



Quantenphysik

Von Schrödingers Katze
zum Quantencomputer

Lehrerhandreichung

Hinweise für Lehrkräfte
zu fachlichen, didaktischen und
organisatorischen Aspekten

Didaktik der Physik
bildungswissenschaftliches Studienprojekt
Qubits4Pupils

Carsten Albert,
Dresden 2026

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/>



Vorwort

Quantenphysik ist ein extrem spannendes und hoch aktuelles Feld der Physik und gleichzeitig die wohl erfolgreichste naturwissenschaftliche Theorie. Ich freue mich daher sehr, dass Sie sich dazu entschieden haben, Ihre Schülerinnen und Schüler der Klassenstufe 9 mit auf eine Reise in dieses besondere Teilgebiet der Physik zu nehmen.

Der Unterricht zur Quantenphysik im Rahmen meines Promotionsprojekts „Qubits4Pupils“ wird neben klassischen unterrichtlichen Phasen punktuell auch wissenschaftliche Datenerhebungen beinhalten. Auf den folgenden Seiten finden Sie alle Informationen zum Unterrichtskonzept sowie zum Ablauf der wissenschaftlichen Studie.

Ich wünsche Ihnen und Ihren Schülerinnen und Schülern eine spannende Zeit mit der Quantenphysik. Herzlichen Dank für Ihre Teilnahme!

Wie ist das Konzept entstanden?

Vorab möchte ich Ihnen noch diese sehr berechtigte Frage beantworten – auch, damit Sie manche der Entscheidungen besser nachvollziehen können.

Quantenphysik ist mittlerweile auch im Bereich der Schule ein recht intensiv erforschtes Gebiet. Auch wenn wir Vieles noch nicht wissen, haben wir doch zumindest in gewissen Grenzen mittlerweile Erkenntnisse dazu, wie das Lernen von Quantenphysik funktioniert.

Bei der Entwicklung des Konzeptes wurden zunächst diese Erkenntnisse zum Lernen von Quantenphysik, etwa zu **Fehlvorstellungen oder Lernhürden**, in den Blick genommen. Besonders wichtig waren dabei auch neuere Ansätze und Ideen, die gut begründet einen anderen Weg einschlagen als „traditionelle“, meist eher historisch geprägte Lehrkonzepte zur Quantenphysik. Gleichzeitig wurde das Konzept unter der Zielstellung einer zeitgemäßen Kontextorientierung entwickelt und greift daher das Thema Quantencomputing als spannenden hochaktuellen Kontext auf.

Nach dem Entwurf des Konzeptes wurde es ausgiebig in der Praxis getestet. Das geschah zunächst mit einzelnen Schülerinnen und Schülern in der Form von Interviewstudien. Im zweiten Halbjahr des Schuljahres 2022/23 wurde es vom Studienautor im regulären Unterricht oder in Ferienkursen erprobt und immer wieder angepasst. Schlussendlich fand eine groß angelegte Evaluationsstudie mit über an 17 Schulen statt, die wissenschaftlich ausgewertet wurde. Anschließend wurde das Konzept sowie das Material final überarbeitet. Nun sehen Sie das Resultat dieser Entwicklungsstufen.

Carsten Albert, Studienautor

Zur Nutzung dieser Handreichung

Kapitel 1 beschäftigt sich mit dem Unterrichtskonzept und zentralen Gestaltungsideen und -prinzipien. Dort finden Sie auch Informationen zu verbindlichen und fakultativen Aspekten des Konzeptes.

In **Kapitel 2** erhalten Sie Hintergrundinformationen, z. B. Begründungen für Entscheidungen zum Aufbau des Konzeptes.

Im **Anhang** finden Sie einen Überblick über Unterrichtsmaterialien, die ergänzend zu Lehrbuch und Arbeitsheft zur Verfügung stehen.

Hinweis:

**Alle Materialien und Links finden Sie im internen
Bereich auf der Website**

klasse9.quantenunterricht.de

**Dort wird künftig auch die Dissertation mit den
Evaluationsergebnissen verlinkt sein.**

Inhalt

Vorwort	2
Wie ist das Konzept entstanden?	2
Zur Nutzung dieser Handreichung	2
Einleitung	5
Motivation zum Konzept	5
Kapitel 1: zum Unterrichtskonzept	6
1.1. Unterrichtspraktische Eckpunkte	7
1.2. Didaktische Kerngedanken	8
1.3. Unterrichtliche Umsetzung	10
Kapitel 2: ergänzende Hintergrundinformationen	13
2.1. Fachliche Hinweise und Hintergrundinformationen	14
2.2. Häufige Schülerfragen	21
2.3. Wissenschaftliche (fachdidaktische) Begründung für das Konzept	26
Anhang: Materialien zum Unterrichtskonzept	31
I. Stoffverteilungsplan (als Orientierung)	32
II. Linkliste zu Mentimeter und Kahoot	33
III. Arbeitsblätter (Schülervariante)	34
IV. Arbeitsblätter (Lösungen)	53
V. Exemplarische Leistungskontrolle mit Erwartungshorizont	67
VI. Exemplarische Stundenverlaufsplanungen	71

Einleitung

Motivation zum Konzept

Die Quantenphysik gilt als eine der erfolgreichsten Theorien überhaupt, ist wesentlicher Baustein für unser naturwissenschaftliches Weltbild und ermöglichte einen unglaublichen technischen Fortschritt. Mittlerweile stehen wir als Gesellschaft vor einer zweiten Quantenrevolution - Quantencomputer, Quantenkryptografie oder Quantensensorik sind keine leeren Begriffe, sondern bereits heute Realität in unseren Forschungslaboren.

Der Quantenphysik wird darum zunehmend ein allgemeinbildender Charakter zugeschrieben – dennoch ist sie (noch) fast ausschließlich Thema in der gymnasialen Oberstufe. Doch gerade in Hinblick auf die freie Kurswahl der Oberstufe scheint ein erster qualitativer Kontakt mit der Quantenphysik in der Mittelstufe umso sinnvoller.

Ziel des vorliegenden Konzeptes ist eine qualitative Einführung in die Quantenphysik im Unterricht der Mittelstufe. Das Konzept vermittelt dabei inhärente Wesenszüge der Quantenphysik auf Grundlage von Zweizustandssystemen – den einfachsten physikalischen Systemen. Dabei sind die Inhalte so entwickelt, dass einfache mathematische Vorkenntnisse ausreichend sind und keine Vorkenntnisse aus der Wellenmechanik benötigt werden. Außerdem liegen dem Konzept zahlreiche Überlegungen zur Vermeidung bekannter Lernschwierigkeiten in der Quantenphysik zugrunde – etwa durch eine klare Begriffsbildung oder durch die Vermeidung der Wellenfunktion. Stattdessen erfolgt eine Konzentration auf wesentliche und qualitativ diskutierte Grundprinzipien, die sich im Bedarfsfall später z. T. auch quantitativ erweitern lassen.

Kapitel 1

zum Unterrichtskonzept



1.1. Unterrichtspraktische Eckpunkte

Zielgruppe



Schulart
Gymnasium



Klassenstufe
9



Fach
Physik oder NaWi/MINT-Profilunterricht

Benötigtes Vorwissen



Stochastik
Wahrscheinlichkeitsbegriff



Stochastik
Gesetz der großen Zahlen



Physik
Magnetismus

Zeitlicher Rahmen



Gesamtdauer des Unterrichtes
ca. 7-8 Doppelstunden

Großlernziele

Kognitiv:

Die Schülerinnen und Schüler ...

1. ... kennen die **Grundprinzipien** (Determiniertheit/Charakter) von physikalischen Messvorgängen in der klassischen Physik und in der Quantenphysik.
2. ... beschreiben wesentliche Grundbegriffe und Phänomene der Quantenphysik anhand des **Elektronenspins**.
3. ... entwickeln entlang der **Wesenszüge** quantenphysikalische Vorstellungen, die sie von den Konzepten klassischer physikalischer Theorien abgrenzen.
4. ... erläutern den Zusammenhang zwischen klassischer Physik und Quantenphysik anhand der **Dekohärenztheorie**.
5. ... erläutern das Grundprinzip von **Quantencomputern** mithilfe der Wesenszüge der Quantenphysik.

Affektiv:

Die Schülerinnen und Schüler ...

1. ... entwickeln **Interesse** an Quantenphysik und steigern ihr Interesse an Physik.
2. ... sind intrinsisch **motiviert** beim Absolvieren des Kurses.

Unter **Grundbegriffen** werden dabei Begriffe wie Nicht-Determinismus, Präparation, Zustand, Elektronen-Spin oder Qubit verstanden.

Unter **quantenphysikalischen Phänomenen und Konzepten** sind zentrale Ideen wie Nicht-Determinismus, aktiver Charakter von Messprozessen, Superposition, Eindeutigkeit von Messergebnissen, statistisches Verhalten sowie Verschränkung zu verstehen.

Beim Kennen des **Grundprinzips von Quantencomputern** soll eine qualitative Diskussion ohne Details zu Algorithmen(-laufzeiten) oder zu Quantengattern im Fokus stehen.

1.2. Didaktische Kerngedanken

Zugang und Zielorientierung

Im Gegensatz zu bisherigen Quantenphysik-Konzepten (insbesondere für die Oberstufe), bei denen vor allem historische Experimente und der Welle-Teilchen-Dualismus im Fokus stehen, soll der Zugang über einen s. g. „Spin-First“-Ansatz geschehen. Das heißt, Begriffe und Phänomene der Quantenphysik werden an einem **exemplarischen Zweizustandssystem** (Qubit) eingeführt. Als exemplarisches **Zweizustandssystem** wird der Elektronenspin (Spin $\frac{1}{2}$ -Teilchen) im externen Magnetfeld genutzt.

Im Fokus stehen explizit keine historischen Inhalte oder Experimente wie der Photoeffekt, sondern die Vermittlung **fundamentaler Prinzipien und Begriffe**. Aus der Vielzahl möglicher relevanter Aspekte wurden diejenigen ausgewählt, die für ein grundlegendes Verständnis der Arbeitsweise von **Quantencomputern** benötigt werden.

Leitlinien / Design-Prinzipien

Folgende **didaktischen Grundsätze** liegen dem Kurskonzept zugrunde:



Aufbau auf quantenphysikalischen
Zweizustandssystemen (Qubits)



vollständiger Verzicht auf das Konzept von Wellen
(insbesondere auf Wellenfunktion und Welle-Teilchen-Dualismus)



klare Begriffsbildung und Sprachsensibilität



Phänomen- und Konzeptorientierung



Erarbeitung von Phänomen entlang klar definierter
Wesenszüge



Abgrenzung und Zusammenhang zwischen
Quantenphysik und klassischer Physik herausarbeiten

Unterrichtssprache und begriffliche Besonderheiten

In zahlreichen Untersuchungen und auch in den Unterrichtsversuchen zu diesem Unterrichtskonzept hat sich gezeigt, dass Sprache ein wesentlicher Baustein beim Unterrichten von Quantenphysik ist. So ist eine Erkenntnis aus den zu diesem Konzept durchgeführten Interviewstudien, dass das Sprechen über Quantenphysik manchmal sogar schwieriger sein kann, als ein reines inhaltliches Verständnis.

Darum sind sehr bewusst einige **begriffliche Besonderheiten** eingebaut, die **fester und obligatorischer Bestandteil** des Lehrkonzeptes sind:

Fachaspekt	Begriffe im Unterricht	Bemerkungen
Messvorgänge in der klassischen Physik haben passiven Charakter, während in der Quantenphysik Messwerte/Eigenschaften vor einem Messvorgang unbestimmt sind.	(passive) Messungen in der klassischen Physik $\leftrightarrow$ (aktive) Messprozesse in der Quantenphysik	<i>Dient der Abgrenzung zwischen klassischer Physik und Quantenphysik, um ein Vermischen von Konzepten zu verhindern.</i>
Messergebnisse der klassischen Physik sind determiniert. In der Quantenphysik unterliegen einzelne Messergebnisse i. d. R. dem Zufall und nur die Wahrscheinlichkeitsverteilung ist determiniert.	Determinismus in der klassischen Physik $\leftrightarrow$ Nicht-Determinismus in der Quantenphysik	<i>Der eigentliche Fachbegriff für die Quantenphysik heißt „Indeterminismus“. Es zeigte sich in den Pilotstudien jedoch, dass SuS mit „Nicht-Determinismus“ besser zurechtgekommen sind.</i>
Quantenobjekte können sich in einer quantenphysikalischen Superposition aus Zuständen befinden. Für klassische Objekte gilt das Superpositionsprinzip auch, allerdings nicht in Bezug auf Zustände, sondern z. B. auf klassische vektorielle Eigenschaften wie Geschwindigkeiten oder Kräfte.	Überlagerung in der klassischen Physik $\leftrightarrow$ Superposition in der Quantenphysik	<i>Dient der Abgrenzung zwischen klassischer Physik und Quantenphysik, um ein Vermischen von Konzepten zu verhindern.</i>
Nach Durchführung eines Messprozesses befindet sich ein Quantenobjekt bzgl. der Messbasis nicht mehr in einem Superpositionszustand.	Auflösen der Superposition	<i>In Anlehnung an den „Kollaps der Wellenfunktion“. Allerdings widerspricht „Kollaps“ als unstetige Zustandsänderung der später eingeführten Dekohärenztheorie und die Wellenfunktion wird nicht eingeführt, sondern nur das Phänomen der Superposition.</i>
Einzelne Messergebnisse sind i. d. R. zufällig.	Einzel-Prinzip	<i>Unterrichtssprache zur Verdeutlichung des Phänomens.</i>
Messergebnisse an sehr vielen gleichartig präparierten Quantenobjekten können im statistischen Rahmen vorhergesagt werden.	Ensemble-Prinzip	<i>Unterrichtssprache zur Verdeutlichung des Phänomens.</i>
Experiment zur Verschränkung nach Einstein, Podolsky und Rosen	EPR-Experiment	<i>Früher war der Begriff EPR-„Paradoxon“ verbreitet. Hier wird vom (mittlerweile real durchgeführten) „Experiment“ gesprochen.</i>

Bitte führen Sie zudem unbedingt die Begriffe „Basiszustand“ und „Präparation“ ein.

1.3. Unterrichtliche Umsetzung

Grober Ablauf

Vorab: Einführung

- Zu Beginn des Kurses wird nach einer kurzen Einleitung der **Quantencomputer** als hochaktuelles spannendes Thema vorgestellt, auch z. B. in Hinblick auf Algorithmus/Primfaktorzerlegung.
- Außerdem werden die **Themengebiete der Physik** (klassische vs. moderne Physik) im Sinne einer Strukturierung/Systematisierung herausgearbeitet.

1. Klassische Physik

- Zunächst soll auf die Paradigmen der **klassischen Physik** näher eingegangen werden.
- Dazu zählt das explizite Herausarbeiten des **deterministischen** Wesens der klassischen Physik sowie der (passiven) Rolle des **Messens** in der klassischen Physik.

2. Paradigmenwechsel

- Nachdem die Grundprinzipien der klassischen Mechanik erarbeitet und formuliert wurden, sollen die Schülerinnen und Schüler mithilfe des Spiels **Katze Q** einen ersten Eindruck von der Quantenphysik bekommen.
- Darauf aufbauend wird der „**Nicht-Determinismus**“ als Grundprinzip der **Quantenphysik** sowie der aktive Charakter quantenphysikalischer **Messprozesse** eingeführt.

3. Grundbegriffe

- Die für die Quantenphysik zentralen Begriffe des **Zustandes**, der **Eigenschaft**, und der **Präparation** sollen definiert und an Beispielen illustriert werden.

4. Qubits

- Im Zentrum des Kurses steht ein **Zweizustandssystem**. Im Unterricht dient der **Spin** eines Spin-1/2-Teilchens (**Elektron**) bzw. dessen magnetisches Moment als exemplarisches Zweizustandssystem.
- Der Spin wird über seine **magnetische Wirkung** in einer Stabmagnet-Analogie eingeführt (nicht als Drehimpuls). Seine Quantisierung wird durch den Stern-Gerlach-Versuch erarbeitet.
- Quantenmechanische Zweizustandssysteme werden im Kurs als „**Qubits**“ bezeichnet.

5. Wesenszüge

- Anhand des beschriebenen Zweizustandssystems können alle **vier Wesenszüge** (Superposition → Messprozess → statistischer Charakter → Verschränkung) diskutiert werden.
- Die **Superposition** wird zunächst in ihrer klassischen, und dann in ihrer quantenmechanischen Bedeutung in Bezug auf Zustände erarbeitet.
- Der **Messprozess** wird durch einen „Auflösen der Superposition“ definiert und liefert eindeutige Messergebnisse.
- Der **statistische Charakter (Einzel- und Ensemble-Prinzip)** ergibt sich aus dem Superpositionsprinzip und dem Charakter des Messprozesses, zusammen mit dem Gesetz der großen Zahlen.
- Die **Verschränkung** wird mit dem EPR-Experiment eingeführt und dem Phänomen wird eine Korrelationsart ("Münzen-Korrelation") zugeordnet.

6. Dekohärenz

- Auf Grundlage der Wesenszüge soll die Kernidee der **Dekohärenztheorie** erarbeitet werden. Dabei wird herausgearbeitet, dass die Wesenszüge der Quantenphysik auf makroskopischen Skalen aufgrund von ständigen Wechselwirkungen von Objekten mit ihrer Umgebung nicht sichtbar werden und Superpositionszustände in der Praxis nur für extrem kurze Zeit bestehen können.

