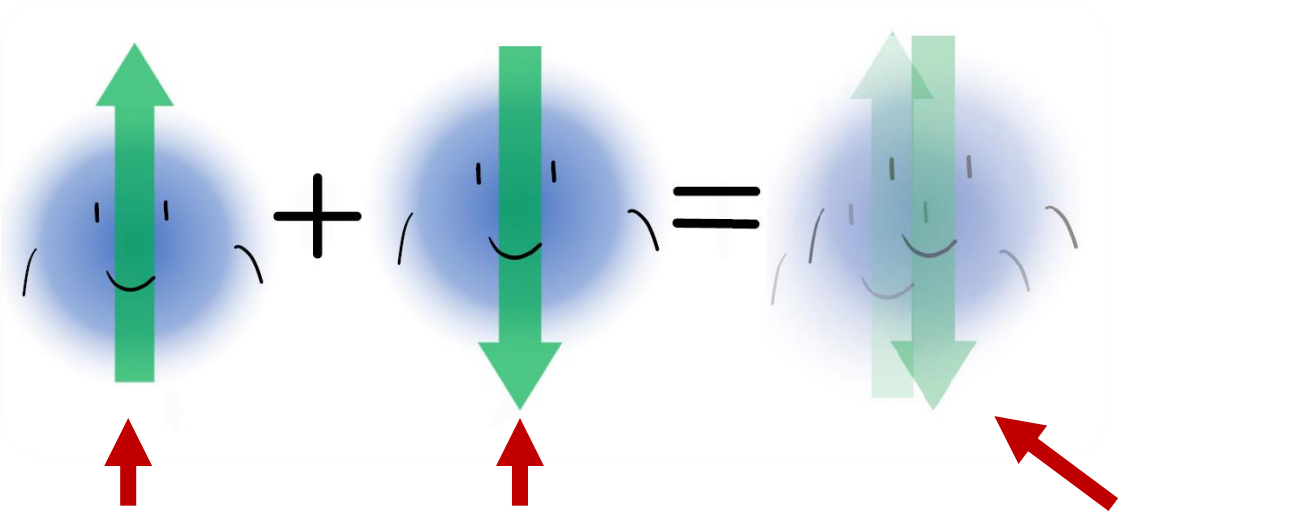
Superpositionszustand und Basiszustand

Ein Superpositionszustand ist die quantenphysikalische Superposition von (zwei oder mehr) Basiszuständen.

Superpositionszustand = Basiszustand 1 + Basiszustand 2 + …

(Ein Basiszustand ist also einer der möglichen Zustände nach einem Messprozess.)

Beispiel Elektronenspin



Basiszustand
(Spin up)

Basiszustand
(Spin down)

Superpositionszustand
(aus Spin up und Spin down)

Das Einzel-Prinzip gilt nur für Quantenobjekte, die sich in einer **Superposition** befinden.

Befindet sich ein Quantenobjekt in einem Basiszustand (z. B. nach einem Messprozess), ist auch das Messergebnis **nicht mehr zufällig.** Es ist dann durch den Basiszustand vorbestimmt.

QUBITS4PUPILS
QUANTENPHYSIK MACHT SCHULE

Technische Universität Dresden

Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden

ctd.qmat
Complexity, Topology and Dynamics in Quantum Matter

Bezeichnung
Präparation

Unter dem Begriff “Präparation” versteht man das gezielte Herstellen physikalischer Objekte mit bestimmten Anfangsbedingungen.

Beispiel: Experiment mit Licht

In einem abgedunkelten Raum leiten wir ein dünnes Lichtbündel weißen Lichts auf ein Prisma. Auf dem Schirm sieht man ein farbiges Regenbogenspektrum. Wir können Licht einer bestimmten Farbe herstellen, indem wir hinter das Prisma eine weitere Spaltblende stellen, die nur das Licht aus einem eng begrenzten Farbbereich (z. B. grün) durchlässt.

Skizze: Test auf Präparation einer Eigenschaft (https://www.milq.info/data/_uploaded/Lehrgang/milq_gesamt_skript.pdf, S. 16)

Damit hat man das Licht so präpariert, dass es die Eigenschaft „grün“ besitzt.

