



Quantenphysik

Von Schrödingers Katze
zum Quantencomputer

Klasse 9 - Schülerlehrtext

Dieses Heft gehört:

Klasse:

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“ – vielleicht ist dieser Begriff dem ein oder anderen bereits über den Weg gelaufen. In Gesprächen mit Schülerinnen und Schülern habe ich erfahren, dass beim Begriff Quantenphysik den meisten etwas mit kleinsten Objekten wie Elektronen, Atomen oder Molekülen in den Sinn kommt. Und dass viele bei dem Begriff denken, dass dieses Teilgebiet der Physik sehr kompliziert sei.

Doch dass Quantenphysik auch unkompliziert geht und man viele spannende Phänomene ohne große Mathematik-Kenntnisse verstehen kann, zeigt dieses Heft. Hier werden ganz fundamentale Effekte der Quantenphysik beschrieben – ohne komplizierte Rechnungen und möglichst weit vereinfacht. Allerdings immer mit dem Anspruch, physikalisch korrekt zu bleiben.

Viel Spaß beim Kennenlernen der Quantenphysik – dem wohl wichtigsten physikalischen Gebiet unserer heutigen Zeit!

Carsten Albert, Studienautor

Zum Aufbau des Lehrbuches

Dieses Lehrbuch entstand im Rahmen einer bildungswissenschaftlichen Studie. Es ist kapitelweise aufgebaut und führt Schritt für Schritt zum grundsätzlichen Funktionsprinzip eines Quantencomputers.

In Kapitel 1 und 2 wird die Quantenphysik ganz grundsätzlich eingeführt.

Kapitel 1 beschäftigt sich mit dem Aufbau der Physik generell sowie mit grundsätzlichen allgemeingültigen Prinzipien der klassischen Physik.

Kapitel 2 beleuchtet dem Gegenüber einführend die Quantenphysik und grundsätzliche Prinzipien dieses physikalischen Teilgebietes.

In **Kapitel 3** werden grundlegende Begriffe einführt, die zu weiteren Arbeit notwendig sind.

Kapitel 4 beschäftigt sich mit Zweizustandssystemen, anhand derer die Quantenphysik später im Kern erarbeitet wird.

Kapitel 5 führt anschließend vier wesentliche und allgemeine Prinzipien der Quantenphysik ein – die s. g. „Wesenszüge“ der Quantenphysik.

In **Kapitel 6** wird die Dekohärenztheorie skizziert – eine mögliche Erklärung, weshalb unsere alltägliche Welt geprägt ist von klassischer Physik, obwohl uns die Quantenphysik immer umgibt.

Kapitel 7 beleuchtet zum Schluss die grundsätzliche Funktionsweise von Quantencomputern und zeigt auf, welche Chancen und Grenzen diese künftige Technologie birgt.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung: Warum Quantenphysik? _____	1
Kapitel 1: Was ist klassische Physik? _____	3
Kapitel 2: Paradigmenwechsel und neue Begriffe in der Quantenphysik _____	9
Kapitel 3: Grundbegriffe der klassischen Physik und der Quantenphysik _____	13
Kapitel 4: Qubits und Elektronenspin _____	17
Kapitel 5: Wesenszüge der Quantenphysik – Was macht Quantenphysik aus? _____	23
Kapitel 6: Dekohärenz – Zusammenhang zwischen klassischer Physik und Quantenphysik _____	37
Kapitel 7: Anwendungen von Qubits – Quantencomputer _____	43
Anhang 1: Formulierungshilfen _____	50
Anhang 2: Quellenverzeichnis _____	52

Warum Quantenphysik?

Warum ist Quantenphysik wichtig?

Quantenphysik ist eine der beiden großen modernen Teilgebiete der Physik. Sie prägt unser modernes **naturwissenschaftliches Weltbild** wie keine andere Wissenschaft und erklärt, wie unsere Welt im kleinsten aufgebaut ist. Damit ermöglicht sie uns ein Verständnis darüber, wie die Welt im Kern funktioniert.

Damit wird die Quantenphysik vor allem auch für den **technologischen Fortschritt** immer bedeutsamer. Viele aktuelle Technologien basieren auf Quantenphysik und konnten nur durch die Quantentheorie entwickelt werden. Dazu zählen neben Erfindungen wie Laser oder der Atomuhr vor allem auch Halbleiter – und damit die Grundlage praktisch sämtlicher moderner elektronischen Geräte.

Doch die Entwicklung geht weiter – mittlerweile stehen wir vor einer s. g. „zweiten Quantenrevolution“. Hier geht es nicht mehr darum, das Verhalten von großen Mengen kleinster Objekte zu verstehen und zu kontrollieren (wie etwa bei Halbleitern, die aus sehr vielen Atomen bestehen). Stattdessen möchte man *einzelne* Quantenobjekte manipulieren. Diese Forschung öffnet das Zeitalter der Quanteninformation und damit z. B. des **Quantencomputers**, um den es im letzten Kapitel physikalisch gehen soll. Doch warum hat Industrie, Forschung und Gesellschaft eigentlich so ein großes Interesse an Quantencomputern?

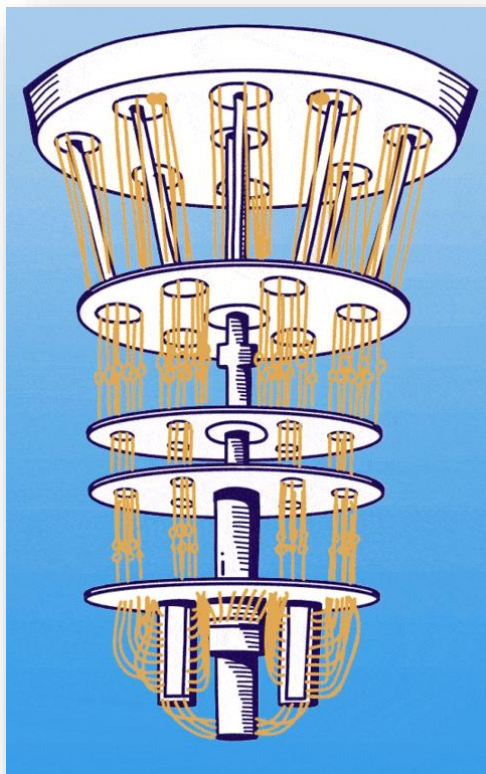


Abb. 1: Ein Quantencomputer sieht ganz anders aus als ein klassischer Computer.^{A1}

ZUSATZINFO⁰

Erfindungen der ersten und zweiten Quantenrevolution

Erste Quantenrevolution:

die Physik von vielen Quantenobjekten

- LASER
(CD, Laserschweißen, ...)
- Halbleiter
(Transistoren, Dioden, ...)
- Kernspintomographie
(MRT, ESR, NMR, ...)
- Uhren
(Atomuhren, Positioning, ...)
- Quantenmetrologie (SI-System)

Zweite Quantenrevolution:

die Physik einzelner Quantenobjekte

- Quantencomputer
- Quanteninformation
- Quantenkryptografie
- Quanteninternet
- Quantenbildgebung

Warum Quantenphysik?

