Quantenphysik

Von Schrödingers Katze zum Quantencomputer

Klasse 9 - Lösungsheft

Ergänzungsmaterial
zum Schülerarbeitsheft

Didaktik der Physik bildungswissenschaftliches
Studienprojekt Qubits4Pupils

Carsten Albert,
Dresden 2026

Technische Universität Dresden

Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden

ctd.qmat
Complexity, Topology and Dynamics in Quantum Matter

Carsten Albert | c.albert@ifw-dresden.de
Dresden 2026

3. überarbeitete Auflage

Autor: Carsten Albert
Umschlag: Patricia Bäuchler
Korrektorat, Formatierungsvorlage: Alexander Schuster, Marie-Louise Abolmaali

Dieses Werk entstand in freundlicher und enger Kooperation von der Professur für Didaktik der Physik an der Technischen Universität Dresden, dem Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden e. V. sowie dem Dresden-Würzburger Exzellenzcluster ctd.qmat.

Materialien zum Promotionsprojekt Qubits4Pupils 2026 von Carsten Albert.

This work is licensed under CC BY-NC-SA 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/



Warum Quantenphysik?

Primfaktorzerlegung

1.) **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.**

a) Notiere die ersten zehn Primzahlen.

2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 29

b) Berechne das Produkt aus drei selbstgewählten Primzahlen.

Beispiel: 3·5·11=165

c) Gegeben ist die Zahl 182. Bestimmte die zugehörigen Primfaktoren (also die Primzahlen, deren Produkt die Zahl 182 ergeben).

182=2·7·13

d) Überlege dir ein Verfahren, mit dem du eine beliebige Zahl in ihre Primteiler zerlegen kannst.

1. Suche eine Primzahl, welche die vorgebebene Zahl teilt. Am einfachsten ist es, wenn man die Primzahlen der Größe nach durchprobiert.

2. Teile die Zahl durch deinen gefundenen Primfaktor.

3. Suche nun wie in Schritt 1 eine Primzahl, die dein Ergebnis aus Schritt 2 teilt und teile dein Ergebnis durch die gefundene Primzahl.

4. Führe die Schritte 1-3 solange aus, bis du keine Teiler mehr finden kannst.*

e) Warum ist dein Verfahren aus d) sehr langsam, wenn man es für große Zahlen auf einem klassischen Computer ausführt?

Man muss u. U. sehr lange suchen und viele verschiedene Zahlen durchprobieren, bis man zum Ergebnis kommt. Das Verfahren beruht also auf systematischem Probieren, und das kann lange dauern.

* -vgl. Serlo Education (o. J.): Primfaktorzerlegung. URL: https://de.serlo.org/mathe/1779/primfaktorzerlegung (letzter Abruf am 23.01.2023). CC BY-SA 4.0.

1. Was ist klassische Physik?

1.) Ordne folgende Alltagsprobleme den Teilgebieten der klassischen Physik zu.

a) Ein Flugzeug soll pünktlich um 17 Uhr Ortszeit in Los Angeles ankommen.

kl. Mechanik

b) Das Wasserwerk möchte die Fließgeschwindigkeit in den Wasserrohren erhöhen.

kl. Mechanik

c) Ein Kamerahersteller optimiert das Objektiv für seine neue Spiegelreflexkamera.

Optik

d) Max fragt sich, wie viele Verbraucher er an eine Verteilerdose anschließen kann.

Elektrizitätslehre

e) Der Kaffee kühlt in der Thermoskanne langsamer ab, als in der Tasse.

Wärmelehre

f) Beim Busfahren muss man sich als Fahrgast gut festhalten, wenn der Bus anfährt, abbremst oder um die Kurve fährt.

kl. Mechanik

2.) Entscheide, ob folgende Fragstellungen mit den Gesetzen der klassischen Physik beantwortet werden können. Ordne das Problem einem der bekannten physikalischen Teilgebiete zu.

a) Ein Auto von 1.500 kg Masse soll auf einer Straße bei 5% Neigung mit konstanter Geschwindigkeit nach oben fahren. Wie groß muss die Motorkraft sein?

- ☒ Klassische Physik, Teilgebiet: **klassische Mechanik**
- ☐ Moderne Physik, Teilgebiet: _____

b) Warum sieht ein Strohhalm gebrochen aus, wenn man ihn in ein Wasserglas stellt und es von vorne betrachtet?

- ☒ Klassische Physik, Teilgebiet: **klassische Optik, Brechung von Licht**
- ☐ Moderne Physik, Teilgebiet: _____

c) Die zwei Zwillingsbrüder Max und Moritz sind Astronauten. Max steigt für eine Mission in ein Raumschiff, das sehr schnell, mit 80% der Lichtgeschwindigkeit, zu einem anderen Stern unterwegs ist. Moritz bleibt währenddessen auf der Erde. Nach Max' Rückkehr auf die Erde stellen die beiden fest, dass Moritz nun älter als Max ist. Um wie viele Jahre ist Moritz mehr gealtert als Max?

- ☐ Klassische Physik, Teilgebiet: _____
- ☒ Moderne Physik, Teilgebiet: **spezielle Relativitätstheorie, Zeitdilatation**

d) Elektronen treffen mit großer Geschwindigkeit senkrecht auf die Oberfläche eines Nickelkristalls. Unter welchem Winkel wird das Elektron abgelenkt?

☐ Klassische Physik, Teilgebiet: _____

☒ Moderne Physik, Teilgebiet: **Quantenmechanik, de-Broglie-Wellenlänge und Bragg-Bedingung**

e) Durch eine Glühlampe fließt bei einer elektrischen Spannung von $U = 9\,V$ ein elektriscer Strom der Stromstärke $I = 200\,\mathrm{mA}$. Gesucht ist der elektrische Widerstand der Glühlampe.

☒ Klassische Physik, Teilgebiet: **Elektrizitätslehre, Definition vom el. Widerstand**

☐ Moderne Physik, Teilgebiet: _____

f) Wasser ist ein s. g. „gewinkeltes" Molekül, d. h. die Atome im Molekül schließen einen Winkel $< 180°$ ein. Dieser Winkel soll berechnet werden.

☐ Klassische Physik, Teilgebiet: _____

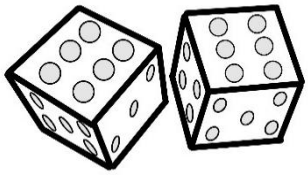
☒ Moderne Physik, Teilgebiet: **Quantenmechanik, Hybridisierung von Molekülorbitalen**

g) Wie viel Liter Wasser ($15\,°C$) können für $2\,\mathrm{Euro}$ zum Sieden gebracht werden, wenn der Strompreis bei 40 Cent pro kWh liegt?