Aufgabe

Wende dein Wissen zu den Wesenszügen an ☺

- Wesenszug Superposition: **AH. S. 15 Nr. 3, S. 16 Nr. 4**
- Wesenszug Statistischer Charakter: **AH. S. 17 Nr. 6**
- Wesenszug Verschränkung: https://www.lernort-mint.de/aufgaben/physik-test-verschraenkung-von-quantenobjekten/

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden

ct.qmat Complexity and Topology in Quantum Matter

DRESDEN concept

Quantenphysik

Von Schrödingers Katze zum Quantencomputer…

Doppelstunde 6

Aufgabe

Wende dein Wissen zu den Wesenszügen an ☺

- Wesenszug Superposition: **AH. S. 15 Nr. 3, S. 16 Nr. 4**
- Wesenszug Statistischer Charakter: **AH. S. 17 Nr. 6**
- Wesenszug Verschränkung: https://www.lernort-mint.de/aufgaben/physik-test-verschraenkung-von-quantenobjekten/

Zeit: 25 Minuten

LK

- 60 Minuten Zeit
- Aufgabenblatt auf Lösungsblatt legen und mit abgeben
- Aufgabe 1 + 7: Buchstabe genügt!
- 25 BE erreichbar
- Viel Erfolg! ☺

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden

ct.qmat Complexity and Topology in Quantum Matter

DRESDEN concept

Quantenphysik

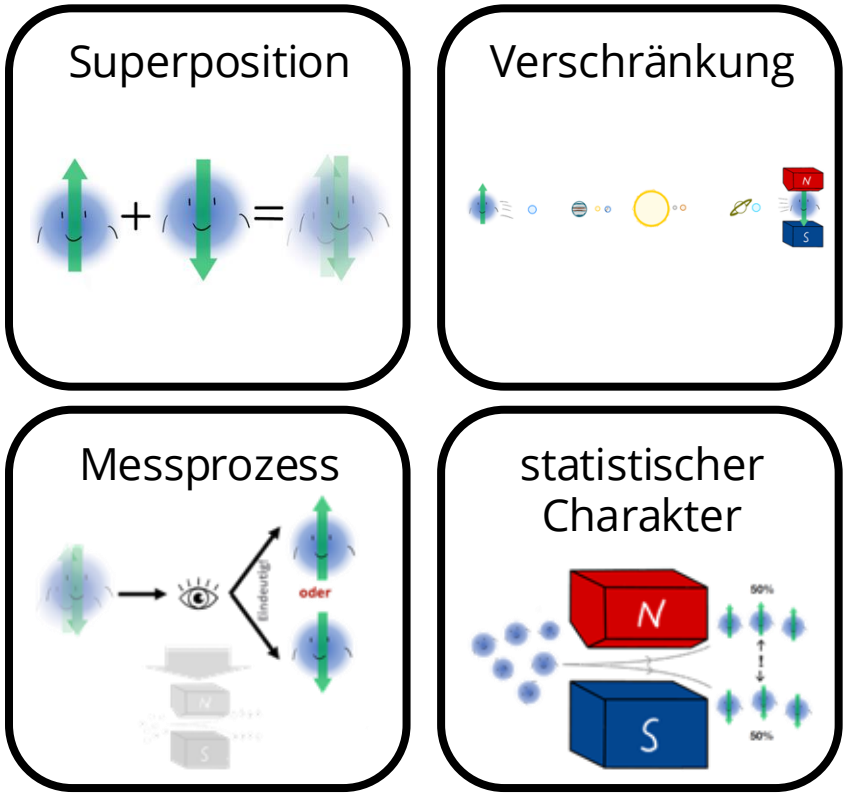
Von Schrödingers Katze zum Quantencomputer…

Doppelstunde 7

Die Wesenszüge der Quantenphysik

= vier besondere Phänomene, …

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



Wenn alles aus Quantenobjekten (Atome, Elektronen, …) besteht – warum erleben wir die Phänomene im Alltag nicht?