Quantencomputer und die Verschlüsselung unserer Daten

Parallel zur Weiterentwicklung von klassischen Computerchips findet seit einiger Zeit sehr intensive Forschung und Entwicklung zu Quantencomputern statt. Quantencomputer, genauer Quantenprozessoren, nutzen im Gegensatz zu klassischen Prozessoren keine elektrischen Schaltkreise mehr – sie nutzen stattdessen die Eigenschaften von **Quantenobjekten** und deren **Zuständen**.

Die Grundidee hinter einem Quantencomputer: man nutzt s. g. „**Qubits**“ (**Quanten-Bits**) als Recheneinheiten, mit denen im Prinzip mehrere Rechnungen gleichzeitig ausgeführt werden können („Superpositionsprinzip“).

Theoretische Studien und mittlerweile auch praktische Versuche an echten Quantencomputern konnten bereits belegen, dass **Quantencomputer** bestimmte Probleme und Aufgaben der Informatik sehr viel effizienter und schneller lösen können als klassische (Super-)Computer das können.

Eines dieser Probleme ist die Primfaktorzerlegung, welche meist zur sicheren Übertragung von Daten benötigt wird. Im Jahr 1994 veröffentlichte **Peter Shor** einen Algorithmus, mit dessen Hilfe große Zahlen in seine Primfaktoren zerlegt werden können¹. Das funktioniert mit dem „Shor“-Algorithmus sehr viel schneller, als das üblicherweise der Fall ist – aber nur, wenn der Algorithmus auf einem Quantencomputer ausgeführt wird². Durch diesen Algorithmus sind Quantencomputer in der Lage, aktuelle Verschlüsselungstechniken praktisch nutzlos zu machen.

INFO

Primfaktorzerlegung und Shor-Algorithmus³

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, E-Mails, Anmeldedaten, 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.

1 - vgl. Kempfert (2013)

2 - vgl. Aktas (2019)

3 - vgl. Schorn (2014)

Kapitel 1

Was ist klassische Physik?

1. Was ist klassische Physik?

1.1 Physik im 19. und 20. Jahrhundert

Klassische Physik

Wir wissen, dass die wissenschaftliche Forschung in den Naturwissenschaften und insbesondere auch in der Physik alles andere als abgeschlossen ist. Ständig entdecken Forscher:Innen auf der ganzen Welt neue Phänomene, entwickeln Theorien und legen so die Grundlagen neuer Technologien.

Diese Einsicht unterscheidet sich deutlich von den Ansichten der Naturgelehrten gegen Ende des 19. Jahrhunderts. Damals war man der Meinung, dass die Physik weitgehend fertig ist und alle Phänomene und Erklärungen dafür bekannt seien.

Beispielsweise wurde dem bekannten Physiker Max Planck, der als einer der Erfinder der Quantenphysik gilt und nach dem heute viele wissenschaftliche Institute benannt sind, damals davon abgeraten, theoretischer Physiker zu werden. Die damalige Ansicht war, dass ein Großteil der Physik bereits bekannt bzw. erforscht sei, und es nur noch wenige Lücken zu schließen gibt. Dort würde man also eh nicht mehr viel Neues finden. Doch letztlich ließ sich Max Planck nicht davon abbringen, Physiker zu werden.

Die physikalischen Teilgebiete, die zu dieser Zeit in ihren Grundlagen erforscht waren, werden allgemein hin unter dem Begriff „**klassische Physik**“ zusammengefasst. Dazu zählen u. a.

- **Newton'sche Mechanik (mit Wellenlehre und Akustik)**
Die klassische Mechanik beschreibt die Bewegung von festen, flüssigen und gasförmigen Körpern unter dem Einfluss von Kräften.
Die Grundlage für die klassische Mechanik bilden die Newtonschen Gesetze (z. B. $F = m \cdot a$).
- **Elektrizitätslehre und Optik**
Die Elektrizitätslehre beschäftigt sich mit elektrischen Ladungen und mit elektrischen und magnetischen Feldern, die Optik mit dem Verhalten und den Phänomenen von Licht.
- **Wärmelehre**
Die Wärmelehre befasst sich mit Prozessen, bei denen Energie in Form von Wärme ausgetauscht wird, sowie mit Größen wie Temperatur, Druck und Volumen.

All diese Teilgebiete sind ca. ab dem 17. Jahrhundert entstanden und haben sich seitdem stetig weiterentwickelt⁵. Die Konzepte und Ideen der klassischen Physik sind sehr gut verstanden und finden auch in unserem Alltag immer wieder Anwendung. Vor allem die klassische Mechanik kann weitestgehend mit unseren menschlichen Sinnesorganen überprüft werden – wir sehen, wie zwei Autos sich aufeinander zu bewegen, spüren die Erdanziehungskraft, wenn uns etwas auf den Fuß fällt und hören es, wenn wir in die Hände klatschen. Die Vorhersagen der Newton'schen Mechanik entsprechen damit unseren Erwartungen und sind mit unseren Alltagserfahrungen besser begreifbar als moderne physikalische Theorien (siehe unten).

4 – vgl. LEI-Physik (o. J.a)

5 – vgl. Hoffmann (1998)

1. Was ist klassische Physik?

Moderne Physik

Ende des 19. Jahrhunderts und spätestens ab Beginn der 1900er Jahre fanden Wissenschaftler:Innen Gesetzmäßigkeiten, die mit der klassischen Physik nicht mehr erklärbar waren – manche der Beobachtungen haben den Gesetzen der klassischen Physik sogar widersprochen.

Für die **makroskopische** Beschreibung (siehe Infobox) von Vorgängen in Natur und Technik ermöglicht die klassische Physik ein nahezu vollständiges Verständnis. Sie versagt aber bei der Beschreibung des **mikroskopisch Kleinen** (Atome, Moleküle, Elektronen, ...) und des **astronomisch Großen** (Weltraum, Galaxien, ...).

Die Erforschung des Atomaufbaus oder der Sonnenstrahlung waren Ausgangspunkt für die Entwicklung neuer Gebiete der Physik. Zur „**modernen Physik**“ zählen vor allem folgende Teilgebiete:

- **Relativitätstheorie**

Die Relativitätstheorie wurde von Albert Einstein entwickelt und beschreibt die Struktur von Raum und Zeit. Nach der speziellen Relativitätstheorie sind Längen nicht immer gleich lang, sondern hängen von der Bewegung von Körpern ab. Gleiches gilt für die Zeit: sie vergeht nicht immer gleich schnell. Einige Jahre später entwickelte Einstein die allgemeine Relativitätstheorie, die zusätzlich Aussagen darüber macht, welche Auswirkungen schwere Objekte (z. B. Sterne) auf Raum und Zeit haben.

- **Quantenphysik**

Die Quantenphysik gilt als die am besten bestätigte und fundamentalste Theorie überhaupt. Bei physikalischen Objekten, die in der Größenordnung von Atomen oder sogar kleiner sind, brechen die Gesetze der klassischen Physik zusammen und liefern keine korrekte Beschreibung der Natur mehr. Darum entwickelte sich ab Beginn des 20. Jahrhunderts die Quantenphysik: Sie beschreibt das Verhalten kleinster Objekte wie Atome oder Elektronen und ist damit die Grundlage für viele moderne Forschungsgebiete wie Halbleiterphysik oder Teilchenphysik.