☒ Klassische Physik, Teilgebiet: **Wärmelehre, Grundgleichung der Wärmelehre**

☐ Moderne Physik, Teilgebiet: _____

3.) Als Pasch wird in einem Spiel der Wurf mit mehreren Würfeln bezeichnet, bei dem mehrere Würfel die gleiche Augenzahl zeigen. Monopoly wird beispielweise mit zwei Würfeln gespielt. Ein Pasch ist hier ein Wurf, bei dem beide Würfel die gleiche Augenzahl zeigen.



a) Bestimme die Wahrscheinlichkeit für einen Pasch bei Monopoly.

6 von 36 möglichen Kombinationen der Augenzahlen entsprechen einem Pasch →

$$p = \frac{6}{36} = \frac{1}{6}$$

b) Ist der Würfelwurf bei Monopoly deterministisch? Ist das Ergebnis vorhersagbar?

Der Würfelwurf ist deterministisch, denn es handelt sich bei Würfeln um makroskopische Objekte, die sich mit den Gesetzen der klassischen Mechanik beschreiben lassen.

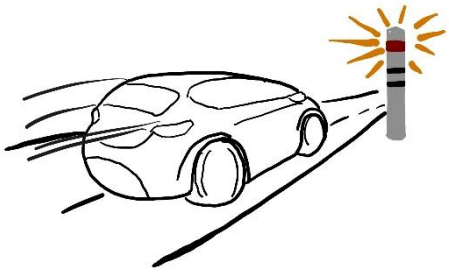
Er ist aber nicht vorhersagbar, weil man beim alltäglichen Würfelwurf die Anfangsbedingungen wie die Massenverteilung der Würfel, Anfangsgeschwindigkeiten und Position der Würfel zueinander nicht kennt.

c) Nenne mindestens fünf Bedingungen, von denen das Ergebnis des Würfelwurfes beim Monopoly abhängt.

Anfangsbedingungen wie die exakte Massenverteilung der Würfel, Anfangsgeschwindigkeiten, Drehimpuls der Würfel, Position der Würfel zueinander, Position der Würfel über dem Tisch, Luftwiderstand (bedingt durch Luftfeuchtigkeit, Lufttemperatur, …).

4.) Laserpistolen werden im Straßenverkehr zur Geschwindigkeitsmessung eingesetzt (ähnlich wie ein Blitzer). Das Funktionsprinzip basiert auf der Laufzeit von kurzen Lichtpulsen.

a) Zu einem bestimmten Zeitpunkt soll die Geschwindigkeit eines PKW in einer Ortschaft von einem Polizisten gemessen werden. Kurz nach Betätigung des Knopfes wird von der Laserpistole ein Lichtstrahl ausgesendet.



Der Lichtstrahl verlässt die Laserpistole, trifft auf das Auto, wird reflektiert und nach 0,4 µs wieder detektiert. 1 Sekunde später wird erneut ein Laserpuls gesendet und nach 0,28 µs registriert.

Berechne die Geschwindigkeit des Autos in $\mathrm{km/h}$

Begründe, dass das Auto schneller gefahren ist, als erlaubt.

Hinweis: Die Geschwindigkeit des Laser-Lichtes beträgt $v_{\mathrm{Licht}} = 300.000.000\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$

Entfernung zum Zeitpunkt 1:

$\mathbf{v_{Licht} = \frac{s_{Licht}}{t_{Licht}} \Rightarrow s_{Licht} = v \cdot t_{Licht} = 300.000.000\,\frac{m}{s} \cdot 0,4 \cdot 10^{-6}\,s = 120\,m}$ **(hin und zurück)**

$\mathbf{\Rightarrow s = \frac{1}{2} \cdot 120\,m = 60\,m}$

Entfernung zum Zeitpunkt 2 nach 1 Sekunde:

$\mathbf{vv_{Licht} = \frac{s_{Licht}}{t_{Licht}} \Rightarrow s_{Licht} = v \cdot t_{Licht} = 300.000.000\,\frac{m}{s} \cdot 0,28 \cdot 10^{-6}\,s = 84\,m}$ **(hin und zurück)**

$\mathbf{\Rightarrow s = \frac{1}{2} \cdot 84\,m = 42\,m}$

Geschwindigkeit

$\mathbf{v_{Auto} = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{18\,m}{1\,s} = 18\,\frac{m}{s} = 65\,\frac{km}{h}}$

In einer Ortschaft ist i. d. R. eine Höchstgeschwindigkeit von $50\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}$ erlaubt, damit war das Auto zu schnell.

b) Wäre das Auto auch zu schnell gefahren, wenn seine Geschwindigkeit nicht gemessen worden wäre? Begründe!

Klassische Physik, wäre es. Das Auto ist ein makroskopisches Objekt, bei dem die Gesetze der klassischen Physik gelten. Eine Messung ist hier passiv, d. h. sie gibt nur einen Wert an, der aus ohne Messung feststehen würde.