Was antwortet ChatGPT dazu?

NEW Share a link to this chat
Learn more

AL

Warum ist unsere Alltagswelt klassisch geprägt, obwohl doch alles aus Quantenobjekten besteht? Warum erleben wir also Dinge wie Superposition nicht? Gib mir bitte eine kurze, allgemeinverständliche Antwort und nenne die zugehörige physikalische Theorie zu diesem Phänomen.

In unserer Alltagswelt erscheint alles klassisch und nicht quantenmechanisch, weil sich makroskopische Objekte, wie wir sie im täglichen Leben sehen, aus einer enorm großen Anzahl von Quantenobjekten zusammensetzen. Die Gesetze der Quantenmechanik gelten jedoch auf einer mikroskopischen Ebene und zeigen sich nicht in unserem alltäglichen Maßstab.

Ein wichtiger Aspekt der Quantenmechanik ist die Superposition, bei der ein Quantenobjekt gleichzeitig in verschiedenen Zuständen sein kann. Zum Beispiel kann ein Elektron in einem Zustand sein, bei dem es sich gleichzeitig an mehreren Orten befindet. Allerdings wird diese Superposition normalerweise aufgehoben, wenn das Quantenobjekt mit seiner Umgebung interagiert. In unserer Alltagswelt sind die Wechselwirkungen mit der Umgebung so stark, dass die Superpositionseffekte in der Regel sehr schnell verschwinden.

Dieses Phänomen wird durch die sogenannte Dekohärenz erklärt. Dekohärenz ist eine physikalische Theorie, die beschreibt, wie die Wechselwirkung eines Quantensystems mit seiner Umgebung zu einem Verlust der quantenmechanischen Superposition führt. Durch diese Wechselwirkungen werden die quantenmechanischen Effekte aufgebrochen und die Systeme verhalten sich klassisch.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass unsere Alltagswelt klassisch erscheint, weil die quantenmechanischen Effekte aufgrund der Wechselwirkung mit der Umgebung schnell verloren gehen. Die Theorie der Dekohärenz erklärt diesen Übergang von der Quanten- zur klassischen Welt.

Regenerate response

Send a message

Free Research Preview. ChatGPT may produce inaccurate information about people, places, or facts. ChatGPT May 24 Version