ZUSATZINFO

Bohr'sches Atommodell als Problem

Eines der bekanntesten Atommodelle ist das von Niels Bohr. Bei diesem Modell zum Atomaufbau bewegen sich die Elektronen auf stabilen Kreisbahnen um den Atomkern. Die Bahnen werden manchmal auch als „Schalen“ bezeichnet und besitzen einen festen Radius. Die Elektronen bewegen sich in diesem Modell ausschließlich auf den festgelegten Bahnen und geben dort keine Energie ab.

Das Bohr'sche Atommodell konnte das Spektrum des einfachsten Elementes (Wasserstoff) korrekt vorhersagen, für alle anderen Elemente liefert es allerdings falsche Ergebnisse. Außerdem müssten die Elektronen nach den Gesetzen der klassischen Physik bei ihrer Bewegung um den Atomkern dauerhaft Energie in Form von Licht abgeben – das heißt, sie müssten immer langsamer werden und schließlich in den Atomkern stürzen.

1. Was ist klassische Physik?

Erst durch die **Quantenphysik** wurde es möglich zu verstehen, wie sich die **Elektronen in der Atomhülle** verhalten und warum sie dabei keine Energie verlieren. Das Verständnis vom Atomaufbau war damit einer der Punkte, bei dem die klassische Physik keine hinreichenden Erklärungen mehr liefern konnte und eine modernere Theorie benötigt wurde.

ZUSATZINFO

Von der Mikro- zur Makroebene*

mikroskopisch makroskopisch

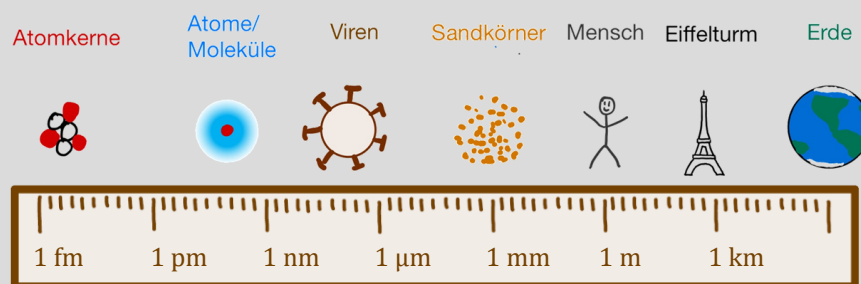


Abb. 2: Mikro- und Makroebene.

1.2 Determinismus

Unser Alltag scheint bestimmt zu sein von unzähligen Zufällen. Zu den typischen zufälligen Ereignissen zählt beispielsweise das Würfeln einer 6 beim „Mensch-Ärgere-Dich-Nicht“ oder der 6er im Lotto. Auch wenn die Wahrscheinlichkeit für 6 Richtige im Lotto nur bei etwa 1:140.000.000 liegt, kommt solch ein Gewinn dennoch hin und wieder vor.

Ganz objektiv und physikalisch betrachtet ist das Ziehen der Lottozahlen aber **kein rein zufälliger Prozess**. Würden wir nämlich die Position der Kugeln in der Lottomaschine, deren Form, die Drehgeschwindigkeit der Trommel, etc. nur genau genug kennen, könnten wir mithilfe der Gesetze der Newton'schen Mechanik **schon im Vorfeld berechnen**, welche Zahlen gezogen werden.⁶

Diese Auffassung wird in der Wissenschaftsphilosophie **Determinismus** genannt:

Der Begriff Determinismus besagt in einer physikalischen Theorie, dass es Gesetze gibt, die den Zustand eines physikalischen Systems zu späteren Zeiten bestimmen, wenn der gegenwärtige Zustand (Geschwindigkeit, Ort, ...) exakt gegeben ist.⁷

Dass uns das Ziehen der Lottozahlen „zufällig“ erscheint, liegt also nur daran, dass wir nicht alle Bedingungen am Anfang genau genug kennen oder kontrollieren können. Im Rahmen der klassischen Physik gibt es für jede Wirkung eine Ursache – und wir können im Prinzip den Weg der Lottokugeln präzise vorhersagen, wenn wir nur den **exakten** Ort und die **exakte** Geschwindigkeit aller beteiligten Objekte kennen. Wichtig ist hier aber das Wort exakt – denn

6 - vgl. 100SekundenPhysik (2021)

7 - vgl. Bricmot (2018)

* - vgl. Löwen (2002)

1. Was ist klassische Physik?

in der Praxis kennen wir diese Werte i. d. R. nicht genau genug. Und wenn man den Ausgang eines Versuches (wie das Ziehen der Lottozahlen) wegen der unbekannten Startbedingungen nicht genau vorhersagen kann, muss man mit Wahrscheinlichkeiten arbeiten. Genau das passiert beim Lottospielen.

ZUSATZINFO

Vorhersagbarkeit

Der Begriff Vorhersagbarkeit bezieht sich im Gegensatz zum Determinismus auf unsere Fähigkeit, die Gesetze, die die Zukunft bestimmen, herauszufinden und anzuwenden. Die Vorhersagbarkeit ist also auch von den menschlichen Fähigkeiten abhängig: der Fähigkeit, präzise Messungen (Anfangsbedingungen) zu machen und der Fähigkeit, komplizierte Rechnungen durchzuführen.

Bei der Lotto-Ziehung hat sich gezeigt, dass wir im Prinzip berechnen können, welche Zahlen gezogen werden (**Determinismus**). Voraussetzung ist nur, die Anfangsbedingungen genau genug zu kennen, was aber bei diesem Beispiel und vielen anderen Phänomenen in der Praxis nicht möglich ist (**Vorhersagbarkeit**).

ZUSATZINFO

Wahrscheinlichkeit

Man kann sich wundern, warum das Lottospielen als zufälliges Experiment und damit als „Glücksspiel“ gilt, wenn die Physik die Ziehung der Zahlen doch eigentlich exakt vorhersagen könnte. Warum geben wir beim Lottospielen also Wahrscheinlichkeiten an?

Die Antwort auf diese Frage ergibt sich aus den erwähnten Grenzen unserer Möglichkeiten: Wahrscheinlichkeiten geben wir aufgrund unserer Unkenntnis an, entweder weil wir die Anfangsbedingungen des Systems nicht genau genug kennen oder weil wir sie zwar kennen, aber die Berechnung der Zukunft zu komplex ist.⁸

Beim Lottospielen kennen wir als Spieler zuhause natürlich weder die Größe der Kugeln, und erst recht nicht die Drehgeschwindigkeit der Trommel, die Art, wie die Kugeln zu Beginn in der Trommel liegen, etc. Darum ist für uns das Ergebnis nicht vorhersagbar, und wir können nur Wahrscheinlichkeiten angeben.

1. Was ist klassische Physik?

1.3 Messung und Messwerte

Bei einer Messung in der klassischen Physik bestimmt man die Werte von Eigenschaften möglichst exakt. Dafür ist in der Regel ein Messgerät nötig (Geräte, unsere Sinnesorgane, etc.). **Bei der Messung stellt man aber eine vorher festliegende Eigenschaft nur fest.** Die Messung selbst erzeugt die Eigenschaft nicht, sondern liefert nur einen Wert dafür. Kanonenkugeln kommen bei gleicher Abschußtechnik z. B. immer mit einer bestimmten Geschwindigkeit auf dem Boden auf – ob wir sie messen, oder nicht. In der klassischen Physik sagt man darum, die Messung sei „**passiv**“ – sie legt den Messwert nicht selbst fest, sie gibt nur einen vorher schon feststehenden Wert an.