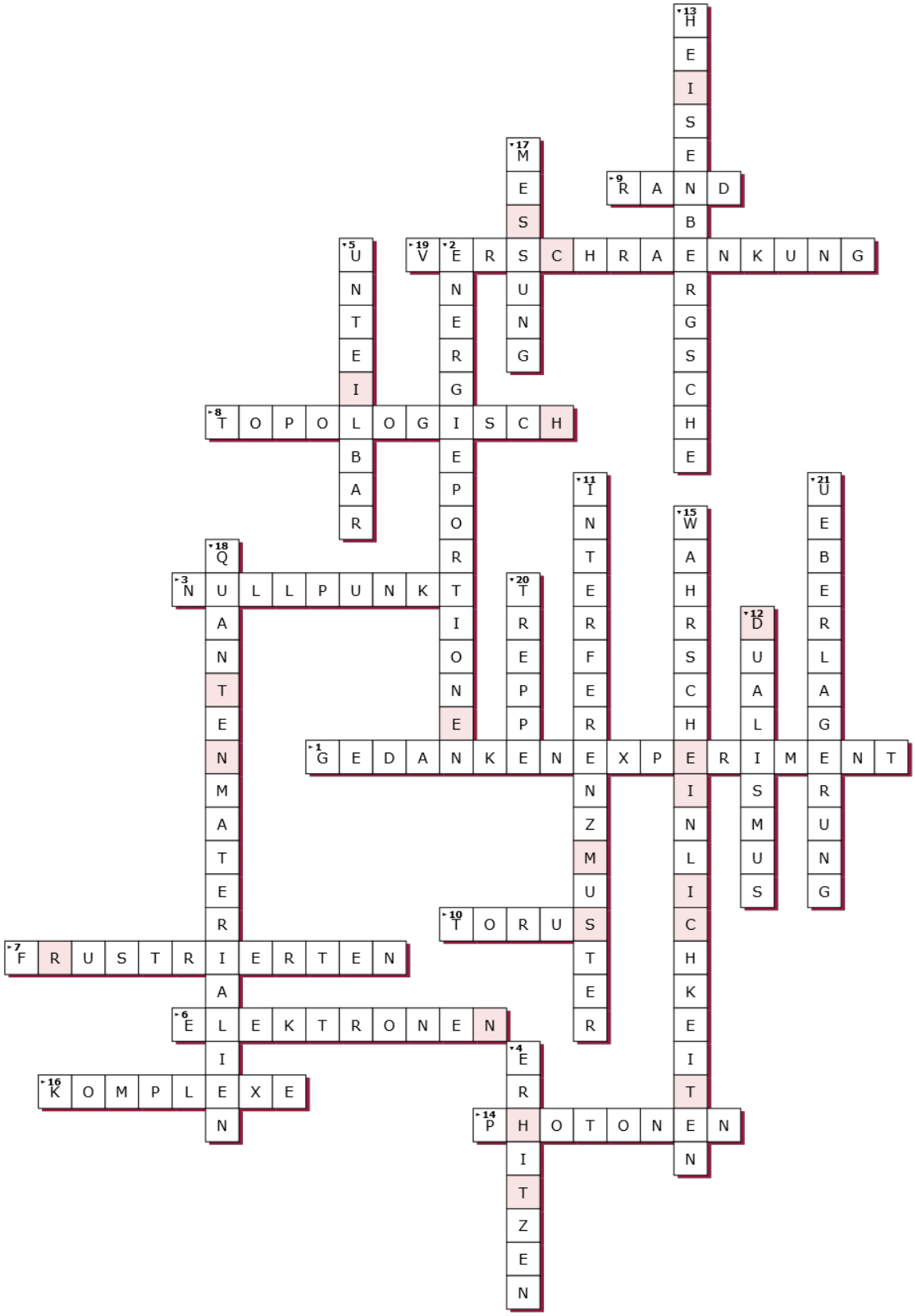
Das Auto ist also in jedem Fall zu schnell, ohne Messung wissen wir das nur nicht.

2. Paradigmenwechsel und neue Begriffe in der Quantenphysik

1.) Finde mithilfe von Kittypedia die fehlenden Wörter und ergänze deine Antworten im Kreuzworträtsel: [1]

1. Schrödingers Katze ist keine echte Katze, sondern ein (?).
2. In der Quantenphysik kann Energie nicht in beliebigen (?) übertragen werden.
3. Für viele quantenphysikalische Experimente liegt die ideale Temperatur nahe dem absoluten (?) bei $-273{,}15\ °C$, also $0\ K$. Diesen Wert selbst kann man experimentell nicht erreichen, aber man kann ihm sehr nahekommen.
4. Mithilfe von Quantenphysik lassen sich Computer-Chips aus Materialien herstellen, die sich durch elektrischen Strom nicht (?). So kann Energie gespart werden, die sonst für die Kühlung aufgebracht werden müsste.
5. Der Begriff Atom stammt aus dem Griechischen und bedeutet so viel wie „(?)“
6. Tatsächlich bestehen Atome aber aus noch kleineren Teilchen, wie z.B. (?). Anhand der Anzahl der Elektronen im Atom kann man verschiedene Sorten von Atomen unterscheiden.
7. Die Atome mancher Materialien können sich wie kleine Magnete verhalten. Bei besonderen Materialien ist es aber nicht möglich, dass diese „Mini-Magnete“ alle ihre optimale Lage erreichen. Sie können z.B. nicht eingefroren werden. Man spricht von (?) Magneten.
8. Zwei Objekte, die sich äußerlich unterscheiden, aber bezüglich ihrer Form grundlegend gleiche mathematische Eigenschaften haben, nennt man (?) identische Objekte.
9. Der (?) eines Objektes ist der Ort, an dem das Innere (z. B. Holz) auf das Äußere (z. B. Luft) trifft. Er kann andere Eigenschaften haben als das Objekt selbst, also beispielsweise Strom leiten, obwohl das Objekt selbst nichtleitend ist.
10. In der Physik spielt die Donutform, auch (?) genannt, wegen ihrer Eigenschaften mathematisch eine große Rolle.
11. Schickt man Licht durch einen Doppelspalt, so erhält man auf einer Leinwand nicht zwei Streifen, sondern ein (?).
12. Licht besitzt also nicht nur Teilchen-, sondern auch Welleneigenschaften. Man nennt das Welle-Teilchen-(?).
13. Bei sehr kleinen Teilchen kann man nicht gleichzeitig den Ort und die Geschwindigkeit exakt bestimmen. Das liegt nicht daran, dass wir zu ungenau Messen. Vielmehr besitzen Quantenobjekte die Eigenschaften „Ort“ und „Geschwindigkeit“ nicht gleichzeitig – und das ist etwas echt Verrücktes. Man spricht dabei von der (?) Unschärfe.
14. Albert Einstein entwickelte das Konzept, das Licht aus kleinen Energieteilchen besteht, die (?) genannt werden.
15. Einstein dachte, dass alles in der Natur exakt berechnet werden kann. In der Quantentheorie ist das aber nicht möglich, da man hier immer nur (?) kennt. Dies spielt zum Beispiel beim radioaktiven Zerfall eine Rolle
16. Zahlen, die mit sich selbst multipliziert auch negative Zahlen ergeben können, nennt man (?) Zahlen.
17. Jede Beobachtung ist im Prinzip eine (?). In der Quantenphysik beeinflusst die Beobachtung das Experiment. Ein Beispiel ist das Doppelspaltexperiment mit Elektronen.
18. Mangan-Bismut-Tellurid ist ein Beispiel für (?), die auch ohne extreme Laborbedingungen besondere Eigenschaften haben und damit alltagstauglich sein könnten.
19. In der Quantenphysik sind auch die Eigenschaften von weit voneinander entfernten Teilchen miteinander verknüpft. Bestimmt man diese Eigenschaften bei einem Teilchen, wird diese Eigenschaft auch beim anderen sofort Teilchen verändert. Man nennt dieses Phänomen (?).
20. Beim „normalen“ Hall-Effekt gibt es einen proportionalen Zusammenhang zwischen dem angelegten Magnetfeld und der gemessenen Hall-Spannung. Klaus von Kitzing kühlte die Versuchsanordnung mit flüssigem Helium ab und beobachtete unter diesen extremen Bedingungen statt dem proportionalen Zusammenhang eine Art (?) im Diagramm, also einen sprunghaften Anstieg der Hall-Spannung.
21. Das besondere an Quantencomputern ist, dass sie nicht wie normale Computer mit den beiden Zuständen 0 „Strom fließt nicht“ und 1 „Strom fließt“ arbeiten, sondern mit beiden Zuständen gleichzeitig, bzw. mit einer (?) der beiden.