Dekohärenztheorie

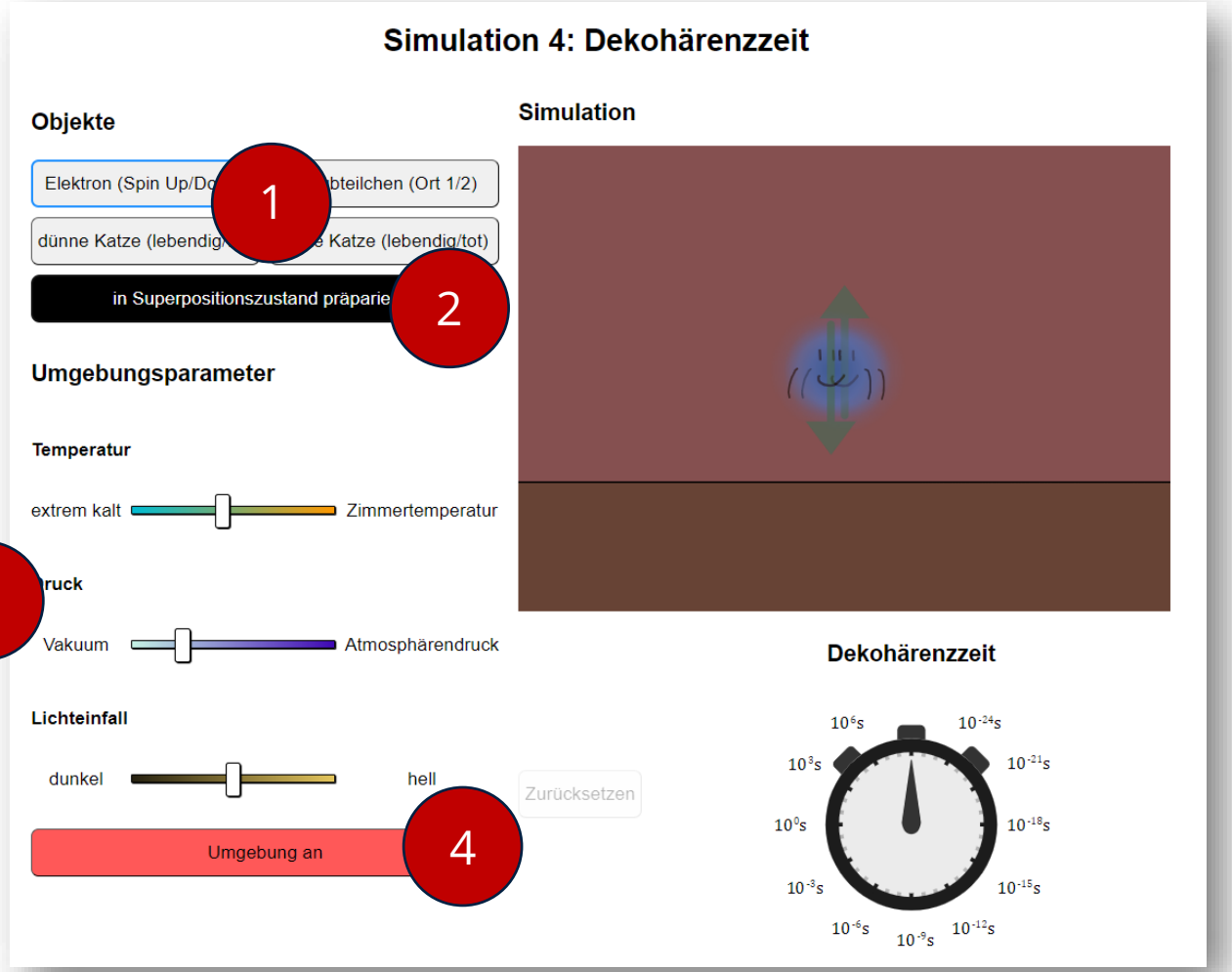


https://www.youtube.com/watch?v=wRcNOk4mfHA

Aufgabe

- Lest den **Informationstext** zur Dekohärenz durch und bearbeitet die **Vorbereitungsaufgaben** auf dem Arbeitsblatt.
- Erarbeitet mithilfe von Simulation 4 ein Einfluss der Umwelt auf die Dekohärenzzeit und bearbeitet das **Arbeitsblatt** (bis auf die Rubrik „Fazit“).

Zeit: 25 Minuten



Negative Zehnerpotenzen

Zehnerpotenzen mit negativen Exponenten dienen der Darstellung sehr kleiner Zahlen. Ein negativer Exponent sagt uns, an welcher Stelle hinter dem Komma die 1 steht.

Beispiel:

$10^{-4}\ s = 0,0001\ s$ (die „1“ steht an vierter Stelle nach dem Komma).

Erkläre in deinen eigenen Worten, warum sich makroskopische Objekte (z. B. eine Katze oder ein Ball) im Alltag in der Praxis nicht in einem quantenphysikalsichen Superpositionszustand befinden.

→ makroskopische Körper sind **nicht** von ihrer Umgebung **isoliert**

→ Sie **wechselwirken**/interagieren praktisch dauerhaft und extrem oft **mit ihrer Umgebung**
(z. B. Licht, Gasmoleküle, Wärmestrahlung)

→ Jede dieser Wechselwirkungen stellt einen **Messprozess** dar

→ Die Superposition wird **extrem schnell** aufgelöst.

Masse
Je *größer* die Masse des Objektes ist, umso **kleiner** ist seine Dekohärenzzeit.

Temperatur
Je *geringer* die Umgebungstemperatur ist, umso **größer** ist die Dekohärenzzeit.

Druck
Je *größer* der Umgebungsdruck ist, umso **kleiner** ist die Dekohärenzzeit.

Lichteinfall
Je *dunkler* die Umgebung eines Objektes ist, umso **größer** ist seine Dekohärenzzeit.