7. Quantencomputer

- Das Wissen über Qubits und die Wesenszüge der Quantenphysik werden angewendet, um die Grundarbeitsweise von **Quantencomputern** zu verstehen.
- Dabei soll kein Algorithmus besprochen, sondern lediglich das Grundprinzip in Hinblick auf **Informationsträger, Quantenparallelismus und Auslesbarkeit der Rechenergebnisse** plausibel gemacht werden.
- Abschließend werden **Potentiale und Grenzen von Quantencomputern** kurz beleuchtet.

Materialübersicht

Material	für Lehrkräfte	für SuS	Bemerkungen
Lehrbuch	gedruckt und digital	gedruckt oder digital	
Arbeitsheft	gedruckt und digital	gedruckt oder digital	
Lösungsheft	gedruckt und digital	-	
(exemplarische) Arbeitsblätter	in der Lehrerhandreichung und digital, mit Lösungen	digital	editierbar, als Word-Dokument
Lehrerhandreichung	gedruckt und digital	-	inkl. didaktischen Hinweisen, Stoffverteilungsplan, exemplarischen Stundenplanungen und organisatorischen Hinweisen zur Datenerhebung
(exemplarische) Leistungskontrolle	in der Lehrerhandreichung und digital, mit Lösungen	-	editierbar, als Word-Dokument, mit Bewertungshinweisen
Simulation	als Web-Link / QR-Code	als Web-Link / QR-Code	
Katze Q	im App-Store oder Play-Store	im App-Store oder Play-Store	
(exemplarische) PowerPoint-Folien	digital	-	editierbar, als PowerPoint-Datei
(exemplarisches) Kahoot-Quiz	digital, Link in der Lehrerhandreichung	-	editierbar, als geteilte Vorlage
(exemplarische) Mentimeter-Folien	digital, Link in der Lehrerhandreichung	-	editierbar, als geteilte Vorlage

Vorgehensweisen und Materialien

Sie erhalten zum Konzept zahlreiche Materialien. Manche dieser Materialien und Aspekte des Konzeptes sind zentraler als andere. Im Folgenden finden Sie eine Liste, was für das Konzept besonders zentral ist:

Bitte darauf achten:	
<u>Sachstruktur des Konzeptes</u>	
• fachliche Inhalte und Vorgehensweise ➔ Orientierung am Lehrbuch ➔ Lernziele auf Seite 3 beachten ➔ Leitlinien / Design-Prinzipien von Seite 4 beachten ➔ Begriffsbildung auf Seite 5 beachten • Ablaufplan und zeitliche Schwerpunkte ➔ Ablaufplan auf Seite 6 beachten ➔ Orientierung am Stoffverteilungsplan	
<u>Begriffliche Besonderheiten und Aspekte:</u>	
• Nicht-Determinismus • Messung $\leftrightarrow$ Messprozess • Überlagerung $\leftrightarrow$ Superposition • Auflösen der Superposition • Einzel- und Ensemble-Prinzip • Zustands- und Präparationsbegriff, Basiszustände • Handschuh- und Münzenkorrelation	

Kapitel 2

ergänzende Hintergrundinformationen

2.1. Fachliche Hinweise und Hintergrundinformationen

Im Lehrbuch sind an verschiedenen Stellen bewusste didaktische Reduktionen und begriffliche Besonderheiten eingebaut. Einige wesentliche Aspekte werden nachfolgend erläutert.

Hinweis: In diesem Kapitel wird teilweise die s. g. „Ket-Notation“ verwendet, Vektoren werden also so geschrieben: $|v\rangle$

Interpretationen

Ein Ziel des Konzeptes ist die Demystifizierung der Quantenphysik. Quantenphysikalische Konzepte werden aufgrund der fehlenden Alltagserfahrung häufig als spukhaft dargestellt. Die verschiedenen Interpretationen der Quantenphysik können diese Sichtweise verstärken (insbesondere Interpretationen wie die Viele-Welten-Theorie).

Das Konzept verzichtet darum gänzlich auf die Thematisierung von Interpretationen. Grundlegend werden entweder Inhalte besprochen, die ohne Interpretation auskommen, oder es werden Verbindungen zwischen den Interpretationen herausgearbeitet, ohne sie explizit zu nennen (siehe „Einzel- und Ensemble-Prinzip“).

Fachsprache vs. Unterrichtssprache

Im wissenschaftlichen Diskurs haben sich bestimmte Begriffe etabliert, die mittlerweile als „Fachsprache“ angesehen werden können. Dazu zählen z. B. die verschiedenen Interpretationen (wenngleich diese auch nicht immer einheitlich definiert werden) und damit u. a. auch der „Kollaps der Wellenfunktion“.

Im Rahmen des Konzeptes werden z. T. neue Begriffe eingeführt, um eine inhaltliche Stringenz bei gleichzeitiger didaktischer Reduktion zu ermöglichen. Diese Begriffe werden im Rahmen des Unterrichtes konsequent eingesetzt und können als „Unterrichtssprache“ angesehen werden. Bei allen eingeführten Begriffen ist auf eine logische Begründung und auf Anschlussfähigkeit geachtet worden.

- **„Auflösen der Superposition“**

Im Lehrbuch ist zum Messprozess vom „Auflösen der Superposition“ die Rede. Diese Formulierung ist an den „Kollaps der Wellenfunktion“ angelehnt und auf diesen Begriff später erweiterbar.

Der Kollaps der Wellenfunktion beschreibt die (erkenntnistheoretische) Zustandsreduktion eines Superpositionszustandes $|\psi\rangle$ aller möglichen Eigenzustände $|\varphi_i\rangle$ mit den zugehörigen komplexen Wahrscheinlichkeitsamplituden c_i

$$|\psi\rangle = \sum_{i=1}^n c_i |\varphi_i\rangle$$

auf einen einzigen Eigenzustand $|\varphi_i\rangle$ im Moment des Messprozesses, sodass das Messergebnis der zugehörige Eigenwert dieses Eigenzustandes ist.

Werden die Zustände durch Wellenfunktionen beschrieben, entspricht diese Projektion des Gesamtzustandes auf einen Eigenraum damit gewissermaßen einem Kollaps der Wellenfunktion. An dieser Stelle werden jedoch zwei Anpassungen an das Unterrichtskonzept vorgenommen:

1. Da Zustände aber nicht notwendigerweise durch Wellenfunktionen beschrieben werden müssen, erscheint es ebenso natürlich, bei dieser Projektion auf einen Eigenraum des Systems von einem Zusammenbrechen der Superposition statt der Wellenfunktion zu sprechen, da unmittelbar nach dem Messprozess kein Superpositionszustand mehr bzgl. der verwendeten Messbasis vorliegt.
2. Der Begriff „Kollaps“ suggeriert implizit einen abrupten und schlagartigen Mechanismus der Zustandsreduktion, der aus der Kopenhagener Deutung der Quantenphysik folgt. Er widerspricht damit einem aus der Dekohärenztheorie

folgenden zeitlich-kontinuierlichen, wenn auch sehr schnellen Prozess, bei dem die (nachweisbare) Superposition verschwindet. Darum wird nicht von einem Kollaps, sondern von einem Auflösen (also Verschwinden) der Superposition gesprochen, um inhaltlich-fachliche Stringenz zu wahren.

Die Diskussion der Dekohärenzzeiten macht allerdings deutlich, dass dieser Prozess dennoch enorm schnell und damit quasi-abrupt passiert.

Die Formulierung „Auflösen der Superposition“ ist damit ebenso fundamental, an die Dekohärenztheorie (und später auf Wellenfunktionen) anschlussfähig und erfordert keine Kenntnisse über die Wellenfunktion selbst.

- **„Überlagerung“ und „Superposition“**

Das Superpositionsprinzip gilt als mathematisches Prinzip fundamental sowohl in der klassischen Physik, wie auch (aufgrund der Linearität) in der Quantenphysik für Zustände.

Zur begrifflichen Trennung und für eine damit intendierte begriffliche Klarheit wird im Rahmen des Unterrichtskonzeptes im Rahmen der klassischen Physik stets von Überlagerung, und im Fall der Quantenphysik stets von Superposition gesprochen.

- **„EPR-Experiment“**

Das Gedankenexperiment von Einstein, Podolsky und Rosen zur Verschränkung und zur Nicht-Lokalität ist lange Zeit als „EPR-Paradoxon“ bekannt gewesen. Es wurde mittlerweile aber auch in der Realität durchgeführt (siehe Nobelpreis 2022) und wird darum, auch mit dem Ziel einer Demystifizierung der Quantenphysik, als „EPR-Experiment“ bezeichnet.

- **„Einzel- und Ensemble- Prinzip“**

Wie erwähnt, sollen Interpretationen keine explizite Rolle im Konzept spielen. Sie sind aber bei der Beschreibung des Messprozesses implizit notwendig. Die beiden populärsten Interpretationen (Kopenhagener Deutung und Ensemble-Interpretation) der Quantenphysik werden durch das eingeführte Konzept des Einzel- und Ensembleprinzips miteinander vereint, ohne sich zu widersprechen:

Wir können bei einzelnen Messprozessen keine Vorhersage über das Versuchsergebnis anstellen, nur Wahrscheinlichkeiten angeben („Einzel-Prinzip“, ähnlich der Kopenhagener Deutung und dem damit verbundenen Kollaps der Wellenfunktion).

Bei einem Ensemble von identisch präparierten Quantenobjekten oder identischen Experimenten bei gleicher Präparation können wir aber statistische Vorhersagen anstellen („Ensemble-Prinzip“, ähnlich der Ensemble-Interpretation).

Messprozess und Messbasis

Formale Betrachtung des Messprozesses

Der Zustand eines Quantenobjektes kann algebraisch durch einen Vektor $|\varphi\rangle$ im Hilbertraum (einem geeigneten Vektorraum) beschrieben werden. Einer Messapparatur für eine bestimmte physikalische Größe (s. g. „Observable“) A kann in diesem Formalismus ein hermitescher Operator $\hat{A}$ (z. B. bestimmte Matrizen) zugeordnet werden.

➔ Die möglichen Messergebnisse sind die Eigenwerte zu diesem Operator. Das heißt, wird ein beliebiger Zustand durch eine Messapparatur gemessen, erhält man als Messwert definitiv einen (reellen) Eigenwert A_i zum Operator $\hat{A}$.

➔ Außerdem befindet sich das gemessene Quantenobjekt dann in einem u. U. neuen Zustand – nämlich in einem der Eigenzustände des Operators $\hat{A}$.

Durch den Messprozess ist der Zustandsvektor des Quantenobjektes also auf einen (zum Eigenwert gehörigen) Unterraum projiziert worden und befindet sich in einem Eigenzustand $|A_i\rangle$ der Messapparatur:

$$|\varphi\rangle_{\text{vor}} \rightarrow |\varphi\rangle_{\text{nach}} = |A_i\rangle$$

Wir schlussfolgern also:

Befand sich ein Quantenobjekt zuvor *nicht* in einem Eigenzustand, verändert der Messprozess aktiv den Zustand und zwingt es auf einen (zufälligen) Eigenzustand. Darum ist **von aktiven Messprozessen in der Quantenphysik** die Rede.

Durch diesen Messprozess wurde das Quantenobjekt also in einem Eigenzustand der Messapparatur präpariert. Erfolgt instantan ein **erneuter identischer Messprozess**, ergibt sich sicher genau wieder derselbe Wert, und das Messergebnis ist in diesem Fall **nicht mehr zufällig**.

Basiszustände und Superposition

Ein Messapparat legt, algebraisch betrachtet, für den Messprozess eine Messbasis fest. Zustände, bei denen der (für die gemessene Größe) zu erwartende Messwert bereits sicher feststeht, nennen wir „Basiszustände“. Sie sind immer von der Messapparatur abhängig. Basiszustände der Messbasis entsprechen also genau den Eigenzuständen des zum Messprozess gehörenden Operators.

- Befindet sich ein Quantenobjekt in einem Basiszustand zu dieser Messapparatur, ist das Messergebnis also nicht zufällig.
- Befindet sich das Quantenobjekt aber in einem anderen beliebigen Zustand, kann den Zustandsvektor als (normierte) Linearkombination aus Basisvektoren der Messapparatur darstellen.

Zustandsvektoren von Quantenobjekten müssen zur korrekten Beschreibung von Wahrscheinlichkeiten zudem immer auf den Betrag „1“ normiert sein.

Wir schlussfolgern also:

Ob sich ein Quantenobjekt in einer **Superposition** befindet, **hängt von der Messapparatur** ab.

Ein und derselbe Zustand kann bezüglich der einen Messapparatur (mit Messbasis A) in seiner Superposition befinden, und gleichzeitig bezüglich einer anderen Messapparatur (mit Messbasis B) nicht.

Beispiel: Elektronenspin

Den Spin eines Elektrons kann man in beliebige Richtungen messen. Legt man ein Koordinatensystem mit der z-Achse als ausgezeichnete Richtung fest, könne man z. B.

- den Spin in z-Richtung messen, Basiszustände $|\text{up}\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ und $|\text{down}\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$
- den Spin in x-Richtung messen, Basiszustände $|\text{rechts}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$ und $|\text{links}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$
- den Spin in y-Richtung messen, Basiszustände $|\text{vorne}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}$ und $|\text{hinten}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}$

Was man sieht:

Befindet sich ein Elektron z. B. im Zustand $|\text{up}\rangle$, dann befindet er sich gleichzeitig in einer Superposition aus $|\text{rechts}\rangle$ und $|\text{links}\rangle$:

$$|\text{up}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\text{rechts}\rangle + |\text{links}\rangle).$$

Und analog:

Befindet sich ein Elektron z. B. im Zustand $|\text{links}\rangle$, dann befindet er sich gleichzeitig in einer Superposition aus $|\text{up}\rangle$ und $|\text{down}\rangle$:

$$|\text{links}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\text{up}\rangle - |\text{down}\rangle).$$

Wir schlussfolgern also:

Möchte man einen Elektronenspin in einer 50:50-Superposition bzgl. $|\text{up}\rangle$ und $|\text{down}\rangle$ präparieren, könnte von einem beliebigen Elektron den Spin in x-Richtung messen. Dann befindet es sich bzgl. der z-Richtung in einer Superposition.

Bezug zum Unterrichtskonzept

Das Problem der Messbasis benötigt für ein konzeptuelles Verständnis tiefgreifende algebraische Vorkenntnisse, etwa im Bereich der Vektorrechnung.

Im Sinne einer didaktischen Reduktion wird die **Basisabhängigkeit** der Superposition **nicht explizit** im Unterricht thematisiert. Stattdessen finden Messprozesse immer bzgl. **einer ausgezeichneten z-Achse** statt.

Da die Messbasis während des gesamten Unterrichtes nicht geändert wird (es wird immer nur der Spin abhängig vom Magnetfeld in z-Richtung gemessen), kann auf eine Diskussion der Basisabhängigkeit verzichtet werden.

Zur Sicherung der Anschlussfähigkeit in späteren (Schul-)Jahren und für eine saubere Begriffsbildung wird jedoch ganz bewusst der Begriff des **Basiszustandes als „möglicher Zustand, in dem sich ein Quantenobjekt nach einem Messprozess befinden kann“** eingeführt.

Diese Definition ist physikalisch uneingeschränkt korrekt und später ausbaufähig. Sie verzichtet jedoch darauf, näher auf den Basisbegriff im algebraischen Sinne einzugehen.

Messproblem und Dekohärenz

Im Konzept wird bzgl. des Messproblems, wie beschrieben, auf das Auflösen der Superposition im Sinne der Kopenhagener Deutung der Quantenphysik zurückgegriffen. Diese Deutung ist nach wie vor populär, von den meisten Physikerinnen und Physikern vertreten und wird indirekt aufgegriffen. Sie ist aber nicht unumstritten – auch weil sie besondere Annahmen über den Messapparat macht. Nach der Kopenhagener Deutung gilt der (irreversible) Messprozess als nicht dynamisch analysierbar, während die Dekohärenztheorie das ermöglicht.

Die Grundidee der Dekohärenztheorie ist die Einbeziehung der Umgebung und der Wechselwirkungen mit ihr – Systeme werden also in der Dekohärenztheorie nicht mehr als abgeschlossen, sondern als offen und Teil einer Umwelt angesehen. Durch diese Wechselwirkungen verschwindet die Interferenzfähigkeit der Quantenobjekte („Kohärenz“) nach kurzer Zeit.

Grundsätzlich wird das Messproblem der Quantenphysik also operationalisiert – in dem Sinne, dass sich die Frage gestellt wird, wie eine Superposition von verschiedenen quantenphysikalischen Zuständen überhaupt nachgewiesen werden könnte. Dieser Nachweis würde durch Interferenzeffekte stattfinden, die durch Dekohärenzprozesse allerdings bereits nach kurzer Zeit nicht mehr auftreten können. Ein Superpositionszustand wäre damit durch keinen Messprozess nachweisbar, sodass die Objekte „effektiv klassisch“ werden und das Problem zumindest unter praktischen Gesichtspunkten gelöst wird (Müller, 2016, S. 8).

Die Dekohärenztheorie ist damit eine starke Theorie, die erklären kann, warum wir unsere Welt klassisch wahrnehmen. Sie bietet allerdings keine tiefe intrinsische Lösung des Messproblems in Hinblick auf den Kollaps, sondern eher eine pragmatische Lösung für praktische Probleme.