TAKE-HOME-MESSAGE

Was ist klassische Physik?

- Die Teilgebiete der Physik, die bis zum Ende des 19. Jahrhunderts entstanden, zählen zur **klassischen Physik**. Vor allem zählt die Newton'sche Mechanik dazu.
- Die klassische Physik ist **deterministisch**: Durch die Startbedingungen eines Experimentes ist dessen Ausgang vorausbestimmt.
- Die **(passive) Messung** einer Größe in der klassischen Physik bedeutet einfach die Zurkenntnisnahme ihres vorher bereits feststehenden Wertes.

Kapitel 2

Paradigmenwechsel und neue Begriffe in der Quantenphysik

2. Paradigmenwechsel und neue Begriffe in der Quantenphysik

2.1 Nicht-Determinismus in der Quantenphysik und Rolle des Messprozesses

Wir haben gesehen, dass die klassische Physik im Grundsatz deterministisch ist: Wenn wir alle nötigen Maßzahlen zu Anfang eines Experimentes genau genug kennen (würden), könn(t)en wir den Ausgang des Versuches exakt und mit Sicherheit vorausberechnen.

Die physikalischen Gesetze, die nach diesem Grundprinzip arbeiten, verlieren in der Welt der kleinsten Objekte (Atome, Elektronen und Co.), s. g. „**Quantenobjekte**“, aber ihre Gültigkeit. Um diese Objekte, die außerhalb unserer Erfahrungswelt sind, zu beschreiben, benötigt man physikalische Gesetze, die sich ganz grundsätzlich von den klassischen Gesetzen der Physik unterscheiden.

Und tatsächlich sind die Gesetze der **Quantenphysik** im Grundsatz ganz anders als die Gesetze der klassischen Physik:

- **Nicht-Determinismus**

In der Quantenphysik sind die Ausgänge eines Versuches zufällig. In der Welt der Quantenobjekte kann man bei einem Experiment i. d. R. nicht vorhersagen, welches Ergebnis eintreten wird. Hier spielt der Zufall also eine grundlegende Rolle.

- **Rolle des Messprozesses**

Das Ergebnis eines Versuches wird erst dann festgelegt, wenn ein Messprozess durchgeführt wird – d. h. insbesondere auch, wenn man das Versuchsobjekt beobachtet. In dem Zeitraum davor hat ein Quantenobjekt eine bestimmte Eigenschaft schlicht nicht. Welches Messergebnis man schlussendlich erhält, ist vom Zufall bestimmt und nicht vorhersagbar (Nicht-Determinismus).



2.2 Schrödingers Katze

Schrödingers Katze ist kein echtes (durchgeführtes) Experiment, sondern ein **Gedankenexperiment**. Einer der Urväter der Quantenphysik, Erwin Schrödinger, formulierte es 1935 um zu demonstrieren, wie sich die Gesetze der Quantenphysik in unserer Alltagswelt bemerkbar machen würden, wenn man sie 1 zu 1 übertragen könnte. Tatsächlich gelten die Gesetze der Quantenphysik aber für die aller kleinsten Objekte, aus denen unsere Welt aufgebaut ist: für Atome, Moleküle und deren Bestandteile.

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



2. Paradigmenwechsel und neue Begriffe in der Quantenphysik

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

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

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

Das Beispiel mit der Katze soll nur das gänzlich Neue der Quantenphysik dramatisieren: Die Quantenphysik sagt vorher, dass der Zustand eines Objekts aus Überlagerungen/Superpositionen bestehen kann, die mit zwei verschiedenen physikalischen Situationen korrespondieren. Derartige Superpositionen werden im Alltag nicht beobachtet und sind darum auch schwer zu begreifen.

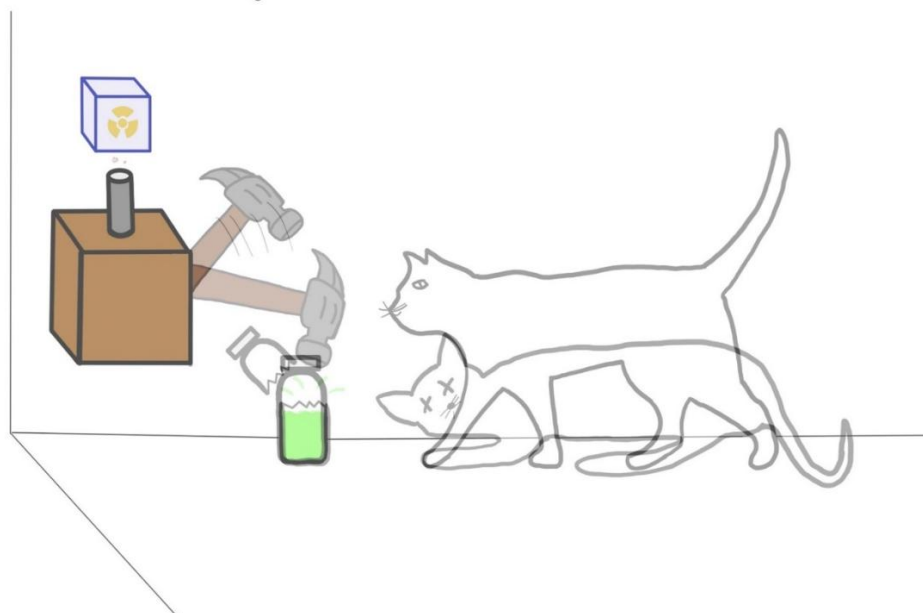


Abb. 3: Schrödingers Katze.

2. Paradigmenwechsel und neue Begriffe in der Quantenphysik

TAKE-HOME-MESSAGE

Paradigmenwechsel und neue Begriffe in der Quantenphysik

- In der Welt der Quantenobjekte (z. B. Atome oder Elektronen) gelten die Gesetze der **Quantenphysik**, die sich fundamental von denen der klassischen Physik unterscheiden.
- Die Quantenphysik ist **nicht-deterministisch**: Der Ausgang eines Versuches lässt sich i. d. R. nicht mit Sicherheit vorhersagen, auch wenn man alle Anfangsbedingungen kennt, die man kennen kann.
- Das Ergebnis eines Versuches wird erst dann festgelegt, wenn **ein Messprozess** durchgeführt wird – z. B. wenn man das Versuchsobjekt beobachtet.
- **Schrödingers Katze** ist ein Gedankenexperiment. Es zeigt, wie unsere Alltagswelt wäre, wenn auch sie nicht-deterministisch wäre und Superpositionszustände hier existieren würden.

Kapitel 3

Grundbegriffe der klassischen Physik und der Quantenphysik

3. Grundbegriffe der klassischen Physik und der Quantenphysik

Möchte man die Quantenphysik weitestgehend ohne Mathematik beschreiben, sind Fachbegriffe dabei besonders wichtig –um die Quantenphysik von der klassischen Physik auch in der Sprache abzugrenzen. Darum sollen die folgenden drei Begriffe nun ausführlich erklärt werden, weil sie später noch wichtig sind.