Aussage	Entscheidung
Das Auflösen der Superposition bei einem makroskopischen Objekt ist ein kontinuierlicher, aber unfassbar schneller Prozess.	
Bei makroskopischen Objekten macht es in der Praxis keinen wirklichen Unterschied, wie schwer sie genau sind. Die Dekohärenzzeiten sind in jedem Fall so kurz, das die Superposition für uns nie eine Rolle spielt.	
Ein einzelnes Elektron kann man für mehrere Sekunden in Superposition halten.	
Ein makroskopisches Objekt kann man für mehrere Sekunden in Superposition halten.	

Dekohärenztheorie und Dekohärenzzeit

Fazit:

Die Superposition eines makroskopischen Objektes verschwindet durch seine Umgebung kontinuierlich und so schnell, dass wir sie niemals im Alltag beobachten könnten.

Aufgabe

Wende dein Wissen zur Dekohärenz an ☺

Arbeitsheft S. 23 Nr. 3 und 4

Zeit: 10 Minuten

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden

ct.qmat Complexity and Topology in Quantum Matter

QUBITS4PUPILS QUANTENPHYSIK MACHT SCHULE

Quantencomputer

Und warum sie funktionieren…

Exponentielles Wachstum

= Ein Wert ändert sich in gleichen Zeitabschnitten um denselben Faktor.

Beispiel Vermehrung von Bakterien:

t in h	# Bakterien
0	100
1	200
2	400
3	800
4	1.600
5	3.200
6	6.400
7	12.800
8	25.600
9	51.200
10	102.400

Abbildung Diagramm zu exponentiellem Wachstum (https://mabo-images.s3-eu-west-1.amazonaws.com/content/w740/173373.jpg)

Aufgabe
Exponentielles Wachstum

Arbeitsheft S. 31 Nr. 1 und 2

Zeit: 5 Minuten

Aufgabe
Exponentielles Wachstum



https://www.youtube.com/watch?v=jWXLNPrVhfw

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden

ct.qmat Complexity and Topology in Quantum Matter

DRESDEN concept

Quantenphysik

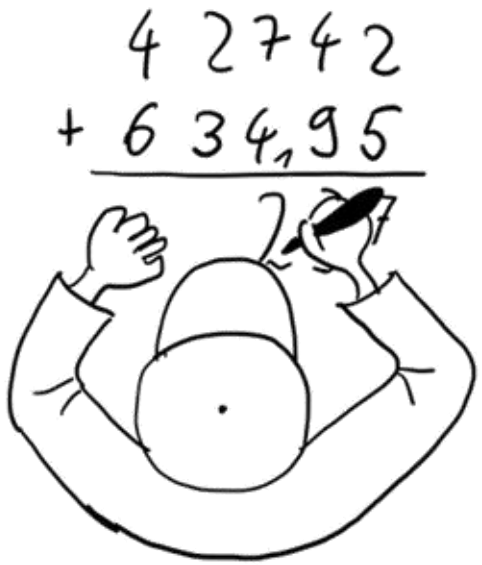
Von Schrödingers Katze zum Quantencomputer…

Doppelstunde 8

Quantencomputer

Was ist eine Berechnung in einem Computer?

Eingabe | Berechnung | Ausgabe



Anfangszustand

Rechnung auf dem Blatt

Rechenschritte

addiere letzte Stelle der ersten Zahl wird mit letzter Stelle der anderen Zahl → Notiere Ergebnis