Im Rahmen des Konzeptes und des Lehrbuches wird auf die Dekohärenz eingegangen, um zu erklären, weshalb unsere Welt klassisch erscheint. Außerdem ist Dekohärenz ein ganz praktisches Problem bei der Realisierung von Quantencomputern.

Da auf Wellenbegriffe und damit insbesondere auf „Interferenz“ verzichtet wird, wird die Dekohärenz als Auflösen der **nachweisbaren** Superposition eingeführt. Dieser Begriff ist fachlich unter den o. g. Gesichtspunkten tragbar, aber auf das Niveau der Zielgruppe reduziert.

Verschränkung und EPR-Experiment

Verschränkung ist sicher eines der spannendsten und abstraktesten Phänomene der Quantenphysik. Anschaulich nennt man ein System aus mehreren Quantenobjekten verschränkt, wenn sie sich als Ganzes in einem wohldefinierten Zustand befinden, und man gleichzeitig keinem der Teilsysteme einen eigenen wohldefinierten Zustand zuordnen kann. Man spricht auch von „Nicht-Separabilität“.

Messergebnisse an verschränkten Teilsystemen sind korreliert. Messergebnisse an einem Teilsystem legen damit auch die Messergebnisse an den anderen Teilsystemen fest.

Verschränkung von zwei Qubits mathematisch

Der Zustand eines Systems aus zwei Qubits lässt sich formal z. B. wieder mithilfe von Ket-Vektoren (mit zwei Einträgen) beschreiben.

Befindet sich zum Beispiel Qubit A im Zustand $|0\rangle$ und Qubit B im Zustand $|1\rangle$, dann befindet sich das Gesamtsystem im Zustand $|0\rangle_A|1\rangle_B$ (s. g. „Tensorprodukt“), den man auch kurz als $|01\rangle$ schreiben kann.

Der allgemeine Zustand eines 2-Qubit-Systems lässt sich damit schreiben als

$$|\psi\rangle = \alpha|00\rangle + \beta|01\rangle + \gamma|10\rangle + \delta|11\rangle \text{ mit } |\alpha|^2 + |\beta|^2 + |\gamma|^2 + |\delta|^2 = 1.$$

Lässt sich der Zustand eines 2-Qubit-Systems nicht separieren, also als (Tensor-)Produkt zweier Einzelzustände schreiben, so nennt man diesen Zustand „verschränkt“, ansonsten „separabel“.

Beispiel

- Der Zustand $\frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |10\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_A + |1\rangle_A)|0\rangle_B$ ist separabel, also nicht verschränkt. Beide Objekte lassen sich getrennt voneinander beschreiben.
- Der Zustand $\frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle + |10\rangle)$ ist verschränkt. Er lässt sich nicht separieren und beide Objekte lassen sich nur zusammen beschreiben.

Spin-Verschränkung zwei Elektronen

Zwei Elektronen können über ihren Spin verschränkt sein. Dieser Fall liegt etwa in Supraleitern vor, wo zwei Elektronen zu einem „Cooper-Paar“ verschränkt sind. Dieses Objekt ist ein Boson und besitzt den Gesamtspin 0. Darum treten Elektronenspins in diesem Fall nach Messprozessen immer in entgegengesetzter Richtung auf (= negative Korrelation).

Häufig werden in realen Experimenten aber verschränkte Photonen (bzgl. ihrer Polarisation) genutzt, so auch bei den Experimenten zum Physik-Nobelpreis 2022.

EPR-Experiment

Das EPR-Experiment war ursprünglich ein Gedankenexperiment von Albert Einstein, Boris Podolsky und Nathan Rosen. In seiner ursprünglichen Formulierung war es Teil der Bohr-Einstein-Debatte um die Frage, ob die Quantentheorie alle Aspekte einer zufriedenstellenden physikalischen Theorie erfüllt (Stöckler, 2016, S. 33).

Die Autoren des Gedankenexperimentes wollten zeigen, dass die Quantentheorie unvollständig ist. Das Gedankenexperiment beschreibt ganz grundsätzlich zwei Quantenobjekte, die im Ortsraum unter Beachtung der Impulserhaltung diametral auseinanderfliegen. Sind die beiden Objekte weit genug

voneinander entfernt (so weit, dass Messergebnisse an einem Objekt lokal gesehen nicht mehr von den Größen des anderen Objektes beeinflusst werden kann), findet ein Messprozess statt.

Im Unterrichtskonzept wird das EPR-Experiment explizit mit Elektronen behandelt, in der experimentellen Forschung nimmt aus praktischen Gründen häufig Photonen.

Man stellt in jedem Fall dann (abhängig von der Präparation) Korrelationen zwischen den Messergebnissen fest, die Albert Einstein durch die Ergänzung s. g. „verborgener Parameter“ erklären wollte. Das sind nicht zugängliche Größen, denen eine physikalische Realität zugesprochen wird und mit denen man die Quantentheorie ergänzen wollte, um sie doch deterministisch und lokal zu machen.

Theorien mit lokalen verborgenen Parametern müssten die s. g. „Bell’sche Ungleichung“ erfüllen. Das EPR-Experiment ist heute bereits präzise experimentell umgesetzt – darum wissen wir, dass die Quantentheorie die Bell’sche Ungleichung tatsächlich verletzt und damit nicht lokal-real ist. Die Quantentheorie verletzt also mindestens eine der klassischen Definitionen von Realität und Kausalität (siehe unten). Für diesen experimentellen Nachweis wurde 2022 der Physik-Nobelpreis verliehen.

Es existieren zwar nach wie vor Interpretationen der Quantenphysik, die mit solchen verborgenen Parametern argumentieren (siehe Bohm’sche Theorie). Mittlerweile hat sich aber weitestgehend die Ansicht durchgesetzt, dass die Quantenphysik sowohl nicht-real, als auch nicht-lokal und somit eine Theorie ohne verborgene Parameter ist. Insofern wird auch im Rahmen des Unterrichtskonzeptes diese Sichtweise auf Quantenphysik vermittelt und auf der Basis des Indeterminismus argumentiert.

Verschränkung und Lokalität

Lokalität, also die Einschränkung der Wirkung physikalischer Vorgänge auf ihre räumliche Umgebung, wird in der Quantenphysik nach weit verbreiteter Ansicht aufgegeben.

Ein wesentliches Argument hierfür ergibt sich aus der Verschränkung bzw. dem EPR-Experiment: Ein Messprozess an einem der verschränkten Objekte legt sofort (ohne jeden zeitlichen Verzug) auch den Zustand des anderen Objektes fest. Die räumliche Entfernung spielt dabei keine Rolle. Denn beide Objekte sind nicht mehr getrennt zu betrachten, sondern bilden ein Gesamtsystem – auch über beliebige räumliche Entfernungen der Teilsysteme hinweg. Albert Einstein nannte dies „spukhafte Fernwirkung“.

Verschränkung und Informationsübertragung

Durch Quantenverschränkung ist keine Informationsübertragung mit Überlichtgeschwindigkeit möglich, auch wenn diese Interpretation der Korrelation von Messergebnissen zunächst nahe liegt.

Im Moment des Messprozesses werden nicht im klassischen Sinn Informationen übertragen – hier gilt nach wie vor die Grenze der Lichtgeschwindigkeit. Zur Informationsübertragung würde man nicht-probabilistische Messergebnisse benötigen, die bei verschränkten Quantenobjekten durch Superposition nicht gegeben sind.

Philosophische Aspekte der Quantenphysik: Realität, Lokalität und Kausalität

(nach Pospiech, 2024)

Klassische Definition von Lokalität

Vorgänge haben nur auf ihre direkte räumliche Umgebung unmittelbare Auswirkungen. Wirkungen können sich im Rahmen der Relativitätstheorie maximal mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Es gibt keine Beziehung zwischen Objekten, die raumartig zueinander liegen.

Aspekte der Quantenphysik, die mit der klassischen Definition von Lokalität in Konflikt stehen

Zwei oder mehr Quantenobjekte können unter bestimmten Umständen (Verschränkung) in Beziehung zueinander stehen, auch wenn sie „raumartig“ zueinander liegen. Operationen (wie ein Messprozess) wirken dann immer instantan auf das Gesamtobjekt, können aber keine Informationen übertragen.

→ *Verschränkung*

Klassische Definition von Realität

Messungen geben nur Eigenschaften an, die unabhängig von der Messung vorliegen. Objekte und ihre Eigenschaften, zusammen mit ihren Werten, existieren unabhängig von Beobachtungen oder Messungen. Das Ergebnis jeder denkbaren Messung steht also fest, bevor es durch die Messung bekannt wird (z. B. auch durch den Einfluss verborgener Variablen).

Aspekte der Quantenphysik, die mit der klassischen Definition von Realität in Konflikt stehen

Eigenschaften von Objekten und ihre Werte entstehen im Messprozess.

→ *Superposition und Messprozess*

→ *Verschränkung*

(→ *Unbestimmtheit*)

Klassische Definition von Kausalität

Zu jeder Wirkung gibt es eine eindeutige Ursache, die in der Vergangenheit liegt und zwingende Voraussetzung der Wirkung ist. Es gilt das Kausalitätsgesetz: Keine Ursache ohne Wirkung.

Aspekte der Quantenphysik, die mit der klassischen Definition von Kausalität in Konflikt stehen

Die Ursache-Wirkungs-Beziehung ist nicht mehr streng eindeutig.

→ Superposition und Messprozess, verschiedene Messergebnisse bei identischer Präparation möglich.

→ Delayed-Choice-Experimente

Zusammengefasst:

Die Quantenphysik ist keine lokal-realistische Theorie, und folgt den klassischen Annahmen von Kausalität nicht!

2.2. Häufige Schülerfragen

Im Verlauf der praktischen Erprobung gab es eine Reihe kritischer Rückfragen der Schülerinnen und Schüler zu den Inhalten im Lehrkonzept.

Wichtige und spannende Fragen und deren fachliche Antwort dazu finden Sie hier. Die Antworten liegen z. T. über Schülerniveau und sind in diesem Fall für Sie als Hintergrundwissen gedacht.

Frage zum Thema: Teilgebiete der Physik	
Sind Astronomie und Teilchenphysik nicht auch Teilgebiete der Physik?	Es ist eine Definitionsfrage, wie tief man die Strukturierung vornimmt. Die vorgeschlagene Strukturierung aus dem Konzept greift Oberthemen auf, die sich wirklich fundamental unterscheiden müssen (darum sind Optik und E-Lehre z. B. auch zusammengefasst). Astronomie kann in dieser Systematisierung eher als Zusammenarbeit verschiedener Teilgebiete (z. B. Mechanik, Optik, Thermodynamik, Relativitätstheorie) gesehen werden. Teilchenphysik fällt dann als Anwendungsfall unter die Quantenphysik.

Frage zum Thema: Zweizustandssysteme	
Warum ist ein Fenster ein Zweizustandssystem? Hat ein Fenster nicht mehr als zwei mögliche Zustände? Man kann es doch z. B. auch kippen.	Ob ein System ein Zweizustandssystem ist, hängt maßgeblich vom zugrundeliegenden Modell ab. Je nachdem, wie stark das Modell vereinfacht und abstrahiert, ist ein System bzgl. einer bestimmten Eigenschaft ein Zweizustandssystem, oder eben nicht. Bei einem Fenster kann man stark vereinfacht von einem Zweizustandssystem ausgehen (offen/geschlossen). Mit einem exakteren Modell wäre es das nicht mehr.

Frage zum Thema: Elektronenspin	
Beim Elektronenspin dreht sich das Elektron doch um sich selbst, oder?	Das ist physikalisch streng genommen falsch. Was genau ein Elektron eigentlich „ist“, wissen wir nicht. Beschreiben können wir es jedenfalls z. B. als Wahrscheinlichkeitswelle bzw. Wellenpaket. Als Objekt ohne Ausdehnung bzw. als Wellenobjekt ergibt es keinen Sinn, sich eine klassische Drehung vorzustellen. Das birgt außerdem die Gefahr, sich das Elektron bildlich als kleine (manchmal sogar blaue) Kugel mit fest bestimmter endlicher Grenze vorzustellen. Das Elektron <i>verhält</i> sich nur so, als <i>würde</i> es sich um die eigene Achse drehen – so kann man einen Drehimpuls zuordnen. Eine Drehung im klassischen Sinn sollte man sicher allerdings keinesfalls vorstellen. Klassisch betrachtet können auch weiterführende Eigenschaften des Spins, wie dessen Quantisierung, nicht erklärt werden.

Frage zum Thema: Superposition (und Dekohärenz)

Woher wissen wir, dass es Superposition von Zuständen gibt, wenn man sie doch gar nicht messen/beobachten kann?

Mathematisch ist die Sache klar:

Das Verhalten von massebehafteten Quantenobjekten wird im nichtrelativistischen Fall durch die Schrödingergleichung beschrieben – eine lineare Differentialgleichung. Damit ist die Linearkombination (also die Superposition) von Lösungsfunktionen wieder eine Lösung dieser Gleichung. Das ist unmittelbar die formale Beschreibung des Superpositionsprinzips für quantenphysikalische Zustände.

Erkenntnistheoretisch ist es schwieriger – hier kann man sich im Bereich der Superposition und des Messprozesses sowieso die Frage stellen, was „Wirklichkeit“ oder „Realität“ eigentlich überhaupt ist (nur das was wir sehen/messen, oder noch viel mehr?).

Wie sehr häufig in der Forschung könnte man so argumentieren:

Nicht alles was es gibt, können wir zwangsweise beobachten – das ist nicht nur in der Physik so.

Superpositionen können wir nicht sehen oder wahrnehmen, das ist korrekt. Allerdings können wir aus unseren Modellen (z. B. der mathematischen Beschreibung) schlussfolgern, dass es so etwas wie Superpositionszustände geben muss. Man kann mit diesen Modellen dann Vorhersagen machen, oder sie für Experimente und Entwicklungen nutzen. Bisher stimmen alle dieser Vorhersagen und Ergebnisse aus den Modellen mit den Experimenten und realen Beobachtungen überein. Wir haben also keinen Grund, im Kern an den Modellen und damit auch an der Superposition zu zweifeln.

Weitergedacht (Dekohärenz):

Ein erkenntnistheoretischer Nachweis von Superposition sind beispielsweise Interferenzen (also die Auswirkung der Überlagerung von Wellen oder Wellenfunktionen).

Genau das passiert bei der Dekohärenz: durch Wechselwirkungen geht die Kohärenz der Wellenpakete untereinander verloren. Damit sind auch deren Superpositionen grundsätzlich nicht mehr nachweisbar oder gar beobachtbar – somit macht es auch keinen Sinn mehr, dann noch von Superpositionszuständen im engeren Sinn zu sprechen. Die (zumindest nachweisbare) Superposition geht durch Dekohärenz in Folge von Umgebungswechselwirkungen verloren, und die betrachteten Phänomene werden effektiv klassisch.

Frage zum Thema: Schrödingers Katze

Schrödingers Katze kann doch gar nicht funktionieren, weil sich die Katze doch die ganze Zeit selbst beobachtet, oder?

Schrödingers Katze ist nur ein Gedankenexperiment. Es soll zum Ausdruck bringen, welche Effekte man in der makroskopischen Welt hätte, wenn die Gesetze der Quantenphysik analog auf unseren Alltag übertragbar wären.

Aus ganz verschiedenen Gründen kann Schrödingers Katze in der realen Alltagswelt nicht funktionieren. Dazu zählen Punkte wie:

1. Der Atomkern wird dauerhaft durch den Detektor gemessen. Damit ist der Zustand des Atomkerns vereinfacht gesehen quasi-kontinuierlich bestimmt.
2. In der Kiste kommt es dauerhaft zu Wechselwirkungen, sodass ein Superpositionszustand der Katze grundsätzlich praktisch nicht möglich ist (siehe auch Dekohärenztheorie).
3. Es geht in der Quantenphysik beim Auflösen der Superposition eher um Messprozesse und Wechselwirkungen, als um Beobachtungen. Der Begriff „Beobachtung“ suggeriert, dass eine Superposition nur aufgelöst wird, wenn ein Objekt mit psychischem oder physiologischem Bewusstsein eine Beobachtung vornimmt. Das ist natürlich nicht so – jede Wechselwirkung zerstört die Superposition, egal ob durch belebte oder unbelebte Materie.
4. Auch belebte Materie wie eine Katze besteht selbst wiederum auch aus wechselwirkenden Teilchen, die bereits eine (längere) Superposition des makroskopischen selbst Objektes verhindern (siehe auch Dekohärenztheorie).

Frage zum Thema: Stern-Gerlach-Experiment

Warum wird im Stern-Gerlach-Experiment ein inhomogenes Magnetfeld benötigt?

Elektronen haben ein intrinsisches magnetisches Moment, ihren Spin. Dieser bleibt auch im Silberatom erhalten.

Die entsprechende Kraftwirkung auf diese Objekte entsteht (etwa bei energetischer Betrachtung) ausschließlich durch den Gradienten der magnetischen Flussdichte

$$F_z = \mu_z \frac{\partial B}{\partial z}.$$

In einem homogenen Magnetfeld würde es somit nicht zu einer Ablenkung kommen. Dort ist das Magnetfeld überall gleich groß.