1 – Aufgabe angepasst nach einem Vorbild von Schneider, S. (o. J.): Kreuzworträtsel Katze Q. Mädchenexperimentiercamp. TU Dresden.



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

N	I	C	H	T	-	D	E	T	E	R	M	I	N	I	S	T	I	S	C	H

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

1.) Ordne folgende Aussagen der klassischen Physik und/oder der Quantenphysik zu.

a) Die Objekte folgen deterministischen physikalischen Gesetzen.

- [x] klassische Physik
- [ ] Quantenphysik

b) Der Ausgang eines Experimentes ist nicht vorhersagbar.

- [ ] klassische Physik
- [x] Quantenphysik

c) Bei absolut identischer Wiederholung eines Experimentes erwartet man immer die gleichen Ergebnisse.

- [x] klassische Physik
- [ ] Quantenphysik

d) Ein Objekt kann sich zugleich in einer Überlagerung aus ganz unterschiedlichen Zuständen befinden.

- [ ] klassische Physik
- [x] Quantenphysik

e) Das Verhalten von Objekten unterliegt physikalischen Gesetzen.

- [x] klassische Physik
- [x] Quantenphysik

f) Bestimmt das Verhalten von Elektronen oder Atomen.

- [ ] klassische Physik
- [x] Quantenphysik

g) Erst durch die Beobachtung eines Objektes wird festgelegt, welche Eigenschaft das Objekt besitzt.

- [ ] klassische Physik
- [x] Quantenphysik

h) Gilt für makroskopische Objekte.

- [x] klassische Physik
- [ ] Quantenphysik

i) Es geht eher um Wahrscheinlichkeiten, als um exakte Vorhersagen.

- [ ] klassische Physik
- [x] Quantenphysik

j) Es gibt verschiedene Modelle, um ein Phänomen zu beschreiben.

- [x] klassische Physik
- [x] Quantenphysik

2.) Albert Einstein wird folgendes Zitat zugeschrieben:

"Die Definition von Wahnsinn ist, immer wieder das Gleiche zu tun und andere Ergebnisse zu erwarten."

Beurteile dieses Zitat in Hinblick auf die Quantenphysik.

Das Zitat baut auf der grundlegenden Idee der klassischen Physik auf: dem Determinismus. In einer klassisch-deterministischen Welt führt eine Versuchswiederholung unter exakt gleichen Umständen immer zum selben Ergebnis.

In der Quantenphysik ist die Welt nicht-deterministisch. Das heißt, Versuchsausgänge unterliegen dem Zufall, sodass auch bei gleichen Bedingungen unterschiedliche Ergebnisse erwartet werden können. Somit ist Einsteins Definition von Wahnsinn nur für eine klassische Welt, die Alltagswelt, sinnvoll. Nicht jedoch für Experimente zur Quantenphysik.

3. Grundbegriffe der klassischen Physik und der Quantenphysik

1.) Nenne möglichst viele physikalischen Größen, durch die der Zustand folgender Systeme festgelegt wird:

a) Ein Lichtstrahl, der sich durch ein Prisma bewegt.

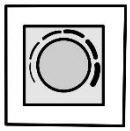
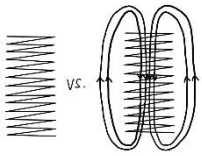
Richtung des Lichtstrahls, Zusammensetzung des Prismas, Form des Prismas, Farbe des Lichtes

b) 1 Liter Wasser in einem Topf.

Druck, Volumen, Temperatur, Form des Topfes, Material des Topfes, Umgebungsdruck, Umgebungstemperatur, Umgebungsvolumen, Zusammensetzung der Umgebungsluft

4. Qubits und Elektronenspin

1.) Welche der folgenden Systeme sind im Hinblick auf die angegebene Eigenschaft Zweizustandssysteme?

☒	Lichtschalter einer nicht dimmbaren Lampe (An-Aus-Status)		☐	Dimmschalter (Helligkeit der Lampe)	
☐	Schaltknüppel im Auto (eingelegter Gang)		☒	Autotür (Verriegelung)	
☒	Magnetfeld eines Elektromagneten, der nur an- und ausgeschaltet werden kann (Feldstärke)		☐	Wasserbad auf einem Herd (Temperatur)	

2.) Überlege dir selbst ein Beispiel für ein Zweizustandssystem. Nenne jeweils die Eigenschaft, die nur zwei Zustände besitzt und gib diese Zustände an.

a) aus deinem Alltag:

Ein Telefonhörer bzgl. seiner Position (aufgelegt vs. nicht aufgelegt)

b) aus der Optik:

Eine Fußgängerampel bzgl. ihrer aktuellen Farbe (z. B. rot vs. grün)

c) aus der Elektrizitätslehre:

Ein einfacher An-Aus-Schalter bzgl. seiner Schalterstellung (an vs. aus)

3.) Beschreibe mit eigenen Worten…

a) …was ein Zweizustandssystem ist.

Ein System, bei dem eine Eigenschaft (vereinfacht) nur zwei Werte annehmen kann.

b) …was der Elektronspin ist.