3.1 Definitionen und Erklärungen

Zustand

Als Zustand bezeichnen wir die Gesamtheit aller physikalischen Größen, welche die Eigenschaften bzw. das Verhalten eines physikalischen Systems eindeutig und vollständig beschreiben⁹.

Beispiele aus der klassischen Physik:

System	Zustand u. a. beschrieben durch
Stein, der auf der Erde zu Boden fällt	• Ort des Schwerpunktes • Geschwindigkeit des Schwerpunktes • Form • Drehgeschwindigkeit um die eigene Achse (Oberfläche) • Neigung der Drehachse
Luft in einem Luftballon	• Zusammensetzung der Luft • Volumen • Temperatur • (Druck kann berechnet werden)

Präparation

Mit dem Begriff "Präparation" bezeichnen wir das Herstellen oder Versetzen physikalischer Objekte in bestimmte Anfangsbedingungen¹⁰.

Beispiel: Experiment mit Licht¹¹

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

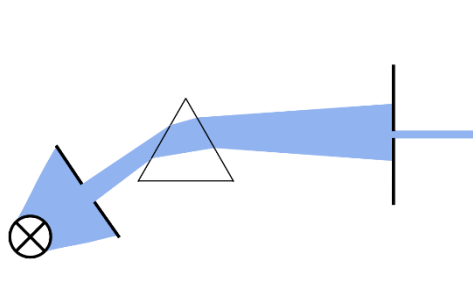


Abb. 4: Versuchsaufbau I.^{A2}

9 - vgl. Brockhaus Enzyklopädie Online (o. J.)

10 - Müller (o. J., Abschnitt 2.6)

11 - vgl. Müller (2003)

A2 - Abbildung von Müller, Wiesner & Schorn (o. J., S. 16)

3. Grundbegriffe der klassischen Physik und der Quantenphysik

Eigenschaft

Eine physikalische Eigenschaft ist ein messbares Merkmal eines physikalischen Systems.

Ob ein physikalisches System eine bestimmte **Eigenschaft** besitzt oder nicht, kann man mithilfe des folgenden Ablaufes überprüfen¹²:

1. Zunächst versucht man, an einem physikalischen Objekt (z. B. Licht) eine bestimmte Eigenschaft (z. B. Farbe) herzustellen.
2. Um sicherzustellen, dass es die gewünschte Eigenschaft tatsächlich besitzt, führt man ein zweites (evtl. gleichartiges) Experiment durch, das diese Eigenschaft überprüft. Besitzt das Objekt die Eigenschaft, zeigt es sie in diesem Test.

Um zu prüfen, ob das eben im Experiment erzeugte Licht tatsächlich die Eigenschaft „grün“ besitzt, muss man also eigentlich noch einen Test machen:

Wir lenken das vorher erzeugte grüne Lichtbündel durch ein zweites Prisma auf den Schirm und sehen, dass es im zweiten Prisma nicht mehr aufgefächert wird. Wie vermutet wird es um den gleichen Winkel wie im ersten Prisma abgelenkt. Damit hat das Licht tatsächlich die Eigenschaft, „grün“ zu sein und im Prisma unter einem bestimmten Winkel abgelenkt zu werden.

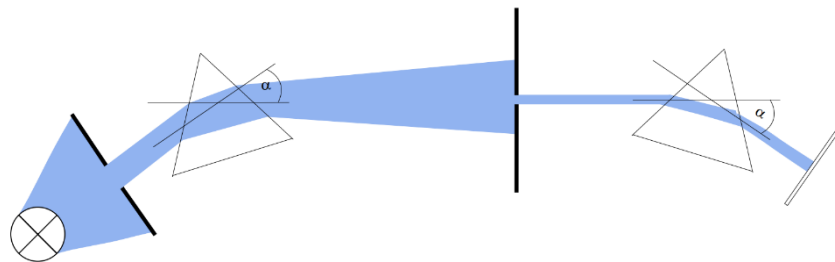


Abb. 5: Versuchsaufbau II.^{A3}

TAKE-HOME-MESSAGE

Grundbegriffe

- Der **Zustand** eines Systems ist die Gesamtheit aller physikalischen Größen, die man benötigt, um es vollständig zu beschreiben.
- Man kann in der klassischen Physik und in der Quantenphysik **Eigenschaften präparieren**, also bestimmte Anfangsbedingungen bzw. einen bestimmten Anfangszustand gezielt herstellen.

12 - vgl. Müller (2003)

A3 - Abbildung von Müller, Wiesner & Schorn (o. J., S. 17)

Kapitel 4

Qubits und Elektronenspin

4. Qubits und Elektronenspin

Was die Quantenphysik besonders macht und worin sie sich von der klassischen Physik bzw. unseren Alltagserfahrungen unterscheidet, kann man gut an sehr einfachen Beispielen demonstrieren und erklären. Aus physikalischer Sicht sind **Zweizustandssysteme** (auch als „Bit“ oder „Qubit“ bezeichnet) die simpelsten Systeme überhaupt.

4.1 Das Bit im Computer

Der Begriff „**Bit**“ ist wohl den meisten Benutzer:Innen von modernen Geräten bekannt und spielt bei Computern eine wichtige Rolle. Das Bit ist die Grundlage der Datenspeicherung - Informationen müssen in Computern gespeichert werden, damit sie Benutzer:Innen jederzeit zur Verfügung stehen.

„Bit“ ist die Kurzform von „binary digit“ – es handelt sich dabei um die kleinstmögliche elektronische Speichereinheit. Sie trägt den Informationsgehalt der Antwort auf eine Ja/Nein-Frage, die nur zwei verschiedenen Antwortmöglichkeiten zulässt. Meist sagt man, ein Bit speichert die Information „0“ oder „1“ – in jedem Fall kann ein Bit also **nur zwei verschiedene Zustände** annehmen.¹³

4.2 Zweizustandssystem

Möchte man ein Bit in der Realität umsetzen, so benötigt man ein System, bei dem man exakt zwei Zustände unterscheiden kann. Das kann z. B. ein Lichtschalter mit zwei möglichen Schalterstellungen sein (Schalter auf „Ein“ (1) oder Schalter auf „Aus“ (0)), oder ein Ball in einem Schrank, der entweder oben (1) oder unten (0) im Schrank liegen kann. Computer nutzen häufig Bits in Form von elektrischer Ladung, etwa in einem Kondensator oder einem Transistor.

Ein Bit ist also immer ein s. g. **Zweizustandssystem**:

Ein Zweizustandssystem ist ein physikalisches System, bei dem nur eine charakteristische Eigenschaft betrachtet wird. Weitere Eigenschaften werden vernachlässigt bzw. als unveränderlich angenommen. Die eine betrachtete Eigenschaft kann in einem Zweizustandssystem nur zwei mögliche Messwerte annehmen.¹⁴

Bei einem Ball im Schrank wird zum Beispiel dessen Größe, Masse oder Geschwindigkeit vernachlässigt – wichtig ist nur, ob er oben oder unten liegt (= zwei mögliche Werte)¹⁵.