Anschaulich:

Stellt man sich den Spin in einer Kompassnadel-Analogie vor, würde in einem homogenen Magnetfeld der Nordpol der Kompassnadel gleichermaßen zum Südpol des Magneten gezogen werden, wie der Südpol der Kompassnadel zum Nordpol des Magneten gezogen würde. Damit entsteht keine Nettokraft auf das Objekt (bei einem klassisch ausgedehnten Magneten würde nur ein Drehmoment wirken).

Frage zum Thema: Stern-Gerlach-Experiment

Warum nutzt man beim Stern-Gerlach-Experiment Atome und nicht direkt einzelne Elektronen?

Das Stern-Gerlach-Experiment funktioniert nicht mit freien Elektronen. Stattdessen nutzt man Silberatome. Das magnetische Moment eines Atoms ergibt sich aus den Bahndrehimpulsen und den Spins seiner Elektronen (der Beitrag des Atomkerns ist vernachlässigbar klein). Betrachtet man die Elektronenkonfiguration der Silberatome ($[\text{Kr}] 4d^{10} 5s^1$), so befindet sich nur ein Valenzelektron im äußeren 5s-Orbital. Damit entspricht der Gesamtdrehimpuls $J = L + S$ eines Silberatoms durch die abgeschlossenen Schalen ($L = 0$) genau dem Spin $S = \frac{1}{2}$ dieses Valenzelektrons. Wir messen also genau diesen Elektronenspin bzw. dessen magnetisches Moment.

Silberatome haben gegenüber Elektronen für das Experiment verschiedene Vorteile. Zum Beispiel:

1. Silberatome sind elektrisch neutral geladen.
 - ➔ Elektronen würden sich bei Versuchen mit mehreren Elektronen untereinander abstoßen.
 - ➔ Außerdem wirkt auf sie die Lorentz-Kraft im Magnetfeld.
 - ➔ Auch elektrische Störfelder könnten die Elektronen ablenken.
2. Silberatome haben eine wesentlich größere Masse als die sehr leichten Elektronen.
 - ➔ Freie Elektronen würden auf Grundlage der Heisenberg'schen Unschärferelation $\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$ ein verbreitertes Muster auf dem Detektor hinterlassen (Δx ist groß, da Δp durch die geringe Masse des Elektrons relativ klein ist).
 - ➔ Silberatome hingegen sind schwere Objekte. Damit wird Δx kleiner, da Δp durch die viel größere Masse größer wird.

Frage zum Thema: Stern-Gerlach-Experiment

Wie erzeugt man einzelne Elektronen? Und wie Silberatome?

Hier gibt es verschiedene Möglichkeiten, etwa den photoelektrischen Effekt, bei dem einzelne freie Elektronen erzeugt werden, indem man entsprechenden Halbleiter oder Metalle mit Licht (Photonen) bestrahlt.

Silberatome, wie sie z. B. beim Stern-Gerlach-Experiment verwendet werden, erzeugt man in einem Atomstrahlrohr. Dort werden im Hochvakuum Metalle, also z. B. Silber, verdampft. Aufwendigere Form zur Erzeugung von Atomstrahlen ist das s. g. „Sputtern“. Hierbei werden Ionen auf Festkörper geschossen, um Atome herauszulösen.

Frage zum Thema: Stern-Gerlach-Experiment	
Angenommen, ein Elektron/Silberatom hat im Stern-Gerlach-Experiment einen „Spin-Down“. Das heißt, der „Südpol“ des Elektrons (sein magnetisches Moment) zeigt in Richtung Südpol des Magneten. Müsste er da nicht abgestoßen werden, statt sogar nach unten in diese Richtung abgelenkt zu werden?	Hier ist genau das inhomogene Magnetfeld entscheidend. Dieses ist in Richtung Nordpol deutlich stärker als in Richtung Südpol (enge vs. weite Feldlinien). Die Kraftwirkung zum Südpol folgt formal aus der energetisch begründeten Gleichung $F_z = \mu_z \frac{\partial B}{\partial z}$. <u>Anschaulich:</u> Der Nordpol der Kompassnadel (=magnetisches Moment des Elektrons) im externen Magnetfeld wird stärker vom Magnet-Nordpol abgestoßen, als der Südpol vom Magnet-Südpol abgestoßen wird. Analog wird der Nordpol der Kompassnadel stärker vom Magnet-Südpol angezogen, als der Südpol der Kompassnadel vom Magnet-Nordpol angezogen wird. Damit ergibt sich eine Nettokraft nach unten in Richtung Magnet-Südpol und damit eine Ablenkung nach unten. Diese oberflächliche Erklärung setzt strenggenommen aber eine Ausdehnung des Objektes voraus und ist physikalisch darum nicht ganz sauber, sondern dient nur der Anschauung.

Frage zum Thema: Präparation und Superposition	
Wie erzeugt man denn Elektronen/Atome, die sich in einer genauen 50:50-Superposition aus „Spin up“ und „Spin down“ befinden?	Genau genommen könnte man hierfür beliebige Elektronen/Atome nehmen, und z. B. den Spin in x-Richtung messen. Ein solches Objekt hat dann eindeutig „Spin links“ oder „Spin rechts“. Das entspricht gleichzeitig einer exakten Superposition aus 50% „Spin up“ und 50% „Spin down“. Misst man dann den Spin in z-Richtung, beträgt die Wahrscheinlichkeit für „Spin up“ und „Spin down“ jeweils genau 50%.

Frage zum Thema: EPR-Experiment / Verschränkung	
Wie erzeugt man verschränkte Elektronen (Cooper-Paare)?	Verschränkte Elektronen entstehen z. B. beim starken Abkühlen von Supraleitern. Bei extrem niedrigen Temperaturen bilden sich Cooper-Paare, die man mittlerweile z. B. durch Ein-Elektron-Transistoren (single-electron transistor, SET) oder Quantenpunkte trennen kann. <u>Weitergedacht:</u> Man kann auch Photonen miteinander verschränken. Das funktioniert z. B. mit speziellen Kristallen bei einem Prozess namens „parametric down-conversion“. Ein Photon hoher Energie kann damit in zwei verschränkte Photonen niedrigerer Energie umgewandelt werden.

Frage zum Thema: Korrelation	
Warum sollten bei einer „Münzenkorrelation“ denn immer beide Münzen etwas Unterschiedliches zeigen? Das passiert doch so nicht in Wirklichkeit.	Die Münzen-Korrelation ist nur ein Gedankenexperiment zur Verdeutlichung der Idee, was diese Korrelation bedeutet. In der klassischen Mechanik kennen wir solche Korrelationen nicht – in der Quantenphysik sind sie, etwa bei der Verschränkung, etwas ganz Normales.

2.3. Wissenschaftliche (fachdidaktische) Begründung für das Konzept

Zielgruppe

Bisherige Lehrkonzepte zur Quantenphysik richten sich meist an Studierende oder Oberstufenschülerinnen und -schüler. Ein Konzept von Bernadette Schorn (2014) richtet sich an Schülerinnen und Schüler der Klassenstufe 10. Der Freistaat Bayern hatte eine Einführung in die Quantenphysik in Klassenstufe 10 am Gymnasium zeitweise sogar curricular verankert.

In einem nächsten Schritt soll nun ein Konzept für Klassenstufe 9 erprobt werden. Es zielt damit auf eine neue und besonders junge Zielgruppe ab. Die Besonderheit dieser Zielgruppe ist es, dass zu diesem Zeitpunkt im regulären Physikunterricht (in Sachsen) das Thema Wellen und Wellenphänomen noch nicht behandelt wurden. Das erlaubt es, potentiell problematische Schülervorstellungen im Bereich des Welle-Teilchen-Dualismus unmittelbar zu umgehen.

Zugang über Qubits

Die Verschiebung der thematischen Zugänge weg von traditionellen Inhalten (Photoeffekt, Welle-Teilchen-Dualismus, etc.) hin zu Elementen der Quanteninformatik ist ein genereller Trend, der sich derzeit in der Fachdidaktik abzeichnet. Die Ursachen hierfür sind neben dem Anwendungsaspekt vor allem Erkenntnisse und Ideen, die einen Zugang über Kernelemente der Quanteninformatik als konzeptuell äußerst geeignet erscheinen lassen. Einige Argumente hierfür sind:

1. hier betrachtete Systeme (Zweizustandssysteme) sind einfacher als komplexe traditionelle Systeme (Atome, Festkörper, ...)
2. klare und damit einfachere Begrifflichkeiten entlang der Wesenszüge
3. Quanten-IT ist experimentell zugänglicher (Polarisationszustände)
4. Aufgabekultur kann erneuert werden (z. B. Simulationen) (Müller, 2016b).

Zweizustandssysteme sind die einfachsten möglichen klassischen wie quantenphysikalischen Systeme. Bei diesen Systemen existiert eine spezifische physikalische Eigenschaft, die nur zwei Werte annehmen kann, während alle weiteren Eigenschaften fixiert bleiben (Dür & Heusler, 2016).

Bereits bei solchen einfachen Systemen zeigen sich aber die probabilistischen Eigenschaften der Quantenphysik. Daher eignen sich solche Systeme potentiell gut, um in das Thema einzuführen und die Quantenphysik auf einfache und transparente Art und Weise zu illustrieren. Konzepte, die Zweizustandssysteme nutzen, können eingängige Visualisierungen verwenden und sind gleichzeitig Herzstück neuer Technologien wie Quantencomputern (Dür & Heusler, 2014).

Das Lehrbuch-Beispiel für Zweizustandssysteme ist der Teilchenspin eines Spin-1/2-Teilchens als reines Quantenphänomen. Dieses Beispiel eignet sich nach Dür und Heusler (2016) hervorragend, um das Superpositionsprinzip zu illustrieren und soll darum in dem geplanten Klasse-9-Kurs eingesetzt werden. Zweizustandssysteme haben generell großes Potential bei der Einführung und Erklärung von weiteren quantenphysikalischen Prinzipien, wie dem statistischen Verhalten, dem Messprozess, Unbestimmtheit, No-Cloning-Theorem, Verschränkung, Nicht-Lokalität oder sogar der Quantenkryptographie (Dür & Heusler, 2014).

Bei diesem Zugang werden keinerlei Vorkenntnisse zum Wellenbegriff aus der Mechanik oder Optik benötigt, da insbesondere die Wellenfunktion kein Inhalt des geplanten Kurses ist. Damit werden die benötigten vorausgesetzten Wissensinhalte reduziert, die Kursdauer verkürzt und bekannte Lernprobleme im Bereich der Wellenphysik umgangen, ohne inhaltliche Reduzierungen in den quantenphysikalischen Konzepten vornehmen zu müssen.

Ein Zugang über ein Zweizustandssystem (Spin-First-Ansatz), vor allem über den Elektronenspin, ist gerade im schulischen Bereich im Sinne breit angelegter Studien noch relativ unerforscht. Erste Erfahrungen gibt es über Zugänge mit Polarisationszuständen von Photonen. Neben diesen empirischen und theoretischen Aspekten gibt es bereits Erfahrungen mit dem Spin-First-Ansatz im

Bereich der universitären Lehre, die in diesem Ansatz gegenüber traditionellen Zugängen gerade im damit erzielten konzeptuellen Verständnis der Lernenden Vorteile dieses Zugangs vermuten lassen. Mögliche Ursachen hierfür liegen in der Einfachheit solcher Systeme (im Sinne der Cognitive Load Theory in der Psychologie), in der nichtklassischen Natur des Spins als reines Quantenphänomen oder gerade im universitären Bereich in einem relativ einfachen Formalismus (Sadaghiani & Munteanu, 2015; Sadaghiani, 2016).

Leitlinien / Design-Prinzipien

- **Aufbau auf quantenphysikalischen Zweizustandssystemen (Qubits)**
Qubits bieten die Möglichkeit, zentrale Konzepte und Phänomene der Quantenphysik an sehr einfach Modellsystemen vollständig und anknüpfungsfähig zu erarbeiten. Dabei erlauben sie einen qualitativen und phänomenorientierten Einstieg, der nur sehr niederschwellige mathematischen Grundvoraussetzungen benötigt und gleichzeitig konzeptuelle Einblicke in Quantentechnologien ermöglicht.
- **Vollständiger Verzicht auf das Konzept von Wellen**
Mit dem Wellenbegriff gehen zahlreiche Lernschwierigkeiten einher, die umgangen werden sollen (vgl. z. B. Schecker et al., 2018). Außerdem wurde der Wellenbegriff in Klassenstufe 9 in Sachsen noch nicht eingeführt. Der Welle-Teilchen-Dualismus setzt Vorwissen zum Wellenbegriff voraus, auf den verzichtet werden soll. Zudem entstehen in diesem Zusammenhang häufig Fehlvorstellungen oder Hybridmodelle (Körhasan und Miller, 2020).
- **Klare Begriffsbildung und Sprachsensibilität**
Begriffe stehen im Zentrum, da eine einheitliche Sprache fundamental ist, um die komplexen Aspekte der Quantenphysik beschreiben und von klassischen Phänomenen trennen zu können (Wagner, 2019; Schecker et al., 2018). Auch z. B. die milq-Konzeption baut auf dieser Grundlage auf (siehe z. B. Müller, 2003). Zur begrifflichen Klarheit gehört neben der klaren Definition von Grundbegriffen wie „quantenphysikalischer Zustand“ oder „Präparation“ auch die Abgrenzung zwischen klassischer Physik und Quantenphysik durch Begriffe. Beispielweise sollen Entitäten wie Elektronen prinzipiell als „Quantenobjekt“ (nicht als Welle oder Teilchen) bezeichnet werden (Wagner, 2019). Außerdem soll in der klassischen Physik von der Messung (passiv) im Gegensatz zum Messprozess (aktiv) in der Quantenphysik gesprochen werden (Müller und Wiesner, 2002).
- **Phänomen- und Konzeptorientierung**
Ziel des Lehrkonzeptes ist ein qualitatives Verständnis für Quantenphysik als physikalische Theorie und damit verbundene Phänomene. Um ein konzeptuelles Verständnis und eine reflektierte Einordnung in die Physik generell zu ermöglichen, und unter gleichzeitiger Beachtung von Vorwissen, arbeitet das Unterrichtskonzept mit einem konzeptuellen statt einem mathematisch-prozeduralen Ansatz.
- **Erarbeitung von Phänomenen entlang klar definierter Wesenszüge**
Die Wesenszüge sind breit anerkannte und formal sauber erweiterbare Begriffe, die den Kern der Quantenphysik beschreiben (siehe z. B. Weber, 2018). Sie werden aber insofern abgeändert, als dass nicht benötigte oder intendierte Aspekte wie Komplementarität oder Interferenz ganz bewusst gestrichen oder ersetzt werden (im Sinne einer weiteren didaktischen Reduktion).

- **Abgrenzung und Zusammenhang zwischen moderner und klassischer Physik herausarbeiten**
Die Tatsache, dass Quantenphysik eine nicht-deterministische Theorie ist, widerspricht jeder Alltagsintuition und manchmal auch der Vorstellung, Physik könne als Naturwissenschaft alles vorhersagen (vgl. z. B. Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017). Das gibt dem Thema einen mystischen Charakter. Mithilfe von Konzepten wie Dekohärenz kann dieser scheinbare Widerspruch zu unserer Alltagswelt aber, auch im Sinne vom Verständnis wissenschaftlicher Theorien und Kontroversen generell, aufgelöst werden.
- **Gamification zum Einstieg in die Thematik**
Gamification, also der Einsatz von spielerischen Elementen in traditionellen Settings, kommt bereits in vielen Bereichen von Wirtschaft, Gesellschaft und Bildung zum Einsatz (Hutchison, Kanade et al., 2013). Vor allem im Bildungsbereich lassen sich in zahlreichen Studien positive Effekte nachweisen - denn durch Gamification kann die Leistung durch Verbesserung der Motivation gesteigert werden (Ferriz-Valero, Østerlie et al., 2020; Riopel, Nenciovici et al., 2019). Auch wenn die Studienlage noch verhältnismäßig dünn ist – auch in der Quantenphysik gilt Gamification als vielversprechender Ansatz (Foti, Anttila et al., 2021).
Das Spiel „Katze Q“ bietet die Möglichkeit, spielerisch mit ersten Begriffen der Quantenphysik in Kontakt zu kommen. Auf Basis dieses ersten deklarativen Begriffswissens kann im Verlauf des Kurses aufgebaut werden.
Das Spiel dient dabei aber weniger der inhaltlichen Vermittlung, sondern im Sinne der Erkenntnisse zu Gamification im Physikunterricht vor allem der Steigerung der Motivation.