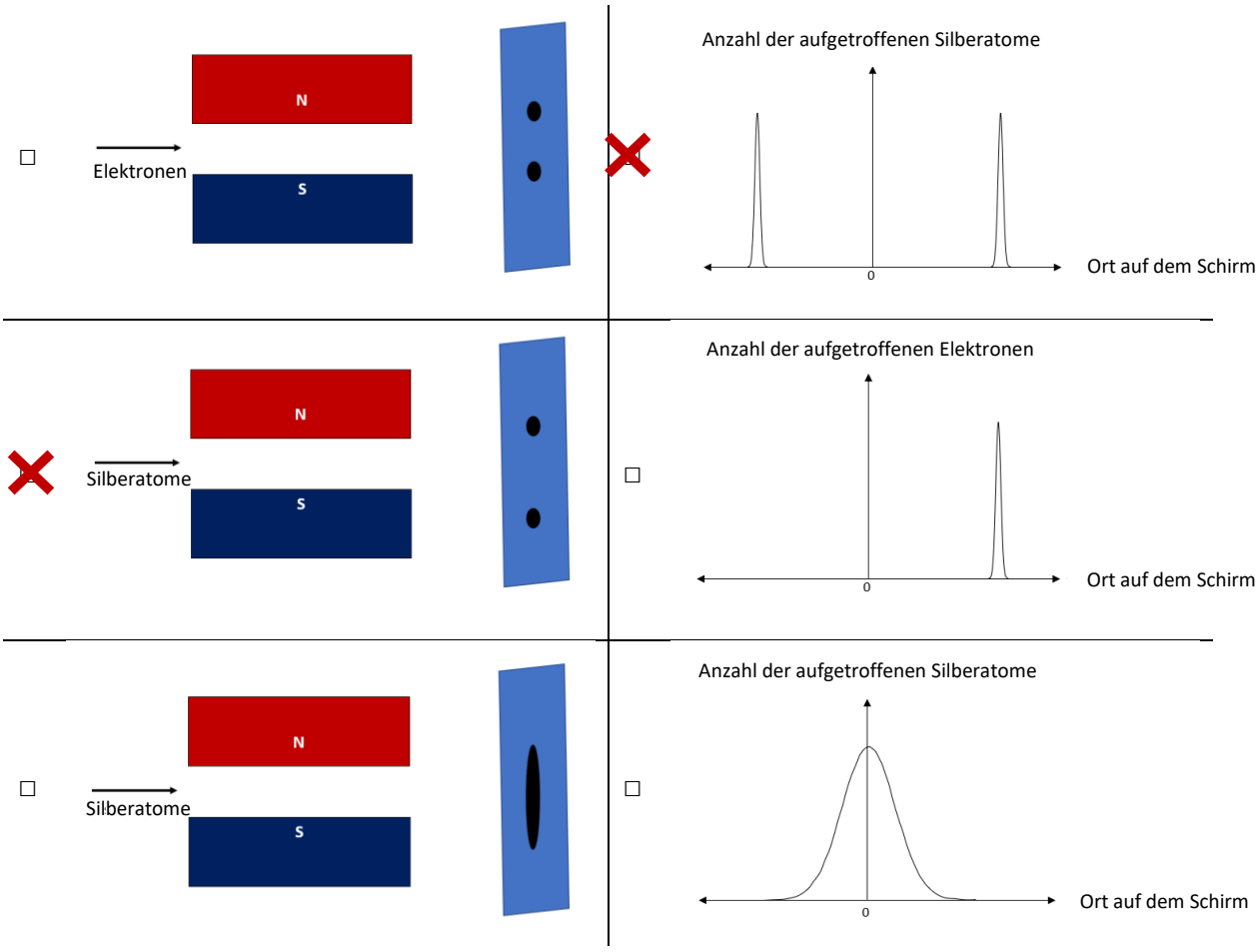
Er beschreibt die Ausrichtung des Stabmagneten, den man sich stellvertretend für das Elektron vorstellt / die magnetischen Eigenschaften des Elektrons

Darstellung: als Pfeil

c) …warum der Elektronenspin ein Beispiel für ein Qubit ist?

Das Elektron ist ein Quantenobjekt und der Spin besitzt (im Magnetfeld) nur zwei mögliche Messwerte / kann nur zwei Zustände annehmen.

4.) Das Stern-Gerlach-Experiment weist eine fundamentale Eigenschaft des Elektronenspins nach. Entscheide, welche der folgenden Grafiken zum Stern-Gerlach-Experiment passen.



5.) Das Stern-Gerlach-Experiment wird mit einem Strahl aus vielen einzelnen Silberatomen durchgeführt, die durch ein Magnetfeld laufen und dort abgelenkt werden. Das Außenelektron im Silberatom versuracht diese Ablenkung.

Das Experiment zeigt die magnetischen Eigenschaften des Außenelektrons von Silberatomen.

Überlege, warum man das Stern-Gerlach-Experiment in Realität nicht direkt mit einzelnen Elektronen durchführt, sondern die Elektronen in einem Atom dafür nutzt.

Hinweis: Einen Strahl aus s. g. „freien" Elektronen herzustellen, wäre technisch relativ einfach.

Silberatome sind elektrisch neutral, weil sich im Atom genauso viele Elektronen wie Protonen befinden. Würde man das Experiment nur mit freien Elektronen durchführen, würden sich diese wegen ihrer negativen Ladung gegenseitig abstoßen. Das würde das Ergebnis verfälschen, weil man dann nicht nur den Einfluss des Magnetfeldes, sondern auch der elektrischen Ladung misst.

6.) Elektronen verhalten sich wie winzige Stabmagneten und sind für den uns bekannten Magnetismus verantwortlich. Aber auch andere Teilchen, z. B. Protonen, besitzen ganz analog einen Spin und verhalten sich damit auch wie winzige Stabmagneten.

Der Spin von Protonen wird in einem MRT (Magnet-Resonanz-Tomograph) genutzt. Informiere dich über die grundlegende Funktionsweise eines MRT und erkläre, wie man den Spin von Protonen zur medizinischen Bildgebung nutzen kann.

/

5. Wesenszüge der Quantenphysik–Was macht die Quantenphysik aus?

Superposition

1.) Laufbänder sind an großen Flughäfen sehr beliebt, weil sich Passagiere mit ihrer Hilfe schneller durch große Flughafenterminals bewegen können. Die Grundidee solcher Laufbänder beruht auf dem Überlagerungsprinzip der klassischen Mechanik.

a) Erläutere, warum man sich mithilfe von Laufbändern schneller von einem Ort zum anderen kommt.

Hinweis: Überlege, warum man auf den Laufbändern gleichzeitig laufen muss, und nicht stehen bleiben darf, um schneller voran zu kommen.

Für Geschwindigkeiten gilt in der klassischen Physik das Superpositionsprinzip: Zwei Bewegungen können sich überlagern und ungehindert voneinander ablaufen. Läuft man auf dem Laufband in Fahrtrichtung, dann addieren sich die beiden Geschwindigkeiten von Laufband und vom Gehen zu einer größeren Gesamtgeschwindigkeit.

b) Ein Passagier möchte von Flugsteig A11 zu Flugsteig A13 gelangen, die über ein Laufband der Länge von 30 Meter verbunden sind. Das Laufband hat eine Geschwindigkeit von $v_{\mathrm{L}} = 1\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$. Der Passagier läuft mit einer Geschwindigkeit von $v_{\mathrm{P}} = 1{,}5\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$.

Berechne, wie lange der Passagier benötigt, um von Flugsteig A11 zu Flugsteig A13 über das Laufband zu gelangen.

$$\boldsymbol{v_{\mathrm{ges}} = 1\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} + 1{,}5\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} = 2{,}5\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}$$

$$\boldsymbol{v = \frac{s}{t} \Rightarrow t = \frac{s}{v} = \frac{30\ \mathrm{m}}{2{,}5\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}} = 12\ \mathrm{s}}$$

2.) Superposition von Zuständen ist etwas höchst Unanschauliches. Entsprechend schwierig ist es auch, über die Superposition von Zuständen mit unserer gewohnten Sprache zu sprechen.