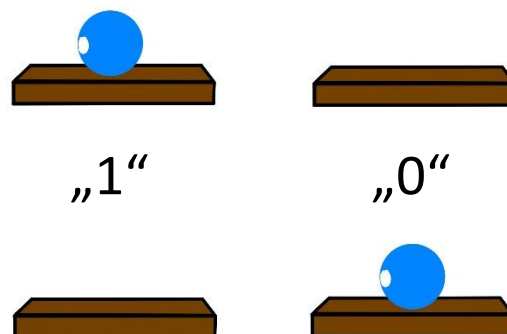


Abb. 6: Zweizustandssystem: Ball im Wandregal.^{A4}

13 - vgl. Schnabel (o. J.)

14 - vgl. Dür & Heusler (2016)

15 - vgl. Dür & Heusler (2012)

A4 - vgl. Dür & Heusler (2012)

4. Qubits und Elektronenspin

4.3 Quantenphysikalische Zweizustandssysteme – das Qubit

Schauen wir uns nun ein System an, das nur mithilfe der Quantenphysik exakt beschrieben werden kann, zum Beispiel ein Elektron.

Wir werden noch sehen, dass auch einzelne Elektronen Eigenschaften besitzen, die nur zwei unterschiedliche Werte annehmen können. **Auch bei quantenphysikalischen Zweizustandssystemen handelt es sich also um physikalische Systeme, bei denen eine charakteristische Eigenschaft wieder nur zwei mögliche Werte annehmen kann – und nichts dazwischen.** Alle anderen Eigenschaften werden als unveränderlich angesehen oder vernachlässigt. Zweizustandssysteme aus Objekten, die man mit Hilfe der Quantenphysik beschreibt, nennt man „**Qubits**“ – die Abkürzung von „Quanten Bits“. Dabei ist ein Qubit ein abstrakter Begriff – ganz verschiedene physikalische Systeme können Qubits sein.

Man unterscheidet klassische Bits und Qubits, weil Qubits ganz besondere Eigenschaften haben. Was Qubits so besonders macht und warum sie sich ganz anders als klassische Bits (wie sie in jedem Smartphone vorkommen) verhalten, wird im nächsten Kapitel erklärt.

4.4 Magnetische Eigenschaften eines Elektrons als Qubit

Experiment: Stern-Gerlach-Versuch

In einer Quelle werden **Silberatome** erzeugt, die sich gerichtet auf die Pole eines **Magneten** zubewegen. Das Magnetfeld ist durch besonderen Aufbau des Magneten beim Nordpol stärker als beim Südpol.

Ein Silberatom besitzt genau ein **Außenelektron**, welches das Verhalten des Atoms im Magnetfeld maßgeblich bestimmt.

Die Atome laufen durch das **Magnetfeld** und treffen auf einen Schirm.

Dort sieht man, dass sich der Strahl aus Atomen durch das Magnetfeld in **zwei getrennte Teilstrahlen** aufteilt.

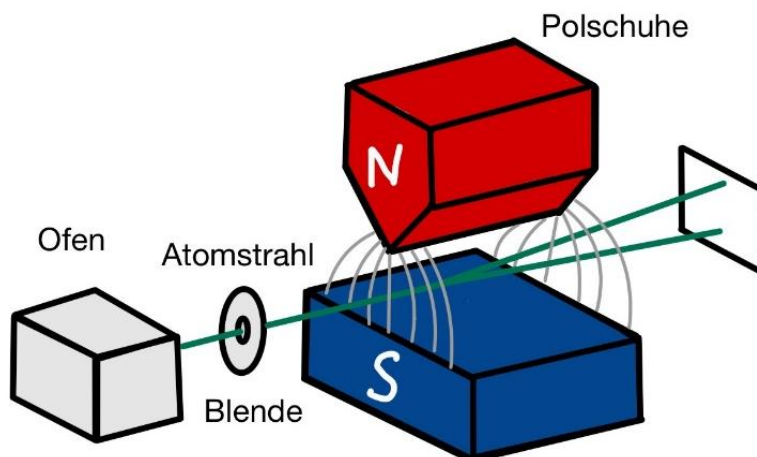


Abb. 7: Originaler Stern-Gerlach-Versuch. Im Folgenden wird vereinfacht nur noch das Außenelektron der Silberatome im Experiment dargestellt.

4. Qubits und Elektronenspin

Die **Erklärung** dafür liegt in der Natur des **Elektrons**:

Elektronen haben nicht nur eine elektrische Ladung, sondern auch **magnetische Eigenschaften**. In diesem Zusammenhang verhält sich jedes Elektron wie ein winziger **Stabmagnet**, der ein ebenso winziges Magnetfeld um sich herum erzeugt. Die Richtung, in die der Südpol dieses „Mini-Stabmagnet“ zeigt, nennen wir ab jetzt **(Elektronen-)spin**. Ein Spin ist damit vergleichbar mit einem **Pfeil, der in Richtung des Südpols** des gedachten Stabmagneten zeigt.

Klassisch würde man erwarten, dass sich der Spin auch in einem Magnetfeld in jede beliebige Richtung ausrichten kann. Je nachdem, wie der Spin zum äußeren Magnetfeld gedreht ist, würde das Elektron stärker oder schwächer in eine Richtung gezogen werden. Die Folge: Der Strahl aus Silberatomen fächert sich durch die Ausrichtung des Elektronenspins im Magnetfeld auf und auf dem Schirm sollte eine durchgehende Linie entstehen.

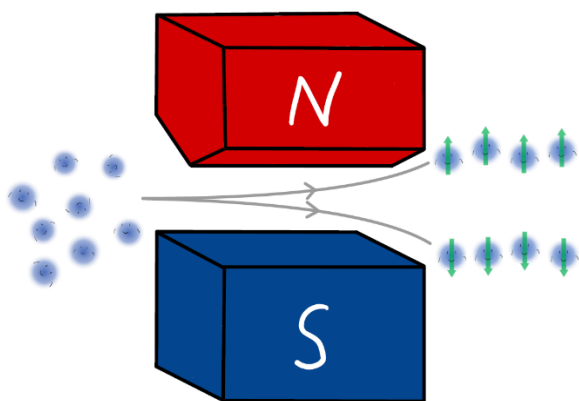


Abb. 8: Stern-Gerlach-Versuch:
Beobachtetes Ergebnis.

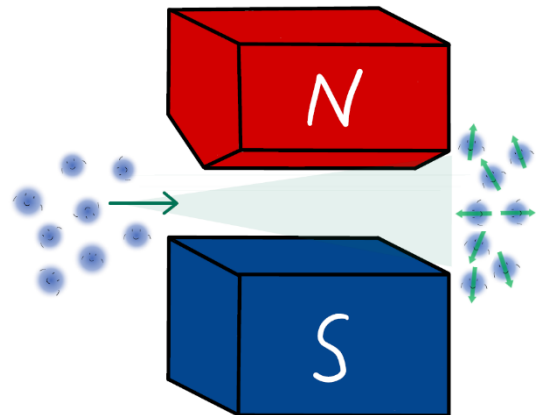


Abb. 9: Stern-Gerlach-Versuch:
Klassisch erwartetes Ergebnis.