Weitere Entscheidungen

- **Teilchen (und Welle) als Begriffe sparsam einsetzen**
Da auf den Welle-Teilchen-Dualismus explizit verzichtet werden soll, entfällt auch die Notwendigkeit, diese z. T. lernhinderlichen Begriffe kombiniert einzusetzen.
Stattdessen soll vorrangig z. B. von „Quantenobjekten“ gesprochen werden (vgl. Wagner, 2019).
- **Verzicht auf historische Experimente wie den Photoeffekt**
Da der Unterrichtsgang nicht traditionell erfolgt, kann auf historische Experimente verzichtet werden. Experimente wie der Photoeffekt haben als Experimente zu eher traditionellen Inhalten nicht immer den gewünschten konzeptuellen Erfolg und sind zum Teil auch keine rein-quantenphysikalischen Phänomene (Burkard, 2009; Hübel, 2021). Sie können bei Bedarf später noch ergänzend behandelt werden.
- **Verzicht auf Photonen**
Da der Elektronenspin als exemplarisches Qubit gewählt wird, entfällt die Notwendigkeit der Einführung von Photonen. Zur inhaltlichen Reduktion wird dieser Aspekt damit weggelassen, zumal das Photon auch nur ein weiteres und alternatives System wäre, das als Zugang in die Quantenphysik dienen kann.
- **Wesenszüge**
Die als „Wesenszüge“ bezeichneten Prinzipien leiten sich aus den Wesenszügen der Quantenphysik von Küblbeck und Müller 2007 ab. Damit ist eine Zusammenfassung der Kernaussagen der Quantenphysik in kurzen und prägnanten Merksätzen gemeint - mit dem Ziel eines Orientierungs- und (qualitativen) Argumentationswissens (Müller, 2016). Die Wesenszüge nach Müller und Wiesner lauten:
 - statistisches Verhalten
 - Fähigkeit zur Interferenz
 - eindeutige Messergebnisse
 - Komplementarität (Küblbeck und Müller, 2007).

Sie sind hier in Teilen angepasst – sowohl bzgl. der Vermeidung des Wellenaspektes der Quantenphysik als auch der Zielstellung, ein grundlegendes Verständnis der Arbeitsweise von Quantencomputern zu erlangen.

An die Stelle des Wesenszuges *Interferenz* tritt in diesem Kurs die *Superposition*. Beide Konzepte sind eng miteinander verbunden. Die Superposition ist dabei eine fundamentale Eigenschaft quantenphysikalischer Zustände und für ein Verständnis von Qubits unerlässlich. Zudem sind für ein Verständnis der Superposition Kenntnisse zum Wellenbegriff, anders als beim Begriff der Interferenz, nicht notwendig.

Auf den Begriff der *Komplementarität* wird verzichtet. Komplementarität könnte im Sinne der Unbestimmtheit auch bzgl. der Spinkomponenten behandelt werden, ist für ein erstes qualitatives Verständnis der Arbeitsweise von Qubits in Quantencomputern aber nicht notwendig. Entsprechend wird im Sinne der didaktischen Reduktion auf diesen Begriff verzichtet. Damit sind die vorgestellten Wesenszüge für das Unterrichtskonzept allerdings nicht vollständig – bei später tieferer (auch quantitativer) Beschäftigung mit der Quantenphysik muss die Komplementarität zwingend zu den Wesenszügen hinzugefügt werden, um Vollständigkeit zu erreichen (Müller, 2016).

Zusätzlich wird dafür jedoch der Begriff der *Verschränkung* als weiteres Grundprinzip aufgenommen. Sie ist ein fundamentales quantenphysikalisches Prinzip und vor allem zum Verständnis von Quantencomputern (i. A. verschränkte Qubits) und Quantenkryptographie unerlässlich. Außerdem wird die Verschränkung häufig bereits als „5. Wesenszug“ angesehen (vgl. Müller, 2016).

- **Demystifizierung**

Quantenphysik wird häufig als spukhaft und mystisch dargestellt (Carroll, 2021). Mit dem Ziel einer Demystifizierung der Quantenphysik soll auf die Dekohärenztheorie Bezug genommen werden – mit dem Kernziel eines Verständnisses für den Zusammenhang von klassischer Physik und Quantenphysik (Schmüser, 2012). Am Ende der Kurseinheit sollen beide Säulen der Physik nicht unvermittelt nebeneinanderstehen. Vielmehr soll auf Grundlage des Dekohärenzphänomens der Zusammenhang zwischen mikroskopischer und makroskopischer Welt argumentiert werden.

Zahlreiche Entscheidungen im Unterrichtskonzept basieren zudem neben den genannten Aspekten vor allem auf Erfahrungen und der unterrichtspraktischen Erprobungen und wissenschaftlichen Ergebnissen der Interviewstudien.

Dazu zählen Aspekte wie

- ➔ Begriffe (z. B. „Nicht-Determinismus“), *weil Schülerinnen und Schüler diese eher akzeptierten und/oder besser einordneten.*
- ➔ Bestimmte weiterführende Konzepte oder Begriffe (z. B. Basiszustände), *um Ungenauigkeiten in der Argumentation zu umgehen und die Inhalte anschlussfähig zu gestalten.*
- ➔ Einsatz der Simulation, *um träges Wissen zu reduzieren und den Unterricht explorativer und schülerzentrierter zu gestalten.*
- ➔ Aufbau, Funktionsweise und Darstellungen der Simulation
- ➔ Darstellung des Stern-Gerlach-Experimentes
- ➔ Aufbau und Inhalte von Folien
- ➔ Vorgehensweisen in der Sachstruktur, z. B. die Aufteilung des Themas Quantencomputer (einführend ganz zu Beginn und tiefergehend zum Schluss)
- ➔ ...

Literaturangaben zu den Hintergrundinformationen

- Burkard, Ulrike (2009): Quantenphysik in der Schule. Bestandsaufnahme, Perspektiven und Weiterentwicklungsmöglichkeiten durch die Implementation eines Medienservers. Zugl.: Bremen, Univ., Diss., 2009. Berlin: Logos Verl. (Studien zum Physik- und Chemielernen, 90).
- Carroll, Sean (2021): Was ist die Welt und wenn ja, wie viele. Wie die Quantenmechanik unser Weltbild verändert. Unter Mitarbeit von Jens Hagedstedt. 1st ed. Stuttgart: Klett-Cotta. Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=7028615>.
- Dür, Wolfgang; Heusler, Stefan (2014): Visualization of the Invisible: The Qubit as Key to Quantum Physics. In: The Physics Teacher 52 (8), S. 489–492. DOI: 10.1119/1.4897588.
- Dür, Wolfgang; Heusler, Stefan (2016): The Qubit as Key to Quantum Physics Part II: Physical Realizations and Applications. In: The Physics Teacher 54 (3), S. 156–159. DOI: 10.1119/1.4942137.
- Ferriz-Valero, Alberto; Østerlie, Ove; García Martínez, Salvador; García-Jaén, Miguel (2020): Gamification in Physical Education: Evaluation of Impact on Motivation and Academic Performance within Higher Education. In: International journal of environmental research and public health 17 (12). DOI: 10.3390/ijerph17124465.
- Foti, Caterina; Anttila, Daria; Maniscalco, Sabrina; Chiofalo, Maria (2021): Quantum Physics Literacy Aimed at K12 and the General Public. In: Universe 7 (4), S. 86. DOI: 10.3390/universe7040086.
- Hübel, Horst (2021): Das "freie" Photon der Quantenelektrodynamik: BoD - Books on Demand.
- Hutchison, David; Kanade, Takeo; Kittler, Josef; Kleinberg, Jon M.; Mattern, Friedemann; Mitchell, John C. et al. (2013): Serious Games Development and Applications. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (8101).
- Körhasan, Nilüfer Didiş; Miller, Kelly (2020): Students' mental models of wave–particle duality. In: Can. J. Phys. 98 (3), S. 266–273. DOI: 10.1139/cjp-2019-0019.
- Krijtenburg-Lewerissa, K.; Pol, H. J.; Brinkman, A.; van Joolingen, W. R. (2017): Insights into teaching quantum mechanics in secondary and lower undergraduate education. In: Phys. Rev. Phys. Educ. Res. 13 (1). DOI: 10.1103/PhysRevPhysEducRes.13.010109.
- Küblbeck, Josef; Müller, Rainer (2007): Die Wesenszüge der Quantenphysik. Modelle, Bilder, Experimente. 3., unveränd. Aufl. Köln: Aulis-Verl. Deubner (Praxis-Schriftenreihe Abteilung Physik, Bd. 60).
- Müller, R. (2016): Die verschwundenen Rätsel der Quantenphysik. In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule 65 (4), S. 17–20.
- Müller, R. (2016b): Quanteninformaton. Ein neues Paradigma für den Quantenphysik-Unterricht? In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule 65 (1), S. 4.
- Müller, Rainer (2003): Quantenphysik in der Schule. Berlin: Logos-Verl. (Studien zum Physiklernen, 26).
- Müller, Rainer; Wiesner, Hartmut (2002): Teaching quantum mechanics on an introductory level. In: American Journal of Physics 70 (3), S. 200–209. DOI: 10.1119/1.1435346.
- Pospiech, Gesche (2024, 02. Oktober). *Quantenphysik. Fortbildung zum neuen Lehrplan Sachsen* [Vortrag]. Quantenphysik in Klasse 12 - Impulse und Ideen für den überarbeiteten Lernbereich, Dresden.
- Riopel, Martin; Nenciovici, Lucian; Potvin, Patrice; Chastenay, Pierre; Charland, Patrick; Sarrasin, Jérémie Blanchette; Masson, Steve (2019): Impact of serious games on science learning achievement compared with more conventional instruction: an overview and a meta-analysis. In: Studies in Science Education 55 (2), S. 169–214. DOI: 10.1080/03057267.2019.1722420.
- Sadaghiani, Homeyra R. (2016): Spin First vs. Position First instructional approaches to teaching introductory quantum mechanics. In: 2016 Physics Education Research Conference Proceedings. 2016 Physics Education Research Conference. Sacramento, CA, 2016: American Association of Physics Teachers, S. 292–295.
- Sadaghiani, Homeyra R.; Munteanu, James (2015): Spin First instructional approach to teaching quantum mechanics in sophomore level modern physics courses. In: 2015 Physics Education Research Conference Proceedings. 2015 Physics Education Research Conference. College Park, MD, 2015: American Association of Physics Teachers, S. 287–290.
- Schecker, Horst; Wilhelm, Thomas; Hopf, Martin; Duit, Reinders (2018): Schülervorstellungen und Physikunterricht. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Schmüser, Peter (2012): Theoretische Physik für Studierende des Lehramts 1. Quantenmechanik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Springer-Lehrbuch). Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1578417>.
- Schorn, B. (2014): Quantenphysik in der Schule. Eine Unterrichtskonzeption zur Einführung in die Quantenphysik für die 10. Jahrgangsstufe. Dissertation. Technische Universität Dresden, Dresden. Physik.
- Stöckler, Manfred (2016): Zur Interpretation der Quantentheorie. EPR, Schrödingers Katze, Bell'sche Ungleichung. In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule 65 (4), S. 32–38.
- Wagner, Jürgen (2019): Erste Schritte in die Theoretische Physik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Weber, Kim-Alessandro (2018): Quantenoptik in der Lehrerfortbildung. Ein Bedarfsgeprägtes Fortbildungskonzept Zum Quantenobjekt „Photon Mit Realexperimenten. Berlin: Logos Verlag Berlin (Studien Zum Physik- und Chemielernen Ser, v.269).

Anhang

Materialien zum Unterrichtskonzept

I. Stoffverteilungsplan (als Orientierung)

DS	Inhalte (grob)	Inhalte (detaillierter)	Bemerkungen
1	Einstieg und Teilgebiete der Physik	<u>Einstieg</u> - Vorwissen zur Quantenphysik - Aktualität Quantenphysik und Quantencomputer - Primfaktorzerlegung als Anwendung von Quantencomputern <u>Teilgebiete der Physik</u> - Klassische Physik - Moderne Physik	
2	Grundkonzepte der klassischen Physik und Katze Q	<u>Grundkonzepte der klassischen Physik</u> - Determinismus und Messung mit passivem Charakter <u>Katze Q</u> - Spielerischer Zugang zu Grundbegriffen und Phänomenen	Spielen von Katze Q
3	Grundkonzepte der Quantenphysik, Grundbegriffe und Einstieg Zweizustandssysteme	<u>Grundkonzepte der Quantenphysik</u> - Nicht-Determinismus und Messprozess mit aktivem Charakter <u>Grundbegriffe</u> - Zustand, Präparation und Eigenschaft <u>Einstieg Zweizustandssysteme</u> - Definition	
4	Zweizustandssysteme und Einführung Wesenszüge der Quantenphysik	<u>Zweizustandssysteme</u> - Bit vs. Qubit - Stern-Gerlach-Experiment - Elektronenspin als Qubit <u>Einführung Wesenszüge</u> - Definition - Superposition	
5	Erarbeitung Wesenszüge der Quantenphysik	<u>Vorbereitung</u> - Wiederholung Gesetz der großen Zahlen - Handschuh- vs. Münzenkorrelation <u>Erarbeitung Wesenszüge der Quantenphysik</u> - Messprozess - Statistischer Charakter - Verschränkung / EPR-Experiment	Erarbeitung mit Simulation
6	Sicherung Wesenszüge + Leistungskontrolle	<u>Sicherung Wesenszüge</u> Aufgaben im Arbeitsheft	+ Leistungs-kontrolle
7	Dekohärenz	<u>Dekohärenz</u> - Dekohärenztheorie - Dekohärenzzeit + kurzer Ausblick exponentielles Wachstum	Erarbeitung mit Simulation
8	Quantencomputer	<u>Quantencomputer</u> - Informationsträger - Berechnungen und Auslesbarkeit von Rechenergebnissen - Einsatzgebiete, physikalische Umsetzung und Grenzen	

II. Linkliste zu Mentimeter und Kahoot

Doppelstunde im Stoffverteilungsplan	Themen	Link
Mentimeter		
1	Einführung und Teilgebiete der Physik	bit.ly/menti-ds1
2	Determinismus und passive Messung	bit.ly/menti-ds2
4	Peer Instruction zu Qubits	bit.ly/menti-ds3
Kahoot		
4	Grundprinzipien/Zweizustandssysteme	bit.ly/quanten-kahoot
5	Elektronenspin/Wiederholung Stochastik	
8	Quantencomputer/Dekohärenzzeit	

III. Arbeitsblätter (Schülervariante)

AB 1

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.

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.

$$\begin{array}{rcll} 131.071 \cdot 524.287 = & ? & \text{leicht} \\ ? \cdot ? = 68.718.821.377 & \text{schwer} \end{array}$$

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.

vgl. Schorn, B. (2014): Quantenphysik in der Schule. Eine Unterrichtskonzeption zur Einführung in die Quantenphysik für die 10. Jahrgangsstufe. Dissertation. Technische Universität Dresden, Dresden.

Die Gebiete der Physik

Klassische Physik

→ Die Teilgebiete der klassischen Physik entstanden ca. ab _____

Teilgebiet	Womit beschäftigt sich das Teilgebiet?

Moderne Physik

→ Die Teilgebiete der modernen Physik entstanden ca. ab _____

Teilgebiet	Womit beschäftigt sich das Teilgebiet?

Grundprinzipien der klassischen Physik und der Quantenphysik

	Vorbestimmtheit von Versuchsergebnissen	Charakterisierung des Messprozesses	Beispiel zur Verdeutlichung
KLASSISCHE PHYSIK	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.	Bei einer Messung stellt man nur eine vorher schon feststehende Eigenschaft fest.	
QUANTENPHYSIK	Ausgänge von Versuchen sind i. d. R. zufällig und damit grundsätzlich nicht vorhersagbar. Spätere Zustände eines physikalischen Systems sind damit zumeist unbestimmt.	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.	

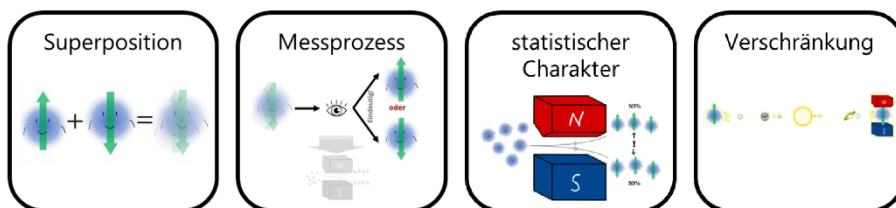


Die Wesenszüge der Quantenphysik

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

Hier freilassen für:
Definition Superposition

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

Wesenszug 2: Messprozess

Hier freilassen für:
Definition Messprozess

Aufgabe I:

- Öffne Simulation 1 (Messprozess).
- 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.

- Beantworte folgende Fragen:

Aussage	Entscheidung
Im Experiment ist der Stern-Gerlach-Apparat ein Messgerät für den Elektronenspin.	☐ richtig ☐ falsch
Das Elektron befindet sich <u>vor</u> dem Durchlaufen des Stern-Gerlach-Apparates in einem Superpositionszustand.	☐ richtig ☐ falsch
Das Elektron befindet sich <u>nach</u> 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

Hier freilassen für:
Definition Statistischer Charakter

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 **200 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)

Hier freilassen für:
Definition Verschränkung

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	Messzeitpunkt links	Elektronenspin rechts	Messzeitpunkt 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

Definitionen AB 3 (zum Ausschneiden/Einkleben/...)

Kann auf Ordneretiketten (192 x 61 mm) gedruckt werden.

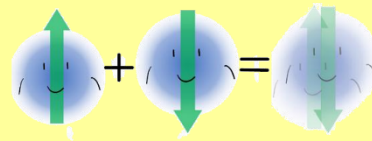
Definition: Superposition

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

Beispiel:

Spin eines Elektrons:

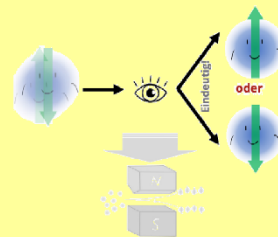
- Spin parallel zum Magnetfeld: Zustand A
- Spin anti-parallel zum Magnetfeld: Zustand B
- Spin gleichzeitig parallel und anti-parallel zum Magnetfeld: Zustand C = A + B



Definition: Messprozess

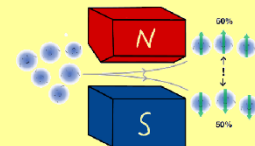
Der Messprozess in der Quantenphysik besitzt einen aktiven Charakter. Er zwingt das System, einen der möglichen Messwerte anzunehmen (Messergebnisse sind immer eindeutig) und verändert damit den Zustand des gemessenen Systems.