Bei Quantenobjekten haben wir bisher gesagt, sie können so präpariert werden, dass sie in mehreren Zuständen *gleichzeitig* vorliegen.

Überlegen dir weitere Formulierungen, um das Wesen der Superposition auszudrücken, und argumentiere, wie geeignet sie jeweils sind.

Z. B. „teilweise“ scheint ebenfalls geeignet zu sein, da die Komponenten der Zustände (genauer: Zustandsvektoren) als Bestandteile des Gesamtzustandes gesehen werden können. Dennoch birgt auch die „teilweise“-Formulierung Gefahr für mögliche Missverständnisse, weil der Begriff aus der Alltagssprache mit verschiedenen Assoziationen verknüpft ist (Woitzik, Andreas J. C.; Passon, Oliver (2023): Fehlvorstellungen zur Superposition in der Quantenphysik.)

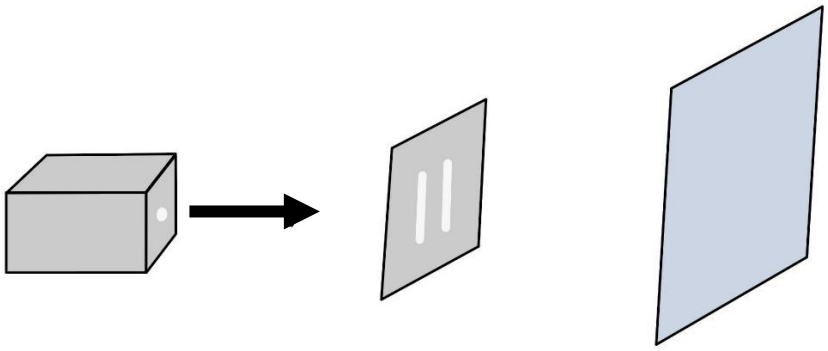
Messprozess

3.) Entscheide, welche der folgenden Aussagen zur klassischen Messung und/oder zum quantenmechanischen Messprozess passen und kreuze an.

	klassische Messung	quanten-mechanischer Messprozess
Der Zerfall eines radioaktiven Atoms wird mit einem Zählrohr nachgewiesen.		✕
Vor dem Messen steht das Messergebnis bereits fest.	✕	
Durch das Messen wird der Superpositionszustand zerstört.		✕
Die Wetterstation in Dresden Klotzsche misst die aktuelle Windgeschwindigkeit.	✕	
Messapparat und zu messendes Objekt beeinflussen einander fundamental.		✕
Der Spin eines Elektrons wird mithilfe einer Stern-Gerlach-Maschine bestimmt.		✕
Das Messen erzeugt erst die zu messende Eigenschaft.		✕

Superposition und Messprozess

4.) Ein Elektron bewegt sich auf einen Schirm zu, der zwei kleine und eng beieinanderliegende Spalten besitzt, durch die das Elektron hindurchlaufen kann.



a) Das Elektron wird nach dem Durchlaufen des Spaltes zunächst nicht detektiert und bleibt unbeobachtet. Beschreibe den Zustand des Elektrons in Hinblick auf den durchlaufenen Spalt. Kann man in diesem Moment sagen, dass es durch Spalt A oder Spalt B gelaufen ist?

Das Elektron befindet sich in einer Superposition aus „Spalt A durchlaufen“ und „Spalt B durchlaufen“. Darum kann man nicht sagen, durch welchen Spalt es gelaufen ist.

b) Kurz danach wird der Ort des Elektrons mithilfe eines Lichtblitzes hinter Spalt B detektiert. Kann man in diesem Moment sagen, dass es durch Spalt A oder B gelaufen ist?

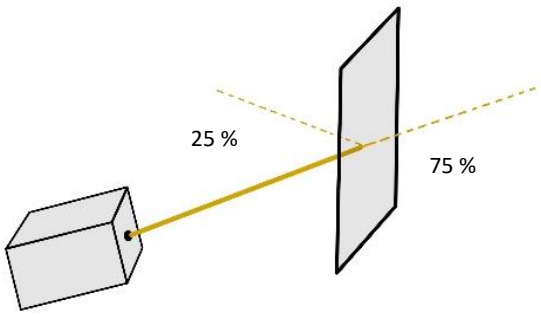
Das Elektron befindet sich nun im Zustand „Spalt B durchlaufen“, weil der Messprozess die Superposition zerstört hat. Man kann aber dennoch nicht sagen, durch welchen Spalt es gelaufen ist, weil der Messprozess erst danach stattgefunden hat. Man kann nur sagen, dass es sich vom Moment des Messprozesses an so verhält, als wäre es durch Spalt B gelaufen.

5.) In Deutschland gibt es das Sprichwort „Man kann nicht auf zwei Hochzeiten gleichzeitig tanzen“: Beurteile die Aussage des Sprichwortes in Bezug auf Superposition und Messprozess bei einem Quantenobjekt.

Das Sprichwort beschreibt die alltägliche Tatsache, dass man nicht mehre Dinge gleichzeitig tun kann bzw. an zwei Orten gleichzeitig sein kann. In gewisser Weise gilt diese Regel in der Quantenphysik nicht mehr: solange kein Messprozess stattfindet, können sich Quantenobjekte in einer Superposition befinden. Dabei handelt es sich um eine Art Gleichzeitigkeit verschiedener Zustände. Aus dieser Superposition heraus kann allerdings keine Gleichzeitigkeit im alltäglichen Sinne abgleitet werden, weil die Superposition nur vorliegen kann, wenn jede Wechselwirkung/Interkation mit der Umwelt unterbunden ist.

Statistische Vorhersagbarkeit

6.) Ein Photon, also ein Lichtquant, trifft auf einen teilweise durchlässigen idealen Spiegel. Der Spiegel ist so konstruiert, dass er im Schnitt 75% aller auftreffenden Photonen transmittiert (also hindurchlässt). Alle anderen Photonen werden reflektiert (also zurückgeworfen).



a) Ein Photon trifft auf den Spiegel. Kann man vorhersagen, ob das Photon den Spiegel durchquert oder an ihm reflektiert wird?

Nein, es handelt sich um einen quantenmechanischen Versuch, dessen Ausgang zufällig ist.