Stattdessen sieht man auf dem Schirm aber zwei scharf getrennte Flecken. Das liegt an den Gesetzen der Quantenphysik: Der Elektronenspin (des Außenelektrons) kann sich in einem äußeren Magnetfeld nur in zwei Richtungen ausrichten: in Richtung des Magnetfeldes (parallel) oder entgegengesetzt zum Magnetfeld (antiparallel). Anders als in der klassischen Physik gibt es kein „dazwischen“, sondern nur diese beiden Möglichkeiten.

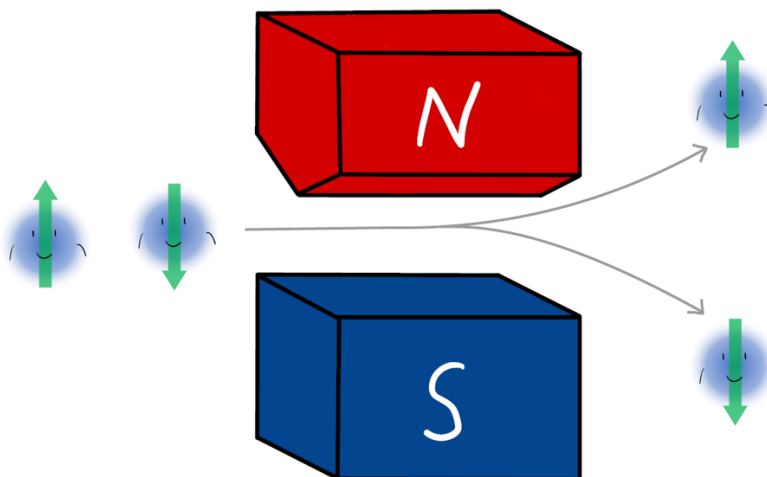


Abb. 10: Stern-Gerlach-Versuch: Ablenkrichtung auf Elektron abhängig vom Spin.

4. Qubits und Elektronenspin

→ Fazit: Elektron als Mini-Stabmagnet

Elektronen besitzen einen s. g. Spin und verhalten sich damit wie ein winziger Stabmagnet. In einem äußeren Magnetfeld kann sich dieser Spin nur in Richtung des Magnetfeldes oder entgegengesetzt dazu ausrichten.

Ein **Elektron** in einem Magnetfeld ist bezüglich seines **Spins** damit ein perfektes **Zweizustandssystem**: der Spin kann sich nur in zwei entgegengesetzte Richtungen ausrichten. Weil Elektronen den Gesetzen der Quantenphysik unterliegen, handelt es sich hier also um ein **Qubit**.

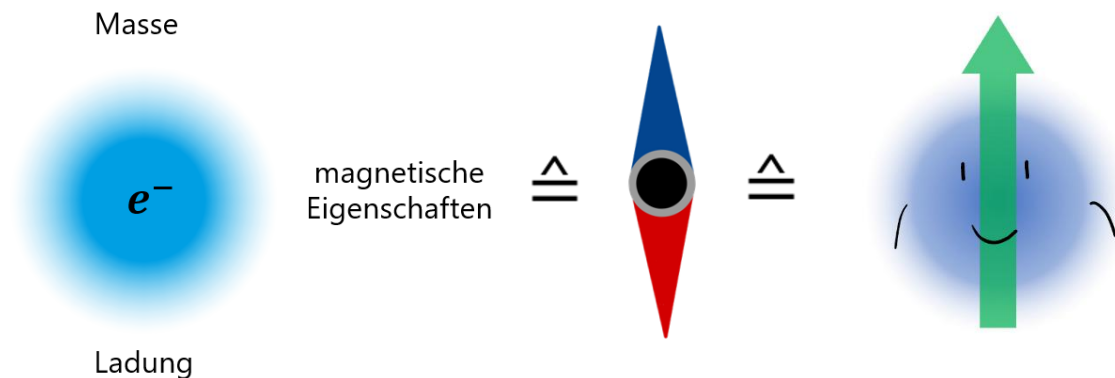


Abb. 11: Spin des Elektrons als gerichtete magnetische Eigenschaft.

TAKE-HOME-MESSAGE

Elektronenspin als Qubit

- **Elektronen besitzen magnetische Eigenschaften.** In diesem Zusammenhang kann man sich ein Elektron wie einen winzigen Stabmagneten vorstellen. Seine Richtung (genauer: die Ausrichtung des Südpols) wird als „**Spin**“ bezeichnet. Der Spin von Elektronen beeinflusst die magnetischen Eigenschaften von Materialien erheblich.
- Befindet sich ein Elektron in einem Magnetfeld, dann kann sich der Spin nur in zwei entgegengesetzte Richtungen bzgl. des Magnetfeldes ausrichten: **parallel oder antiparallel**. Eine Ausrichtung dazwischen ist nicht möglich – eine Besonderheit der Quantenphysik.
- Bzgl. des Spins besitzt ein Elektron damit nur **zwei unterschiedliche Zustände**: der Spin kann parallel oder antiparallel zum Magnetfeld ausgerichtet sein.
- Der Elektronenspin ist damit ein Beispiel für ein s. g. **Zweizustandssystem** – ein physikalisches System, bei dem ausschließlich zwei unterschiedliche Messwerte möglich sind.

Kapitel 5

Wesenszüge der Quantenphysik

—

Was macht Quantenphysik aus?

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

Wir haben bereits gesehen, dass die Quantenphysik im Grundsatz ganz anders funktioniert als die klassische Physik. Sie ist nicht-deterministisch und Messprozesse „erzeugen“ die Messwerte erst und bestimmen sie nicht nur.

Um detaillierter Herauszuarbeiten, was die Quantenphysik ausmacht, werden im Folgenden vier „Wesenszüge“ der Quantenphysik vorgestellt.*

5.1 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: $C = A + B$.

Überlagerung in der klassischen Mechanik

Das s. g. „Überlagerungsprinzip“ gibt es bereits in der klassischen Physik und wir kennen es aus unserem Alltag. Es besagt allgemein, dass sich gleiche physikalische Größen überlagern können, ohne sich gegenseitig zu behindern.

Das lässt sich am Beispiel einer Flussüberquerung gut verstehen.

Wir stellen uns vor, dass wir auf einer Seite eines strömenden Flusses stehen und mithilfe eines Bootes auf die gegenüberliegende Seite gelangen möchten. Starten wir nun das Boot und versuchen, direkt und auf dem kürzesten Weg von einer zur anderen Seite zu gelangen (d. h., das Ruder des Bootes zeigt in Richtung des Hecks). Dabei stellen wir fest, dass wir seitlich in Strömungsrichtung abgetrieben werden – wir kommen also trotz gerader Ruderstellung durch die Strömung nicht genau gegenüber an, sondern seitlich versetzt.

Die Ursache hierfür liegt im physikalischen Überlagerungsprinzip. Die Bewegung von einer Flussseite zur anderen überlagert sich ungehindert mit der Strömungsbewegung des Flusses, die das Boot abtreiben lässt.

Als Ergebnis erhält man eine schräge Bewegung – darum muss der Kapitän bei einer Flussüberquerung i. d. R. gegensteuern.

Allgemein gilt: Ein Gegenstand kann mehrere Bewegungen gleichzeitig ausführen, ohne dass diese sich gegenseitig behindern. Eine Bewegung lässt sich in verschiedene Teilbewegungen zerlegen.