- 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: 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:

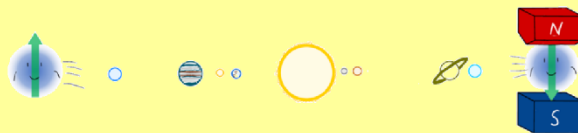
Wenn wir den Zustand eines Quantenobjektes kennen (z. B. durch vorherige Präparation), ist es uns möglich, **Wahrscheinlichkeiten** für die möglichen Ergebnisse eines Messprozesses an diesem Quantenobjekt anzugeben.

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: 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 Messprozess vgl. LEIIPhysik (o. J.) und Kuhn et al. (2000, S. 339), siehe Lehrbuch S. 26
Definition statistischer Charakter vgl. LEIIPhysik (o. J.), siehe Lehrbuch S. 28
Definition Verschränkung vgl. Quizlet (2023), siehe Lehrbuch S. 31

Definition Messprozess nach LEIIPhysik (o. J.) und Kuhn et al. (2000, S. 339), siehe Lehrbuch S. 26

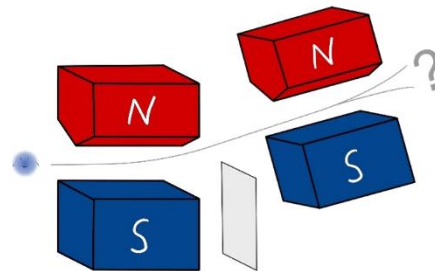
Definition statistischer Charakter vgl. LEIIPhysik (o. J.), siehe Lehrbuch S. 28

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

Aufgabe/Weitergedacht: Zwei identische Messprozesse nacheinander

Einzelne Elektronen durchlaufen eine Stern-Gerlach-Apparatur, durch die ihr Spin gemessen (und damit festgelegt) wird.

Durch einen geschickten Aufbau werden alle Elektronen, die nach dem ersten Messprozess die Eigenschaft „Spin up“ besitzen, an eine zweite, identische Stern-Gerlach-Apparatur weitergeleitet.



- a. Entscheide und begründe, ob das zweite Messergebnis zufällig oder vorhersagbar ist.

- b. Schlussfolgere: Befinden sich Quantenobjekte immer in Superpositionszuständen?



Warum ist unsere Alltagswelt klassisch?

Definition:	
Formelzeichen:	
Einheit:	

Objekt	Elektron	Staubteilchen	dünne Katze	dicke Katze
mögliche (Basis-)Zustände	Spin up	oben im Schrank	lebendig	lebendig
	Spin down	unten im Schrank	tot	tot
Masse ca.	10^{-30} kg	10^{-8} kg	5 kg	10 kg

1. Wähle ein Objekt.
2. Präpariere es in einem Superpositionszustand.
3. Stelle die gewünschte Umgebung (Temperatur, Druck, Lichteinfall) ein.
4. Schalte die Umgebung an und beobachte das Auflösen der Superposition.
5. Lies einen Näherungswert für die Dekohärenzzeit ab.
6. Wiederhole das Vorgehen systematisch für verschiedene Objekte und Einteilungen.

**Achtung:**

Die Stoppuhr hat eine Besonderheit: die Anzeige ist nicht linear, denn der Abstand zwischen zwei kleinen Teilstrichen unterscheidet sich immer um den Faktor 10. Der negative Exponent bei den Zehnerpotenzen sagt uns, an welcher Stelle hinter dem Komma die 1 steht (z. B. $10^{-4} \text{ s} = 0,0001 \text{ s}$).

Unterschiedliche Zeigerstellungen auf der Stoppuhr bedeuten also extrem große Zeitunterschiede.

Variiere die Objekte und die Umgebungsparameter systematisch, sodass du Vergleiche anstellen kannst.

Notiere deine Beobachtungen in der folgenden Tabelle:

Objekt	Temperatur	Druck	Lichteinfall	Dekohärenzzeit

Auswertung:

Vervollständige folgende Sätze:

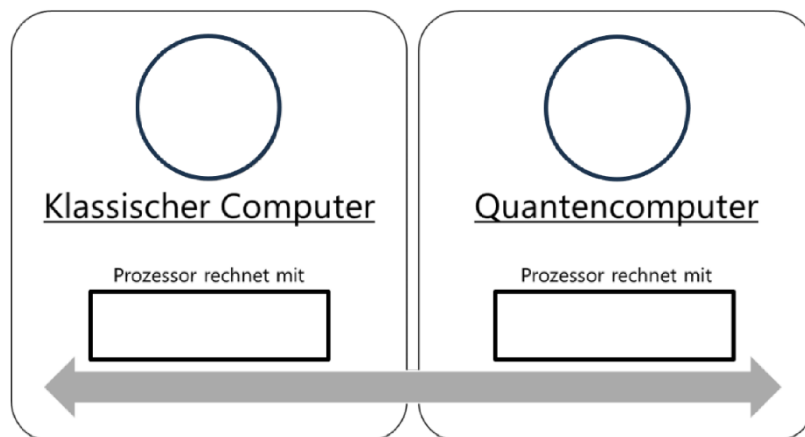
- **Masse**
Je *größer* die Masse des Objektes ist, umso _____ ist seine Dekohärenzzeit.
- **Temperatur**
Je *geringer* die Umgebungstemperatur ist, umso _____ ist die Dekohärenzzeit.
- **Druck**
Je *größer* der Umgebungsdruck ist, umso _____ ist die Dekohärenzzeit.
- **Lichteinfall**
Je *dunkler* die Umgebung eines Objektes ist, umso _____ ist seine Dekohärenzzeit.

Entscheide, ob folgende Aussagen wahr oder falsch sind:

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

Fazit:

Wie funktionieren Quantencomputer?



Quantenüberlegenheit

= Überlegenheit von Quantencomputern gegenüber klassischen Computern bei der Berechnung und Lösung von komplexen Problemen (z. B. Googles Quantencomputer Sycamore 2019).

Konkret unterscheidet sich das Grundprinzip von Quantencomputern von dem klassischer Computer in folgenden drei Punkten:

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.

Berechnungen („Quantenparallelismus“)

Lass dir von einem Experten erläutern, worin sich Berechnungen bei Quantencomputern im Vergleich zu klassischen Computern unterscheiden.

Notiere dir wesentliche Punkte und insbesondere die beiden dafür verantwortlichen Wesenszüge.

Klassischer Computer:

Berechnungen bei klassischen Computern werden ☐ gleichzeitig ☐ nacheinander ausgeführt.

Quantencomputer:

Berechnungen bei Quantencomputern werden ☐ gleichzeitig ☐ nacheinander 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:

- **1. Wesenszug:**

- **2. Wesenszug:**

Auslesbarkeit der Rechenergebnisse

Klassischer Computer	Quantencomputer
In einem klassischen Computer können Zwischenergebnisse jederzeit ausgelesen werden, ohne den Rechenfortschritt zu stören. Endergebnisse sind relativ sicher.	Das Auslesen von Rechenergebnissen stellt einen Messprozess dar. Darum ist das Auslesen von Zwischenergebnissen <u>nicht</u> möglich, denn der hierfür notwendige Messprozess würde den Superpositionszustand zerstören. Um das Endergebnis zu erhalten, ist ein Messprozess notwendig. Auch wenn alle Rechnungen durch die Superposition gleichzeitig abgelaufen sind – bei der Messung wird dieser Superpositionszustand zerstört und das Messergebnis ist eindeutig. Das heißt, die Messung liefert ein Rechenergebnis, und alle anderen Ergebnisse gehen unwiderruflich verloren. Man muss also den Ablauf der Rechnung vorher so gestalten, dass die Wahrscheinlichkeit für das gesuchte Ergebnis möglichst hoch ist und die Rechnung mehrfach/häufig wiederholen.
► Wesenszug Messprozess Durch den Messprozess erhält man beim Auslesen von Rechenergebnissen immer nur ein Ergebnis, alle anderen Ergebnisse sind unwiderruflich verloren. Ein Auslesen von Zwischenergebnissen ist nicht möglich.	
► 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.	

Mögliche Einsatzgebiete von Quantencomputern

- _____
- _____
- _____

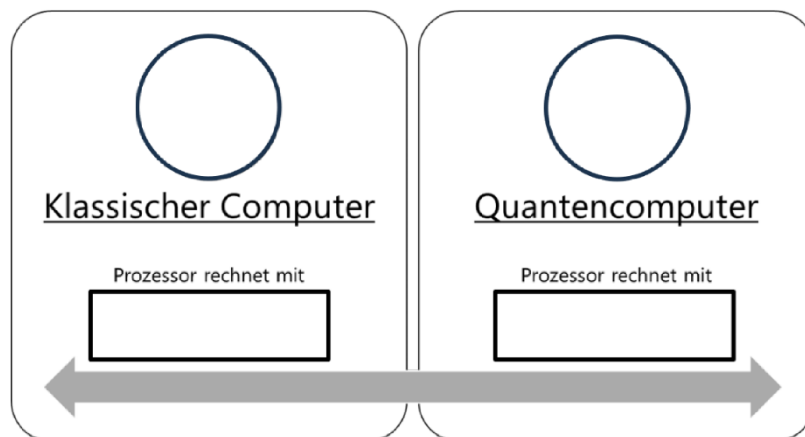
→

Herausforderung in der technischen Realisierung

Ein Hauptproblem:

Fehleranfälligkeit aufgrund _____.

Wie funktionieren Quantencomputer?



Quantenüberlegenheit

= Überlegenheit von Quantencomputern gegenüber klassischen Computern bei der Berechnung und Lösung von komplexen Problemen (z. B. Googles Quantencomputer Sycamore 2019).

Konkret unterscheidet sich das Grundprinzip von Quantencomputern von dem klassischer Computer in folgenden drei Punkten:

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.

Berechnungen („Quantenparallelismus“)

Klassischer Computer	Quantencomputer
Die Bits im Computer befinden sich einzeln jeweils immer in genau einem Zustand, d. h. sie besitzen genau einen Wert. Führt man eine Berechnung durch, ändern sich die Werte der Bits – das ist das Rechenergebnis. Klassische Computer arbeiten einzelne Berechnungen nacheinander ab, d. h. sie arbeiten „seriell“. <i>Ergänzung:</i> <i>Die meisten Prozessoren besitzen mittlerweile mehrere Prozessorkerne, die dadurch Berechnungen auch gleichzeitig („parallel“) durchführen können – jeder Kern für sich arbeitet aber wieder seriell.</i>	Mithilfe der Verschränkung kann man mehrere Qubits kombinieren. Mit jedem neuen Qubit verdoppelt sich die Anzahl an Zuständen, die sich in der Superposition befinden. Ein Qubit besitzt zwei mögliche Zustände, zwei verschränkte Qubits bereits vier. Drei Qubits acht, usw. n Qubits befinden sich in einer Superposition aus 2^n Zuständen. Die verschränkten Qubits bilden also einen großen Gesamtzustand, der aus sehr vielen (genauer: 2^n) superponierten Zuständen besteht. Qubits befinden sich also in einer Superposition aus allen möglichen Zuständen gleichzeitig. Führt man nun eine Berechnung durch, dann wird diese Rechnung an allen möglichen Kombinationen von Zuständen gleichzeitig durchgeführt. Das heißt, es werden bei einer einzigen Rechenoperation zahlreiche (genauer: 2^n) Rechnungen gleichzeitig durchgeführt („Quantenparallelismus“).
► 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.	

Auslesbarkeit der Rechenergebnisse

Lass dir von einem Experten erläutern, worin sich die Auslesbarkeit von Rechenergebnissen bei Quantencomputern im Vergleich zu klassischen Computern unterscheiden.

Notiere dir wesentliche Punkte und insbesondere die beiden dafür verantwortlichen Wesenszüge.

Klassischer Computer:

Rechenergebnisse bei klassischen Computern lassen sich auslesen. ☐ auch zwischendurch
☐ nur ganz zum Schluss

Das ausgegebene Endergebnis ist dabei ☐ auf jeden Fall
das Ergebnis der Berechnung. ☐ nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit

Quantencomputer:

Rechenergebnisse bei Quantencomputern lassen sich auslesen. ☐ auch zwischendurch
☐ nur ganz zum Schluss

Das ausgegebene Endergebnis ist dabei ☐ auf jeden Fall
das Ergebnis der Berechnung. ☐ nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit

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

Begründung anhand der Wesenszüge:

- **1. Wesenszug:**

- **2. Wesenszug:**

Mögliche Einsatzgebiete von Quantencomputern

- _____
- _____
- _____

→

Herausforderung in der technischen Realisierung

Ein Hauptproblem:

Fehleranfälligkeit aufgrund _____.

IV. Arbeitsblätter (Lösungen)

AB 1

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.

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.

$$\begin{array}{rcll} 131.071 \cdot 524.287 & = & ? & \text{leicht} \\ ? \cdot ? & = & 68.718.821.377 & \text{schwer} \end{array}$$

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.

vgl. Schorn, B. (2014): Quantenphysik in der Schule. Eine Unterrichtskonzeption zur Einführung in die Quantenphysik für die 10. Jahrgangsstufe. Dissertation. Technische Universität Dresden, Dresden.

Die Gebiete der Physik

Klassische Physik

→ Die Teilgebiete der klassischen Physik entstanden ca. ab **dem 17. Jahrhundert**.

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. ab **Beginn des 20. Jahrhunderts**.

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

Grundprinzipien der klassischen Physik und der Quantenphysik

	Vorbestimmtheit von Versuchsergebnissen	Charakterisierung des Messprozesses	Beispiel 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

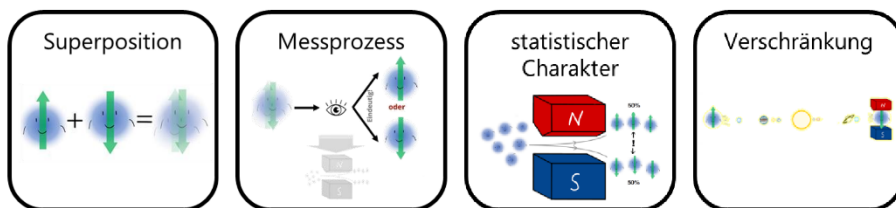


Die Wesenszüge der Quantenphysik

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



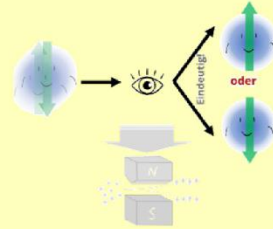
Lösungen
Aufgabe I c: richtig, richtig, falsch, richtig, falsch
Aufgabe II c: falsch, richtig
Aufgabe III d: falsch, richtig, richtig, falsch, Münze, falsch

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:

- Öffne Simulation 1 (Messprozess).
- 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.

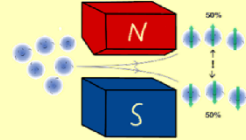
- Beantworte folgende Fragen:

Aussage	Entscheidung
Im Experiment ist der Stern-Gerlach-Apparat ein Messgerät für den Elektronenspin.	☒ richtig ☐ falsch
Das Elektron befindet sich <u>vor</u> dem Durchlaufen des Stern-Gerlach-Apparates in einem Superpositionszustand.	☒ richtig ☐ falsch
Das Elektron befindet sich <u>nach</u> 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 zehnmaliges 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		

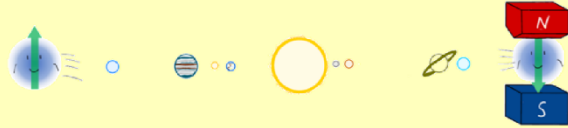
- e. Beantworte auf Basis deiner Beobachtungen folgende Fragen:

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:

- 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.
- Cooper-Paare sind zwei miteinander **verschränkte** (gekoppelte) Elektronen. Lasse solche Cooper-Paare durch Klick auf den entsprechenden Button auseinanderfliegen.
- 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	Messzeitpunkt links	Elektronenspin rechts	Messzeitpunkt rechts
Innen	--				
Außen	--				
--	Innen				
--	Außen				
Innen	Außen				
Außen	Innen				
Mitte	Mitte				
Innen	Mitte				
Mitte	Innen				
Außen	Mitte				
Mitte	Außen				

- 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



Dekohärenz und Dekohärenzzeit

Warum ist unsere Alltagswelt klassisch?

Aufgabe:

Untersuche mithilfe von Simulation 4 („Dekohärenzzeit“) die Abhängigkeit der Dekohärenzzeit von Objekten von deren Masse und Umgebungseinflüssen.

Vorbereitung:

Informiere dich mithilfe des Informationstextes über das Phänomen der „Dekohärenz“.

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

Übernimm die Definition der Dekohärenzzeit:

Definition:	Die Dekohärenzzeit ist die mittlere Zeitdauer, für die sich ein makroskopisches Objekt in einem echten quantenphysikalischen Superpositionszustand befinden kann.
Formelzeichen:	t_d
Einheit:	s

Durchführung:

Ermittle mithilfe der Simulation für verschiedene Objekte (Quantenobjekte und klassische Objekte) sowie jeweils für verschiedene Umgebungseinflüsse den Einfluss auf die Dekohärenzzeit.