Zwischenergebnis

neuer Zustand

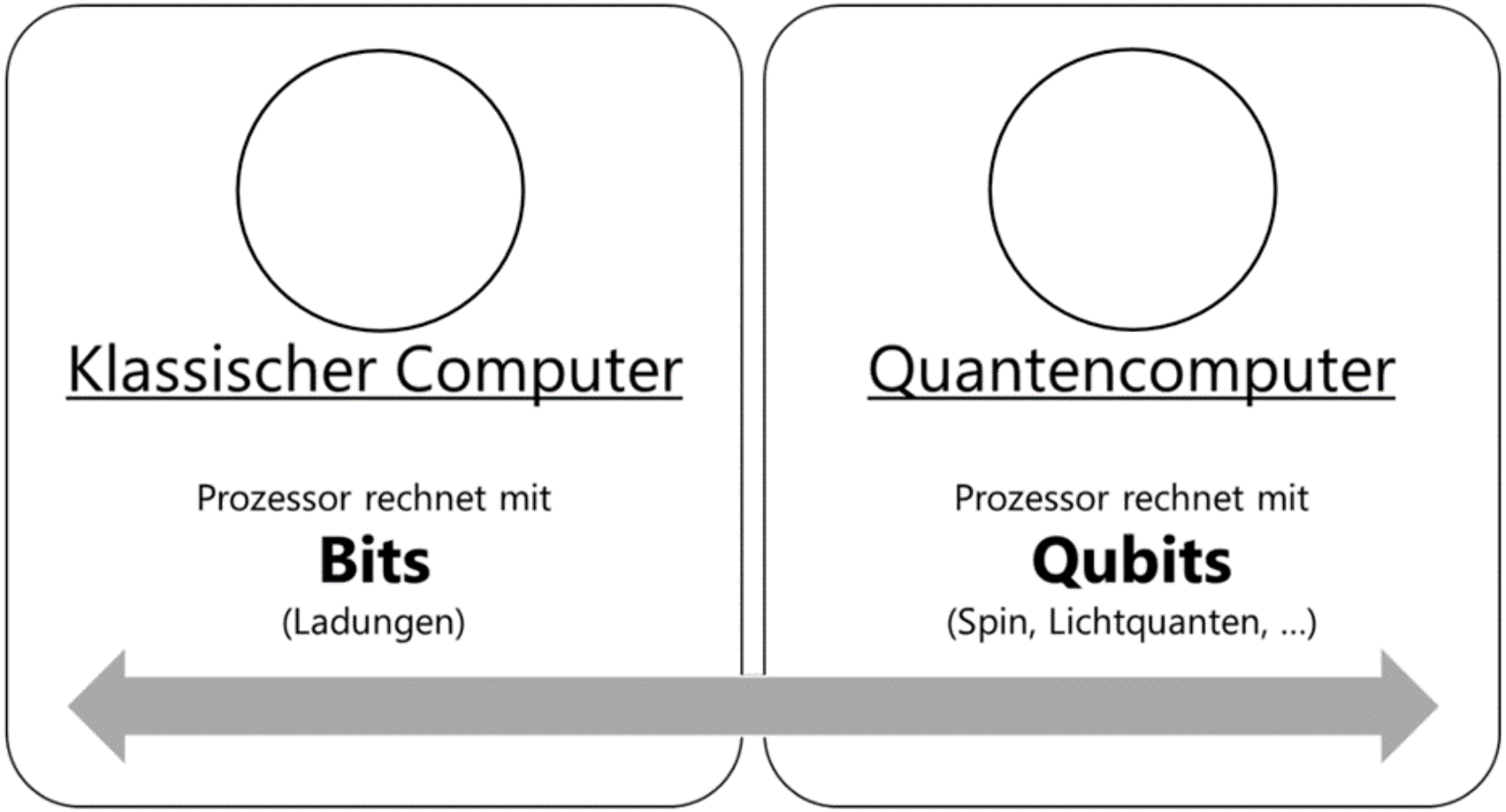
Endzustand

Ergebnisausgabe

QUBITS4PUPILS
QUANTENPHYSIK MACHT SCHULE

ctd.qmat
Complexity, Topology and Dynamics in Quantum Matter

Quantencomputer
Grundsätzliches



IBM Quantum Computing Development Roadmap bis 2025
(https://www.idquantique.com/nitropack_static/mcYhwKkzXnYxmxaakuejmgbkdCkaolHO/assets/images/optimized/rev-440a6df/www.idquantique.com/wp-content/uploads/IBM-Quantum-Roadmap-2022.png)

Foto IBM Quantencomputer
(https://de.newsroom.ibm.com/Image-Scientist-in-IBM-Quantum-Lab-IBM-Quantum-scientist-Dr-Maika-Takita-in-the-Thomas-J-Watson-Research-Center-IBM-Quantum-Lab)

Aufgabe
Arbeitsblatt Quantencomputer

- Bildet 2er-Paare und lest euren Informationstext („Berechnungen“ oder „Auslesbarkeit“).
- Erläutert euch eure gelesenen Informationen gegenseitig.
- Füllt gemeinsam jeweils die fehlende Seite aus, damit jeder alle Informationen im Hefter stehen hat.