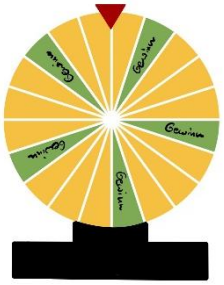
b) 10 Photonen treffen auf den Spiegel. Kann man vorhersagen, wie viele Photonen davon den Spiegel durchqueren und wie viele reflektiert werden?

Nur bedingt, bei 10 Photonen kann man noch keine sichere Vorhersage treffen. Vermutlich werden ca. 7-8 Photonen den Spiegel durchqueren, aber es sind durchaus auch weniger oder mehr möglich.

c) 10.000 Photonen treffen auf den Spiegel. Kann man vorhersagen, wie viele Photonen davon den Spiegel durchqueren und wie viele reflektiert werden?

Klassische Physik, bei einer so großen Anzahl von Photonen kann man relativ sicher sagen, dass ca. 7.500 Photonen den Spiegel passieren werden. Es können auch ein paar weniger oder mehr sein, aber bei so vielen Photonen kann man damit rechnen, dass ca. 75% den Spiegel durchqueren werden.

7.) Das Glücksrad bei einem Jahrmarkt besitzt insgesamt 20 gleich große Felder. Fünf Felder markieren den Hauptgewinn und die restlichen Felder sind Nieten.



a) Mit welcher Wahrscheinlichkeit erhält ein:e Besucher:in beim zweimaligen Drehen des Glücksrades zwei Hauptgewinne?

$$p = \frac{5}{20} \cdot \frac{5}{20} = \frac{25}{400} = \frac{1}{16} = 0,0625 = 6,25\%$$

b) Wie viele Hauptgewinne kann man erwarten, wenn das Glücksrad 400-mal gedreht wird?

$$400 \cdot \frac{5}{20} = 100$$

c) Inwiefern unterscheidet sich das Glücksrad von dem teilweise durchlässigen Spiegel aus Aufgabe 6?

Das Glücksrad ist im Prinzip deterministisch. Wenn man das Rad und die Art, mit der es gedreht wird, exakt kennt, kann man das Ergebnis vorhersagen – auch beim einmaligen Drehen. Beim teildurchlässigen Spiegel ist das nicht möglich, hier unterliegt das Versuchsergebnis rein dem Zufall.

Zufallszahlengenerator

8.) Zufallszahlen werden in verschiedensten Bereichen des Alltags benötigt: beim Glücksspiel, in der Statistik, zur Simulation oder für sichere Verbindungen bei Messengern und Online-Banking.

a) Mit deinem CAS kannst du im Main-Menü Zufallszahlen erzeugen. Indem man mit ▼ ein Fenster weitergeht, lässt sich mit Catalog der Befehls-Katalog öffnen und eine Liste von Zufallszahlen erzeugen.

Hinweis: Der zugehörige Befehl heißt ***randList(n,a,b)****. Dabei gibt* ***n*** *die Anzahl der Elemente der Liste an, und* ***a*** *bzw.* ***b*** *die untere bzw. obere Grenze der Zufallszahlen.*

Simuliere zehn Würfe mit einer Münze. Erzeugen Sie hierdurch eine 10-stellige Zufallszahl aus Nullen und Einsen.

Beispiel: 0,0,0,1,1,1,0,1,0,1 → 0001110101

b) Computer und Taschenrechner erzeugen Zufallszahlen mithilfe eines Algorithmus, also einer Rechenvorschrift. Darum sind die Zufallszahlen von Computern nicht wirklich „zufällig“, sondern theoretisch vorhersagbar. Man nennt sie darum auch „Pseudo-Zufallszahlen“.

Für neue und sichere Verschlüsselungsverfahren werden aber „echte“ Zufallszahlen benötigt, die unter keinen Umständen vorhergesagt werden können.

Überlege dir, du mithilfe der Quantenphysik einen „Quantenzufallsgenerator“ bauen könntest, der eine echte 10-stellige Zufallszahl aus Nullen und Einsen liefert.

Beispiel: Man nutzt einen halbdurchlässigen Spiegel und schickt einzelne Lichtteilen (Photonen) auf den Spiegel. Geht das Photon durch den Spiegel hindurch, entspricht das einer 1, wird es reflektiert, entspricht das einer 0. Dieser Versuch wird 10-mal wiederholt. Alternativ kann das Experiment auch mit einem Stern-Gerlach-Apparat durchgeführt werden.

c) Es gibt bereits Smartphones, die für sicheres Online-Banking Quantenzufallsgeneratoren eingebaut haben. Informiere dich über die zugrundeliegende Funktionsweise eines ausgewählten Modells.

/

9.) Beim Gedankenexperiment „Schrödingers Katze“ befinden sich ein radioaktives Atom, ein Hammer, eine Giftampulle und eine Katze in einer blickdicht verschlossenen Box. Entscheide und begründe, ob zwischen Katze und radioaktivem Atom ein verschränkter Zustand vorliegt.

Bei Schrödingers Katze ist das radioaktive Atom über Hammer und Giftampulle mit der Katze verschränkt. Das System aus Hammer und Katze kann nämlich nur im Ganzen betrachtet werden – und sobald man den Zustand des einen Objektes weiß, ist automatisch der des anderen Objekts festgelegt.

6. Dekohärenz - Zusammenhang zwischen klassischer Physik und Quantenphysik

1.) Erkläre mit deinen eigenen Worten, warum sich makroskopische Objekte (z. B. eine Katze oder ein Ball) in unserem Alltag nicht in einem quantenmechanischen Superpositionszustand befinden können bzw. warum man solch eine Superposition niemals wahrnehmen könnte.

Makroskopische Objekte wie ein Ball bestehen aus einer riesigen Anzahl einzelner Atome, Elektronen und Co., die ständig mit ihrer Umwelt interagieren, etwa mit Luftmolekülen, Licht oder Wärmestrahlung. Außerdem wechselwirken z. B. auch die Atome untereinander. Jede dieser Interaktionen bzw. Wechselwirkungen ist eine Art Messprozess und löst die Superposition des makroskopischen Objektes ein wenig auf. In der Summe wird die Superposition von makroskopischen Objekten, sofern sie überhaupt in diesem Zustand werden präpariert könnten, unfassbar schnell aufgelöst, die Dekohärenzzeit ist unvorstellbar kurz.

Wahrnehmen bzw. sehen könnte man eine Superposition prinzipiell nicht – etwas zu sehen setzt voraus, dass das Objekt mit Licht interagiert (es reflektiert), was einen Messprozess darstellt und die Superposition damit aufgelöst wird.

2.) Ein Atom besitzt eine typische Masse von etwa 10^{-27} kg. Eine (etwas dicke) Katze eine Masse in der Größenordnung von ca. 10 kg. Ein Atom besitzt unter Alltagsbedingungen bereits eine Dekohärenzzeit, die nur Bruchteile einer Sekunde beträgt.

a) Berechne, wie viel kürzer die Dekohärenzzeit der Katze im Vergleich zum Atom ist.