Es stehen vier verschiedene Objekte zur Auswahl, die jeweils vereinfacht als Zweizustandssysteme beschrieben werden:

Objekt	Elektron	Staubteilchen	dünne Katze	dicke Katze
mögliche (Basis-)Zustände	Spin up Spin down	oben im Schrank unten im Schrank	lebendig tot	lebendig tot
Masse ca.	10^{-30} kg	10^{-8} kg	5 kg	10 kg

Gehe in der Simulation wie folgt vor:

1. Wähle ein Objekt.
2. Präpariere es in einem Superpositionszustand.
3. Stelle die gewünschte Umgebung (Temperatur, Druck, Lichteinfall) ein.
4. Schalte die Umgebung an und beobachte das Auflösen der Superposition.
5. Lies einen Näherungswert für die Dekohärenzzeit ab.
6. Wiederhole das Vorgehen systematisch für verschiedene Objekte und Einteilungen.

**Achtung:**

Die Stoppuhr hat eine Besonderheit: die Anzeige ist nicht linear, denn der Abstand zwischen zwei kleinen Teilstrichen unterscheidet sich immer um den Faktor 10. Der negative Exponent bei den Zehnerpotenzen sagt uns, an welcher Stelle hinter dem Komma die 1 steht (z. B. $10^{-4} \text{ s} = 0,0001 \text{ s}$).

Unterschiedliche Zeigerstellungen auf der Stoppuhr bedeuten also extrem große Zeitunterschiede.

Variiere die Objekte und die Umgebungsparameter systematisch, sodass du Vergleiche anstellen kannst.

Notiere deine Beobachtungen in der folgenden Tabelle:

Objekt	Temperatur	Druck	Lichteinfall	Dekohärenzzeit

Auswertung:

Vervollständige folgende Sätze:

- **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.

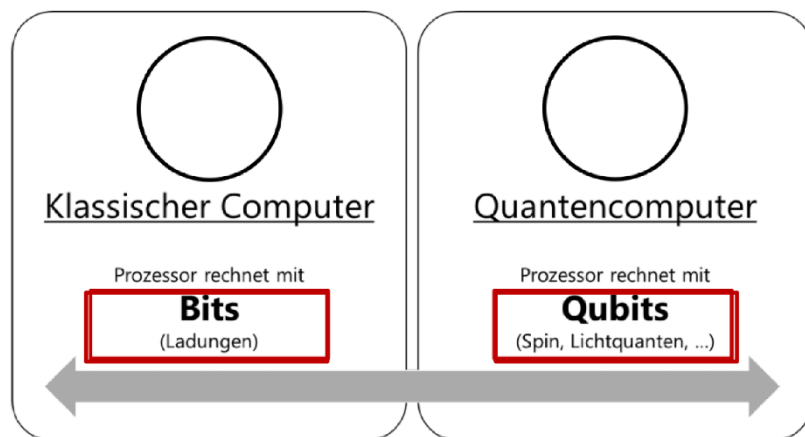
Entscheide, ob folgende Aussagen wahr oder falsch sind:

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

Fazit:

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

Wie funktionieren Quantencomputer?



Quantenüberlegenheit

= Überlegenheit von Quantencomputern gegenüber klassischen Computern bei der Berechnung und Lösung von komplexen Problemen (z. B. Googles Quantencomputer Sycamore 2019).

Konkret unterscheidet sich das Grundprinzip von Quantencomputern von dem klassischer Computer in folgenden drei Punkten:

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.

Berechnungen („Quantenparallelismus“)

Lass dir von einem Experten erläutern, worin sich Berechnungen bei Quantencomputern im Vergleich zu klassischen Computern unterscheiden.

Notiere dir wesentliche Punkte und insbesondere die beiden dafür verantwortlichen Wesenszüge.

Klassischer Computer:

Berechnungen bei klassischen Computern werden ☐ gleichzeitig ☒ nacheinander ausgeführt.

Quantencomputer:

Berechnungen bei Quantencomputern werden ☒ gleichzeitig ☐ nacheinander ausgeführt.

Dieses Phänomen nennt man **Quantenparallelismus**

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

Begründung anhand der Wesenszüge:

- 1. Wesenszug: **Superposition**

Durch das Superpositionsprinzip können Quantencomputer immer mehrere Rechnungen gleichzeitig ausführen.

- 2. Wesenszug: **Verschränkung**

Durch die Verschränkung von Qubits wächst die Anzahl von gleichzeitig möglichen Berechnungen exponentiell an.

Auslesbarkeit der Rechenergebnisse

Lass dir von einem Experten erläutern, worin sich die Auslesbarkeit von Rechenergebnissen bei Quantencomputern im Vergleich zu klassischen Computern unterscheiden.

Notiere dir wesentliche Punkte und insbesondere die beiden dafür verantwortlichen Wesenszüge.

Klassischer Computer:

Rechenergebnisse bei klassischen Computern lassen sich auslesen. ☒ auch zwischendurch
☐ nur ganz zum Schluss

Das ausgegebene Endergebnis ist dabei das Ergebnis der Berechnung. ☒ auf jeden Fall
☐ nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit

Quantencomputer:

Rechenergebnisse bei Quantencomputern lassen sich auslesen. ☐ auch zwischendurch
☒ nur ganz zum Schluss

Das ausgegebene Endergebnis ist dabei das Ergebnis der Berechnung. ☐ auf jeden Fall
☒ nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit

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

Begründung anhand der Wesenszüge:

- **1. Wesenszug: Messprozess**

Durch den Messprozess erhält man beim Auslesen von Rechenergebnissen immer nur ein Ergebnis, alle anderen Ergebnisse sind unwiderruflich verloren.

- **2. 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.

Mögliche Einsatzgebiete von Quantencomputern

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

→ als „Co-Rechner“

Herausforderung in der technischen Realisierung

Ein Hauptproblem:

Fehleranfälligkeit aufgrund **Dekohärenz**

V. Exemplarische Leistungskontrolle mit Erwartungshorizont

Leistungskontrolle

Leistungskontrolle

Klassenstufe 9

Quantenphysik

SCHULNAME

in Kooperation mit der TU Dresden und dem IFW Dresden

DATUM

Schuljahr 2023/24

Für die Bearbeitung der folgenden Aufgaben hast du 60 Minuten Zeit.
Maximal sind 25 BE zu erreichen.

Es sind keine Hilfsmittel zugelassen. Alle Lösungen sind auf einem separaten Blatt zu notieren. Das Aufgabenblatt muss zusammen mit den Lösungen abgegeben werden.

Viel Erfolg! 😊

Aufgabe 1

[6 BE]

Übernimm die untenstehende Tabelle und ordne die folgenden Begriffe in die Tabelle ein:

- | | |
|------------------------------|---------------------------------------|
| A. Determinismus | G. aktiver Messprozess |
| B. Überlagerung von Kräften | H. Mikroebene |
| C. Nicht-Determinismus | I. Makroebene |
| D. passive Messung | J. Superposition von Zuständen |
| E. eindeutige Messergebnisse | K. EPR-Experiment |
| F. echter Zufall | L. unterliegt physikalischen Gesetzen |

klassische Physik	Quantenphysik	sowohl klassische Physik, als auch Quantenphysik

Aufgabe 2

[1+2 BE]

- Definiere den Begriff „Zweizustandssystem“.
- Nenne je ein klassisches und ein quantenphysikalisches Beispiel für ein Zweizustandssystem (Objekt + betrachtete Eigenschaft).

Aufgabe 3

[2+2 BE]

Das Stern-Gerlach-Experiment ist ein fundamentales Experiment der Quantenphysik. Eine Schlussfolgerung dieses Experimentes ist es, dass Elektronen in Magnetfeldern als Qubits betrachtet werden können.

- Skizziere (beschriftet) den Versuchsaufbau des Stern-Gerlach-Experimentes.
- Nenne die physikalische Größe, bezüglich der Elektronen Qubits sind und begründe. Beziehe dich bei der Begründung auf ein Ergebnis des Stern-Gerlach-Experimentes.

Bitte die Rückseite beachten!

Aufgabe 4

[4+2 BE]

Du hast im Unterricht vier Wesenszüge der Quantenphysik kennengelernt.

- a. Benenne die vier Wesenszüge.
- b. Beschreibe einen Wesenszug anhand eines selbst gewählten Beispiels.

Aufgabe 5

[3 BE]

„In der Quantenphysik spielt Zufall eine entscheidende Rolle – willkürlich sind Quantenphysikalische Vorgänge aber nicht“

Positioniere dich begründet zu dieser Aussage.

Aufgabe 6

[3 BE]

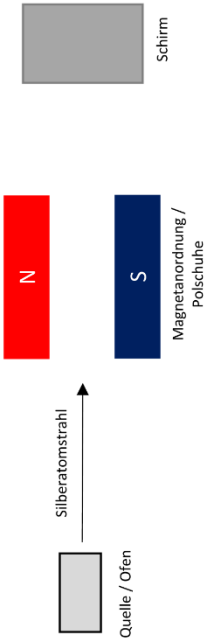
Sortiere die folgenden Aussagen nach wahr und falsch.

- A. Messergebnisse quantenphysikalischer Experimente sind stets eindeutig.
- B. Quantenobjekte befinden sich immer in einem Superpositionszustand.
- C. Durch einen Messprozess werden Superpositionszustände aufgelöst.
- D. Bei zwei verschränkten Elektronen wird die Information über das Messergebnis an einem Elektron mit Überlichtgeschwindigkeit auf das andere Elektron übertragen.
- E. Die Spins verschränkter Elektronen sind immer genau gleich.
- F. Bei der Verschränkung bilden mehrere Quantenobjekte ein Gesamtsystem und befinden sich in einem gemeinsamen Zustand.

Bewertungshinweise zur Leistungskontrolle

Klassenstufe 9

Quantenphysik

Aufgabe	AFN	Punktverteilung	Erwartungsbild		
			klassische Physik	Quantenphysik	sowohl klassische Physik, als auch Quantenphysik
1	I / II	pro korrekte Zuordnung: 0,5 BE	• Determinismus • Überlagerung von Kräften • passive Messung • Makroebene	• Nicht-Determinismus • echter Zufall • aktiver Messprozess • Mikroebene • Superposition von Zuständen • EPR-Experiment	• eindeutige Messergebnisse • unterliegt physikalischen Gesetzen
2 a.	I	pro Teilaspekt der Definition: 0,5 BE	• Ein Zweizustandssystem ist ein 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 Werte annehmen.		
2 b.	II	pro Beispiel: 1 BE (dabei jeweils 0,5 BE für Objekt und Eigenschaft)	• klassisches Beispiel: Lichtschalter (an/aus) • quantenphysikalisches Beispiel: Elektron (Spin up/down)		
3 a.	I	für vollständige Skizze mit Beschriftung: 2 BE (schematische Darstellung reicht, pro fehlendem Element/Beschriftung 0,5 BE Abzug)	 Das Diagramm zeigt einen Silberatomstrahl, der von einer Quelle/Ofen auf der linken Seite nach rechts in Richtung eines Schirms emittiert wird. Über dem Strahl befindet sich eine Magnetanordnung mit einem roten Nordpol (N) und einem blauen Südpol (S). Unter der Magnetanordnung steht 'Magnetanordnung / Polschuhe'. Der Strahl wird durch das Magnetfeld deflektiert und trifft auf dem Schirm in zwei getrennten Bereichen an.		

3 b.	II	für Angabe der physikalischen Größe: 1 BE für Begründung: 1 BE	• <u>Größe</u>: Elektronenspin • <u>Begründung</u>: Beim Stern-Gerlach-Experiment wurde nachgewiesen, dass der Elektronenspin in einem externen Magnetfeld nur die Werte up oder down annehmen kann, nichts dazwischen (Nachweis durch zwei getrennte Teilstrahlen).
4 a.	I	pro Wesenszug: 1 BE	• Superposition • Messprozess • statistischer Charakter • Verschränkung
4 b.	II	Beschreibung: 2 BE	• individuelle Lösung
5	III	für korrekte Positionierung: 1 BE für Begründung: 2 BE	• Positionierung: Der Aussage kann zugestimmt werden. • Begründung: Nach dem Einzel-Prinzip ist das Versuchsergebnis eines Experiments mit einem einzelnen Quantenobjekt im Allgemeinen zufällig. Allerdings ist es nicht willkürlich, denn die einzelnen möglichen Versuchsergebnisse unterliegen feststehenden Wahrscheinlichkeiten. Das führt dazu, dass bei einer großen Anzahl identischer Versuche eine statistisch stabile und festgelegte Verteilung entsteht (Ensemble-Prinzip).
6	II	pro korrekter Zuordnung: 0,5 BE	• wahr: A, C, F • falsch: B, D, E

VI. Exemplarische Stundenverlaufsplanungen

Verlaufsplan Doppelstunde 1

Fachliches Thema:

Motivation zum Quantencomputer (Primfaktorzerlegung), Teilgebiete der Physik

Weitere Themen:

Organisation inkl. Einwilligungserklärungen, **WISSENSCHAFTLICHE ERHEBUNG (→ freier Zeitblock)**

Zeitraumen:

90 Minuten

Lehrziele:

Kognitive Lehrziele

- Die Schülerinnen und Schüler kennen das Prinzip der Primfaktorzerlegung.
- Die Schülerinnen und Schüler kennen den Shor-Algorithmus und leiten daraus das Forschungsinteresse an Quantencomputern ab.
- Die Schülerinnen und Schüler kennen die Teilgebiete der klassischen Physik und der modernen Physik.
- Die Schülerinnen und Schüler beschreiben wesentliche Inhalte der jeweiligen Teilgebiete.

Affektive Lehrziele

- Die Schülerinnen und Schüler entwickeln ein Interesse am Konzept der Quantenmechanik.

Zeit (min)	Phase	Inhalt / Lehrer-Schüler-Interaktion	Sozialform	Medien
5	Organisation	• Begrüßung, Kurzvorstellung Projekt • Arbeitshefte und Lehrbücher austeilen	Frontal	PPT
35	Fragebogen	WISSENSCHAFTLICHE ERHEBUNG (→ freier Zeitblock)		Fragebogen
15	Einstieg	Mentimeter • Womit beschäftigt sich Quantenphysik? • Alltagsrelevanz • Wordcloud Begriffe • True/False Quantencomputer YouTube: • Tagesschau (1. Quantencomputer in Deutschland) https://www.youtube.com/watch?v=PSshTCmTrDo • Fraunhofer (Funktionsweise Quantencomputer, bis 2:10) https://www.youtube.com/watch?v=3s2bPNzOIFM	Plenum	Mentimeter, PPT
15	Erarbeitung 1 (Motivation)	Primfaktorzerlegung • Einführung/Erinnerung PPT • Aufgabe AH S. 1 komplett (Schwerpunkt a-c) • Vergleich im Plenum	Einzelarbeit	Arbeitsheft
5	Ergebnissicherung 1 (Motivation)	Quantencomputing und Shor-Algorithmus • Durcharbeiten der Vorlage auf AB1	Plenum	AB 1
15	Erarbeitung 2	Gebiete der klassischen und der modernen Physik: Mentimeter • Abgrenzung Quantenphysik zu anderen Teilgebieten, • Abfrage Teilgebiete der Physik • Zitat an Max Planck Lesen Lehrbuch Seite 4-6 (Kapitel 1.1) Ausfüllen der Tabelle	Plenum	Mentimeter, Lehrbuch, AB 1

Hausaufgabe:

Gebiete der klassischen und der modernen Physik

→ AH S. 2 Nr. 2

Verlaufsplan Doppelstunde 2

Fachliches Thema:

Klassische Physik vs. Quantenphysik

Weitere Themen:

Determinismus und Messung in der klassischen Physik,
Katze Q für den Paradigmenwechsel

Zeitraumen:

90 Minuten

Lehrziele:

Kognitive Lehrziele

- Die Schülerinnen und Schüler gewinnen Einblick in die Begriffe „Determinismus“ und „Rolle der Messung“ an je einem klassischen Beispiel.
- Die Schülerinnen und Schüler spielen die App Katze Q.
- Die Schülerinnen und Schüler erläutern die Grundidee des Gedankenexperimentes „Schrödingers Katze“.
- (Die Schülerinnen und Schüler kennen Grundbegriffe sowie weiterführende Begriffe der Quantenphysik aus dem Spielverlauf (Kittypedia-Einträge).

Affektive Lehrziele

- Die Schülerinnen und Schüler entwickeln ein Interesse an Themen zur Quantenphysik.
- Die Schülerinnen und Schüler sind intrinsisch motiviert beim Spielen der App.