Zeit: max. 25 Minuten

Quantencomputer
Informationsträger

Klassischer Computer	Quantencomputer
Klassische Computer arbeiten nur mit Nullen und Einsen, s. g. **Bits**. Ein Bit an Information entspricht einer Entscheidung zwischen den beiden Möglichkeiten „0“ oder „1“.	Quantencomputer arbeiten mit **Qubits**. Das besondere an Qubits ist die Tatsache, dass sie nicht nur im Zustand 0 oder 1 sein können – sie können sich auch in einem **Superpositionszustand** aus beiden Zuständen befinden. Ein Elektron in einem äußeren Magnetfeld eignet sich durch seinen Spin z. B prinzipiell dazu, als Qubit in einem Quantencomputer zu fungieren.

☐ **Wesenszug Superposition**
Durch das Superpositionsprinzip befindet sich ein einzelnes Qubit „gleichzeitig“ in den Zuständen 0 **und** 1.

Quantencomputer
Berechnungen

Klassische Computer:

Berechnungen bei klassischen Computern werden ausgeführt.

Quantencomputer:

Berechnungen bei Quantencomputern werden ; ausgeführt.

Dieses Phänomen nennt man

Voraussetzung für das exponentielle Anwachsen der Rechenleistung bei der Zugabe von Qubits ist es, dass die Qubits miteinander sind.

Begründung anhand der Wesenszüge:

- **Wesenszug Superposition**
  Durch das Superpositionsprinzip können Quantencomputer immer **mehrere Rechnungen gleichzeitig** ausführen.
- **Wesenszug Verschränkung**
  Durch die Verschränkung von Qubits wächst die Anzahl von gleichzeitig möglichen Berechnungen **exponentiell** an.

Quantencomputer
Auslesbarkeit der Rechenergebnisse

Klassische Computer:

Rechenergebnisse bei klassischen Computern lassen sich auslesen.

Das ausgegebene Endergebnis ist dabei das Ergebnis der Berechnung.

Quantencomputer:

Rechenergebnisse bei Quantencomputern lassen sich auslesen.

Das ausgegebene Endergebnis ist dabei das Ergebnis der Berechnung.

Diese Tatsache muss man in den Ablauf der Rechnung (Algorithmus) einbeziehen und dieselbe Rechnung mehrfach (sehr oft)

- **Wesenszug Messprozess**
  Durch den Messprozess erhält man beim Auslesen von Rechenergebnissen **immer nur ein Ergebnis**, alle anderen Ergebnisse sind unwiderruflich verloren.
- **Wesenszug statistischer Charakter**
  Man kann Rechnungen so gestalten, dass die Wahrscheinlichkeit für das gewünschte Ergebnis möglichst groß wird. Der statistische Charakter der Quantenphysik erlaubt es, **mit großer Sicherheit** das gewünschte Ergebnis zu erhalten, wenn man die Rechnung **oft** durchführt.

Quantencomputer
Praktische Aspekte

Einsatzgebiete

1. Simulation der Wirkweise medizinischer Wirkstoffe
2. Berechnungen zur Optimierung / KI
3. Primfaktorzerlegung

→ als „Co-Rechner“

Grenzen bei der Umsetzung

Ein Hauptproblem: Fehleranfälligkeit aufgrund der **Dekohärenz**.

Foto IBM Quantencomputer
(Link siehe unten)

https://venturebeat.com/business/ibm-releases-qiskit-modules-that-use-quantum-computers-to-improve-machine-learning/