$t_D \propto \frac{1}{m}$ → Eine Katze ist 10^{28}-mal schwerer als ein Atom, also ist die Dekohärenzzeit der Katze ca. 10^{-28} mal kleiner als die eines einzelnen Atoms.

b) Begründe auf Grundlage dieses Ergebnisses, warum man den quantenmechanischen Superpositionszustand bei einer normalen Katze nicht beobachten kann.

Die Dekohärenzzeit einer Katze ist unvorstellbar kurz – sehr viel kürzer als die eines einzelnen Atoms. Darum können wir den quantenmechanischen Superpositionszustand bei einer normalen Katze nicht beobachten, denn er wird durch die Dekohärenz, also durch die Wechselwirkung mit der Umgebung, praktisch sofort wieder zerstört.

3.) Für die Dekohärenzzeit eines makroskopischen Objektes gilt näherungsweise: Je größer die Masse des Objektes ist, umso kleiner ist die Dekohärenzzeit.

Begründe diesen Zusammenhang anschaulich.

Ein schweres Objekt besteht i. d. R. aus mehr Protonen, Elektronen, etc., als ein leichtes Objekt. Jedes dieser Objekte kann mit anderen Objekten wechselwirken und verliert damit seinen Superpositionszustand. Schwere Objekte bestehen aus viel mehr Teilchen, wobei jedes Teilchen die Wahrscheinlichkeit erhöht, mit der Umgebung oder mit den anderen Teilchen in einer bestimmten Zeitspanne zu wechselwirken und die Superposition damit zu zerstören.

4.) Ein winziges Objekt wird in einem Labor in eine Superposition gebracht. Welche der folgenden Maßnahmen sorgen für eine Vergrößerung der Dekohärenzzeit?

- [x] Verringerung des Drucks (Vakuum)
- [ ] Erhitzen der Probe
- [x] Nutzung eines erschütterungsfreien Tisches
- [x] Verdunkeln des Raumes
- [ ] regelmäßiges und häufiges Messen

7. Anwendungen von Qubits: Quantencomputer

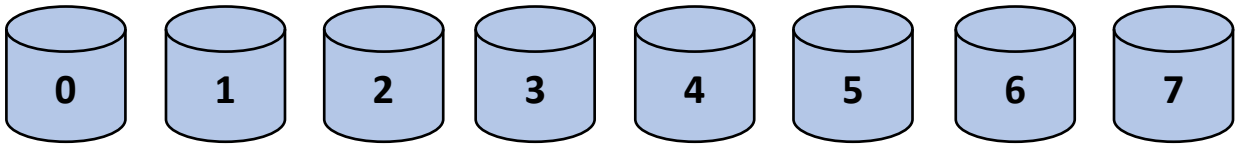
Exponentielles Wachstum

1.) In einem Teich wächst eine Seerose und verdoppelt jeden Tag die Fläche, die sie auf der Wasseroberfläche bedeckt. Nach 45 Tagen ist bereits der halbe Teich von der Seerose bedeckt.

Bestimme, nach wie vielen Tagen der gesamte Teich von der Seerose bedeckt ist.

Nach einem weiteren Tag, also nach 46 Tagen insgesamt.

2.) Vor dir liegen acht Keksdosen, nummeriert von 0 bis 7.



In einer dieser Keksdosen befinden sich deine Lieblingskekse. Im konkreten Fall befinden sich die Lieblingskeks in Dose Nummer 6.

Entscheide und begründe, wie viel Information in der Aussage „Meine Lieblingskeks befinden sich in Dose Nr. 6“ enthalten ist, also wie viel Bits zur Speicherung dieser Information benötigt werden.

Variante 1: rechts – rechts – links

Variante 2: 011 (Binärsystem)

In jedem Fall 3 Bits

3.) Ergänze folgenden Lückentext.

Wörter: *gleichzeitig, Hybrid-Quantencomputer, zwei, QuBits, Superposition, häufigsten, Superposition, parallel, verdoppelt, parallel, statistischen Charakter*

Ein Quantencomputer nutzt zur Datenverarbeitung im Gegensatz zu einem klassischen Computer statt Bits s. g. **QuBits**.
Damit macht sich ein Quantencomputer vor allem den Wesenszug der **Superposition** zunutze: der Quantencomputer kann **gleichzeitig** alle möglichen Rechenoperationen ausführen. Die Rechnungen laufen also **parallel** ab, während ein klassischer Computer sie **nacheinander** ausführen muss.

Während bei einem klassischen Computer durch das Hinzufügen eines Bits die Rechenleistung nur geringfügig vergrößert wird, **verdoppelt** die Zugabe eines Qubits bei einem Quantencomputer die Rechenleistung – denn ein einzelnes Qubit kann zugleich exakt **zwei** Zustände in der Superposition annehmen. Damit die Qubits zusammenarbeiten, müssen sie allerdings untereinander **verschränkt** sein.

Das Auslesen der Rechenergebnisse ist eines der Probleme von Quantencomputern, denn es stellt einen Messprozess dar. Darum können nur Endergebnisse ausgelesen werden. Eine Rechnung muss wegen des **statistischen Charakters** mehrfach widerholt werden. Das gewünschte Ergebnis ist dann dasjenige, das am **häufigsten** ausgelesen wurde (zumindest bei einem gut funktionierenden Algorithmus).

Quantencomputer werden wir wohl nicht einfach als Ersatz für klassische Computer nutzen können, weil sie nur sehr spezielle Aufgaben lösen können und sehr empfindlich sind. Es ist aber vorstellbar, dass man s. g. **Hybrid-Quantencomputer** einsetzt – eine Mischung aus klassischem Computer für Bedienung und Standardaufgaben und Quantencomputer zur extrem effizienten Berechnung komplexer und geeigneter Probleme.

4.) Es gibt verschiedene Arten, Quantencomputer und damit vor allem Qubits in der Realität umzusetzen. Ziel ist i. d. R. eine möglichst lange Dekohärenzzeit und eine geringe Fehleranfälligkeit.

Informiere dich über eine konkrete Realisierung von Quantencomputern bzw. Qubits.

Z. B. Josephson-Kontakte (supraleitende Quantencomputer), Ionenfallen, Stickstoff-Fehlstellen in Diamanten, Phononen, …

Platz für deine Notizen

Platz für deine Notizen

Platz für deine Notizen


DRESDEN
concept
SCIENCE AND
INNOVATION CAMPUS


Leibniz
Gemeinschaft