Zeit	Phase	Inhalt / Lehrer-Schüler-Interaktion	Sozialform	Medien
5	Einstieg 1	• Vergleich Hausaufgabe • Abbildung: Mikro- zur Makroebene • Aktuellen Lottojackpot zeigen	Frontal/Plenum	PPT, Arbeitsheft
10	Einstieg 2	• Mentimeter und Diskussion: ◦ Determinismus beim Lotto ◦ Messung als passiver Prozess • Video Determinismus: https://www.youtube.com/watch?v=7HX-ff1YH3Q (bis 02:03)	Plenum	Mentimeter, PPT
5	Erarbeitung 1	PowerPoint-Folie als Zusammenfassung zeigen: Determinismus und passive Messungen → nichts aufschreiben, das passiert kommende Woche	Frontal	PPT
10	Einstieg 2, Orga	• Gedankenexperiment Schrödingers Katze: https://www.youtube.com/watch?v=bitYXYlmT2Y • Austeilen der iPads • PPT zu KatzeQ	Plenum	PPT
55		Spielen von KatzeQ	Partnerarbeit	iPad/KatzeQ
5		Vergleich Kreuzworträtsel/Lösungswort, Fragebogen zur Gamification austeilen/erläutern	Plenum/Frontal	

Verlaufsplan Doppelstunde 3

Fachliches Thema:

Determinismus, Indeterminismus und Grundbegriffe

Weitere Themen:

Beispiele für Zweizustandssysteme

Zeitraumen:

90 Minuten

Lehrziele:

Kognitive Lehrziele

- Die Schülerinnen und Schüler erklären die Begriffe „Determinismus“ und „passiver Charakter von Messungen“ an konkreten (klassischen) Beispielen.
- Die Schülerinnen und Schüler erklären die Begriffe „Indeterminismus“ und „aktiver Charakter von Messprozessen“ an konkreten (quantenphysikalischen) Beispielen.
- Die Schülerinnen und Schüler definieren die Begriffe Eigenschaft, Präparation und Zustand.
- Die Schülerinnen und Schüler definieren Zweizustandssysteme.
- Die Schülerinnen und Schüler nennen Beispiele für Zweizustandssysteme.

Zeit	Phase	Inhalt / Lehrer-Schüler-Interaktion	Sozialform	Medien
15	Einstieg	• Wiederholung Grundprinzipien der klassischen Physik (Determinismus, Passivität der Messung) am Beispiel Darts → z. B. paarweise erklären • Erinnerung Kreuzworträtsel KatzeQ → Nicht-Deterministisch • Wiederholung Schrödingers Katze → Messprozesse sind aktiv + <i>Quantenphysik steckt hier nur im Atomkern</i>	Frontal	PPT
15	Erarbeitung	• Vorbereitung Tabelle mit Beispielen • Tabelle gemeinsam ausfüllen	Frontal, Einzelarbeit	PPT, AB 2
15	Ergebnissicherung	Ah. S. 8, 10 Nr. 1, 3a-b inkl. Vergleich (ggf. S. 9 Nr. 2 für Schnelle)	Einzel-/ Partnerarbeit	Arbeitsheft
15	Erarbeitung/ Ergebnissicherung	Grundbegriffe • Durchlesen von Lehrbuch S. 13-15 • Übernehmen der Definitionen (Zustand, Präparation, Eigenschaft) • AH. S 10 Nr. 1	Einzel-/ Partnerarbeit	Lehrbuch, Hefter, Arbeitsheft
5	Ergebnissicherung	Vergleich der Aufgabe	Plenum	Arbeitsheft
15	Erarbeitung/ Ergebnissicherung	• Durchlesen von Lehrbuch S. 18 • AH. S. 11 Nr. 1 • Definition Zweizustandssystem in Hefter übernehmen	Einzelarbeit	Lehrbuch, Arbeitsheft, Hefter, PPT
10	Erarbeitung/ Ergebnissicherung	• Beispiele für Zweizustandssysteme (aus dem Alltag, Technik, ggf. Quantenphysik) auf Kärtchen schreiben und an Tafel pinnen → Sortierung nach Bit/Qubit durch Lehrkraft zu Beginn der nächsten Stunde	Partnerarbeit, Plenum, (Einzelarbeit)	Tafel

Verlaufsplan Doppelstunde 4

Fachliches Thema:
Elektronenspin als Qubit

Weitere Themen:
Einführung Superposition

Zeitrahmen:
90 Minuten

Lehrziele:
Kognitive Lehrziele

- Die Schülerinnen und Schüler erklären die physikalische Größe „Elektronenspin“ mit einer Stabmagneten-Analogie.
- Die Schülerinnen und Schüler erläutern die Quantisierung des Elektronenspins mithilfe des Stern-Gerlach-Versuches.
- Die Schülerinnen und Schüler ordnen den Elektronenspin als Zweizustandssystem ein.
- Die Schülerinnen und Schüler kennen den Begriff „Wesenszug“.

Zeit	Phase	Inhalt / Lehrer-Schüler-Interaktion	Sozialform	Medien
15	Einstieg 1	Kahoot → Wiederholung Messprozess/Indeterminismus/Mikroebene, Zustandsbegriff, Präparationsbegriff, Zweizustandssysteme	Einzelarbeit (kompetitiv)	Kahoot
5	Einstieg 2	Sortierung der Karten von letzter Stunde mit ZZS nach Bit/Qubit → Frage ins Plenum: Nach welchem Kriterium wurden die Karten sortiert? (Bit vs. Qubit)	Frontal/Plenum	Tafel
5	Erarbeitung 2	Tafelbild für Hefter: Ergänzung der Definition von Bit/Qubit	Frontal	PPT, Hefter
35	Erarbeitung 2	Elektronenspin und Stern-Gerlach-Versuch • Lesen vom Lehrbuch • Erstellen einer Mind-Map für den Hefter • Vergleich im Plenum (Inhalt wiederholen und Vergleich mit Lösungs-Mindmap)	Einzelarbeit und Partnerarbeit	Lehrbuch, Hefter
15	Ergebnissicherung 2	Peer-Instruction zu Elektronenspin und Stern-Gerlach-Versuch	2er-Teams	Mentimeter
10	Ergebnissicherung 2	Aufgaben zu Elektronenspin und Stern-Gerlach-Versuch • AH S. 12 Nr. 3 und 4 • Eigenständiges Vergleichen (Lösungen liegen am Lehrertisch aus)	Einzelarbeit	Arbeitsheft
5	Einstieg 3	Einführung: Wesenszüge der Quantenphysik		PPT

Verlaufsplan Doppelstunde 5

Fachliches Thema:

Wesenszüge der Quantenphysik (Erarbeitung)

Weitere Themen:

Wiederholung Elektronenspin als Qubit, Gesetz der großen Zahlen

Zeitraumen:

90 Minuten

Lehrziele:

Kognitive Lehrziele

- Die Schülerinnen und Schüler erklären das Superpositionsprinzip in der Quantenphysik am Beispiel des Elektronenspins im Magnetfeld.
- Die Schülerinnen und Schüler wenden das Gesetz der großen Zahlen auf ein (klassisches) Zufallsexperiment an.
- Die Schülerinnen und Schüler erarbeiten wesentliche Charakteristika und Begriffe (aktiver Charakter, begriffliche Abgrenzung zur klassischen Physik, Auflösen der Superposition) zum quantenmechanischen Messprozess und kennen dessen Definition.
- Die Schülerinnen und Schüler erarbeiten Charakteristika und Begriffe (Einzel- und Ensemble-Prinzip, statistische Vorhersagbarkeit) zum statistischen Charakter und kennen dessen Definition.
- Die Schülerinnen und Schüler erarbeiten das Prinzip der Verschränkung am Beispiel des EPR-Experimentes mit Elektronenspins und kennen dessen Definition.
- Die Schülerinnen und Schüler wissen, dass durch Verschränkung keine Informationsübertragung mit Überlichtgeschwindigkeit möglich ist.

Zeit	Phase	Inhalt / Lehrer-Schüler-Interaktion	Sozialform	Medien
15	Einstieg	Kahoot → Wiederholung Qubits/Elektronenspin/Superposition → Wiederholung/Erinnerung Gesetz der großen Zahlen	Einzelarbeit (kompetitiv), Plenum	Kahoot
20	Einstieg	• Wiederholung Wesenszüge • <u>Superposition</u> → Video Uni Wien zur Superposition → Übertragen auf den Elektronen-Spin → Beispiele für Superposition in der Quantenphysik • <u>Verschränkung</u> → Nobelpreis zur Verschränkung als Motivation Arten von Korrelationen • Korrelationsbegriff • Handschuhkorrelation • Münzenkorrelation	Frontal/Plenum	PPT
35	Erarbeitung	Erarbeitung der Wesenszüge 2, 3 und 4 (Anhand von Arbeitsblatt und Simulationen) → Eigenständige Kontrolle, Lösungen auf dem Arbeitsblatt	Partnerarbeit	Simulation (iPad), AB 3
15	Ergebnissicherung	Zusammentragen der Ergebnisse, Erarbeiten der Phänomene • Messprozess: Begriff, aktiv, Eindeutigkeit der Messergebnisse, Auflösen der Superposition • Statistischer Charakter: Einzel- und Ensembleprinzip, statistische Vorhersagbarkeit • Verschränkung: Cooper-Paare, EPR-Experiment, keine Informationsübertragung möglich → + Einkleben der Definitionen	Frontal/Plenum	PPT, AB 3
5	Ergebnissicherung	Beginn Sicherungs- und Anwendungsaufgaben zu den Wesenszügen im Arbeitsheft • Wesenszug 1/2: AH. S. 15 Nr. 3 (+ ggf. S. 16 Nr. 4) • Wesenszug 3: AH. S. 17 Nr. 6 • Wesenszug 4: AH. S. 25 Nr. 11 → Soweit wir kommen, Rest kommende Stunde	Einzelarbeit	Arbeitsheft

Verlaufsplan Doppelstunde 6

Fachliches Thema:

Wesenszüge der Quantenphysik (Ergebnissicherung)

Weitere Themen:

Leistungskontrolle

Zeitraumen:

90 Minuten

Lehrziele:

Kognitive Lehrziele (Wiederholung)

- Die Schülerinnen und Schüler erklären das Superpositionsprinzip in der Quantenphysik am Beispiel des Elektronenspins im Magnetfeld.
- Die Schülerinnen und Schüler wenden das Gesetz der großen Zahlen auf ein (klassisches) Zufallsexperiment an.
- Die Schülerinnen und Schüler erarbeiten wesentliche Charakteristika und Begriffe (aktiver Charakter, begriffliche Abgrenzung zur klassischen Physik, Auflösen der Superposition) zum quantenmechanischen Messprozess und kennen dessen Definition.
- Die Schülerinnen und Schüler erarbeiten Charakteristika und Begriffe (Einzel- und Ensemble-Prinzip, statistische Vorhersagbarkeit) zum statistischen Charakter und kennen dessen Definition.
- Die Schülerinnen und Schüler erarbeiten das Prinzip der Verschränkung am Beispiel des EPR-Experimentes mit Elektronenspins und kennen dessen Definition.

Zeit	Phase	Inhalt / Lehrer-Schüler-Interaktion	Sozialform	Medien
5	Einstieg	Nachtrag: Basiszustände bei Superposition	Frontal	PPT/ Hefter
30	Einstieg	Sicherungs- und Anwendungsaufgaben zu den Wesenszügen im Arbeitsheft • Wesenszug 1/2: AH. S. 15 Nr. 3 (+ ggf. S. 16 Nr. 4) • Wesenszug 3: AH. S. 17 Nr. 6 • Wesenszug 4: https://www.lernort-mint.de/aufgaben/physik-test-verschraenkung-von-quantenobjekten/ + Klärung offener Fragen	Einzelarbeit/ Partnerarbeit	Arbeitsheft
55	Erarbeitung	Leistungskontrolle		LK

Verlaufsplan Doppelstunde 7

Fachliches Thema:

Dekohärenz und Dekohärenzzeit

Weitere Themen:

Wiederholung Begriffe der Wesenszüge, exponentielles Wachstum

Zeitraumen:

90 Minuten

Lehrziele:

Kognitive Lehrziele

- Die Schülerinnen und Schüler erläutern die Dekohärenztheorie.
- Die Schülerinnen und Schüler definieren den Begriff Dekohärenzzeit.
- Die Schülerinnen und Schüler erarbeiten die Abhängigkeit der Dekohärenzzeit von den Parametern Masse, Temperatur, Druck und Lichteinfall.
- Die Schülerinnen und Schüler wenden die Dekohärenz auf makroskopische Systeme an und schlussfolgern, dass Superposition im Alltag praktisch nicht vorkommt.
- Die Schülerinnen und Schüler gewinnen Einblick in exponentielle Wachstumsprozesse.

Zeit	Phase	Inhalt / Lehrer-Schüler-Interaktion	Sozialform	Medien
10	Einstieg	Wiederholung Wesenszüge → Moderationskarten mit Begriffen werden an SuS verteilt und an der Tafel sinnvoll geordnet	Plenum	Moderationskarten
15	-	Rückgabe/Auswertung LKs	Frontal	PPT
15	Einstieg	Wiederholung/Vertiefung: • Aufgabe/Vergleich: ○ https://www.lernort-mint.de/aufgaben/physik-test-verschraenkung-von-quantenobjekten/ ○ AB 3.1: Weitergedacht (2 Messprozesse nacheinander)	Einzelarbeit / Plenum	Arbeitsheft, AB 3.1
10	Einstieg	Leitfrage: Warum ist unsere Welt klassisch? → ChatGPT fragen → Video Dekohärenz	Frontal	PPT
30	Erarbeitung	AB Dekohärenz und Dekohärenzzeit mit Simulation → Infotext zu Dekohärenz und Dekohärenzzeit lesen, Definition übernehmen. Textvergleich → Erarbeitung Dekohärenzzeit und Eigenschaften inkl. Vergleich	Partnerarbeit/ Frontal	Simulation (iPad), AB 4, PPT
5	Ergebnissicherung	Aufgabe Dekohärenz: AH. S. 23 Nr. 3 und 4 → inkl. Vergleich → Hausaufgabe ankündigen	Einzelarbeit	Arbeitsheft
5	Einstieg	Einstieg exponentielles Wachstum	Frontal, Einzelarbeit	Arbeitsheft, PPT

Hausaufgabe:

Was ist eine Berechnung bei einem Computer?

- Lesen Lehrbuch S. 43

Verlaufsplan Doppelstunde 8

Fachliches Thema:
Quantencomputer

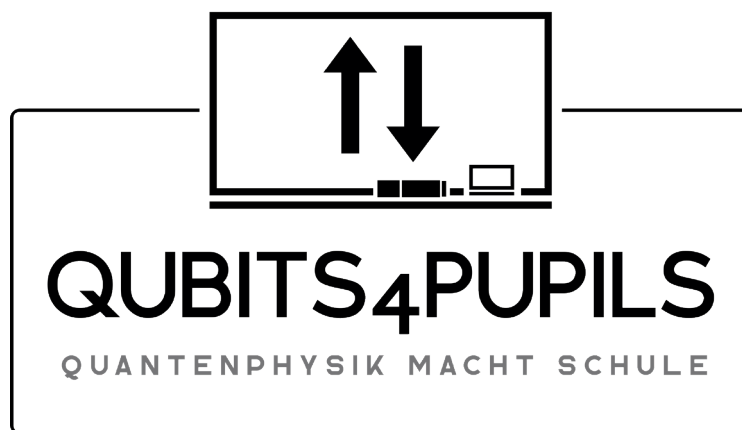
Weitere Themen:
WISSENSCHAFTLICHE ERHEBUNG (→ freier Zeitblock)

Zeitraumen:
90 Minuten

Lehrziele:
Kognitive Lehrziele

- Die Schülerinnen und Schüler erklären das Grundprinzip von Quantencomputern mithilfe der Wesenszüge. Sie unterscheiden dabei die Aspekte Informationsträger, Berechnungen und Auslesbarkeit von Rechenergebnissen.
- Die Schülerinnen und Schüler nennen potentielle Einsatzgebiete für Quantencomputer.
- Die Schülerinnen und Schüler erklären die Grenzen und Hindernisse bei der Entwicklung von Quantencomputern anhand der Dekohärenz.

Zeit	Phase	Inhalt / Lehrer-Schüler-Interaktion	Sozialform	Medien
5	Einstieg	Kahoot • Forschungsstand Quantencomputer + Laborbedingungen → Vorschau auf die Problematik der Dekohärenzzeit von Qubits • Wiederholung Primfaktorzerlegung/Shor-Algorithmus • Vorschau Hybrid-Computer • Wiederholung Dekohärenzzeit	Einzelarbeit (kompetitiv)	Kahoot
10	Einstieg	• Definition Quantencomputer • Grundidee Quantencomputer • Roadmap Quantencomputer IBM • Austeilen AB 5.1/5.2 • Informationsträger Quantencomputer	Frontal / Plenum	PPT, AB 5
25	Erarbeitung	Erarbeitung Berechnungen/Auslesbarkeit 1. Einteilung (bestenfalls 50:50): Fensterreihe: Expertengruppe für Berechnungen Wandreihe: Expertengruppe für Auslesbarkeit von Ergebnissen 2. Innerhalb der Expertengruppe: Lesen der Information, ggf. Diskussion mit Nachbarn 3. Nach 5 Minuten: Pärchenbildung mit je einem Experten, gegenseitiges Erklären und gemeinsames Ausfüllen der jeweils fehlenden Infos	Einzelarbeit/ Partnerarbeit	AB 5
15	Ergebnissicherung	Vergleich im Plenum, Diskussion der Ergebnisse Input: Einsatzgebiete und Grenzen bei der Umsetzung → falls Zeit ist: Lückentext AH S. 25 Nr. 3	Plenum	PPT, AB 5
35	Datenerhebung	WISSENSCHAFTLICHE ERHEBUNG (→ freier Zeitblock)		Fragebogen



DRESDEN
concept
SCIENCE AND
INNOVATION CAMPUS



Leibniz
Leibniz
Gemeinschaft