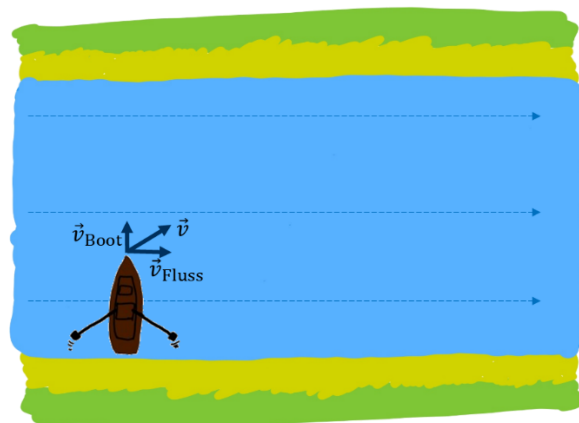


Abb. 12: Überlagerung in der klassischen Mechanik: Boot auf Fluss.

* - in Anlehnung an die „Wesenszüge der Quantenphysik“ nach Müller (2003)

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

Superpositionsprinzip in der Quantenphysik

Mathematisch gilt das Überlagerungsprinzip der klassischen Physik auch in der Quantenphysik. Hier werden allerdings die mathematischen Objekte, die man überlagert, viel abstrakter. Denn in der Quantenphysik gilt es für die **Zustände** eines Quantenobjektes und wir bezeichnen die Überlagerung als „**Superposition**“.

Beispiel: Der Spin eines Elektrons

Wir wissen bereits, dass Elektronen einen s. g. Spin besitzen und sich darum wie winzige Stabmagneten verhalten. In einem äußeren Magnetfeld kann der Spin nur in zwei entgegengesetzte Richtungen zeigen: parallel und antiparallel zum Feld (darum war das Elektronen mit seinem Spin ein Qubit).

- Wir definieren jetzt Folgendes:
Zeigt der Spin des Elektrons parallel zum äußeren Magnetfeld, sagen wir, das Elektron ist im **Zustand A**.
- Zeigt der Spin des Elektrons antiparallel zum äußeren Magnetfeld, sagen wir, das Elektron ist im **Zustand B**.

Nach den Gesetzen der Quantenphysik kann sich das Elektron dann auch im Zustand **C = A + B** befinden. Das heißt, der Spin des Elektrons ist gewissermaßen gleichzeitig **parallel und antiparallel** zum Magnetfeld ausgerichtet (genau genommen zeigt der Spin ohne Messprozess in gar keine Richtung, weil er diese Eigenschaft gar nicht besitzt).

Die Zustände A und B kann man mathematisch z. B. mithilfe von Funktionen beschreiben. Das „+“ ist dann die übliche Addition zweier Funktionen zu einer dritten Funktion.

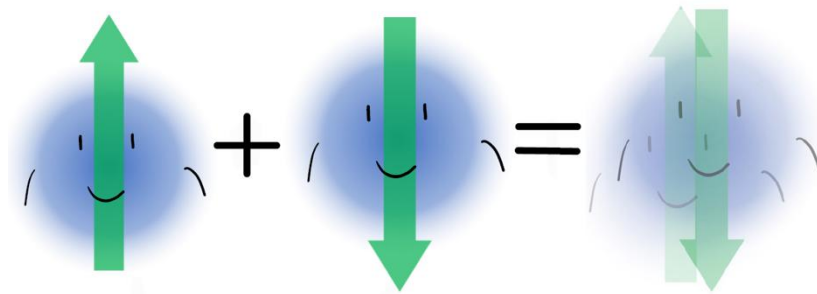


Abb. 13: Superposition beim Elektronenspin.

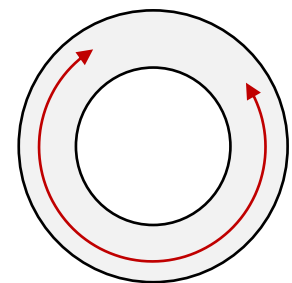


Abb. 14: Superposition im Supraleiter.

Das Superpositionsprinzip der Quantenphysik lässt sich mit unseren Alltagserfahrungen nicht verstehen oder vorstellen. Das zeigt sich am schon bekannten Beispiel von Schrödingers Katze: auch für Schrödingers Katze sind die beiden sich ausschließenden Zustände „Katze ist lebendig“ (Zustand A) und „Katze ist tot“ (Zustand B) möglich. Und ohne Beobachtung befindet sich die Katze in der Superposition dieser Zustände $C = A + B$. Die Katze ist in einer Superposition aus tot und lebendig.

Es gibt viele Experimente, die das Superpositionsprinzip **bestätigen**. Zum Beispiel wurde kürzlich ein ringförmiger Supraleiter gebaut, in dem ein und derselbe elektrische Strom in einer Superposition von links- und rechtsherumlaufend ist (aber nicht null).¹⁶

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

BEZEICHNUNGEN

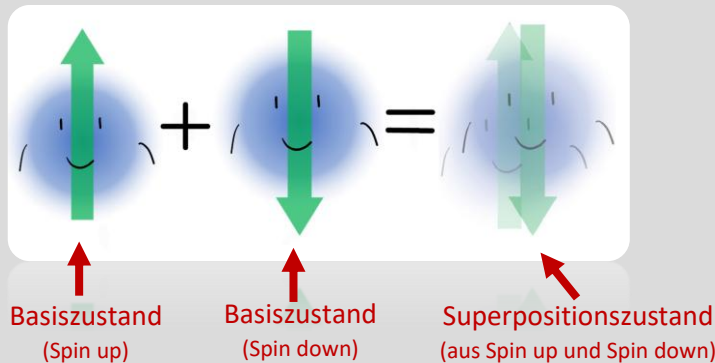
Superpositionszustand und Basiszustand

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

Superpositionszustand = Basiszustand 1 + Basiszustand 2 + ...

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

Beispiel Elektronenspin:



ZUSATZINFO

Superposition in der Mathematik

Das Superpositionsprinzip kommt ursprünglich aus der Mathematik. Hier beschreibt es das Prinzip, dass die Summe zweier gleicher mathematischer Objekte wieder zur selben Objektklasse gehört.

Beispielweise kann man zwei lineare Funktionen $g(x) = x + 1$ und $h(x) = 2x - 4$ addieren.

Das Ergebnis $f(x) = g(x) + h(x) = x + 1 + 2x - 4 = 3x - 3$ ist wieder eine lineare Funktion.

5.2 Messprozess⁵

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.^{17, 18}

Wir wissen bereits, dass Messungen in der klassischen Physik einen passiven Charakter haben: durch Messungen erhält man die Werte, die eine bestimmte Eigenschaft eines Objektes schon vor der Messung besaß.

Im Gegensatz zur „**Messung**“ der klassischen Physik spricht man in der Quantenphysik vom „**Messprozess**“. Beim Messprozess handelt es sich um einen aktiven Vorgang – Messwerte werden erst durch den Messprozess und unmittelbar im Moment des Messprozesses festgelegt.

17 - vgl. LEIFiPhysik (o. J.b)

18 - vgl. Kuhn et al. (2000)

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

Die Ursache für diesen aktiven Charakter des Messprozesses liegt im schon beschriebenen Superpositionsprinzip. Oft befinden sich Quantenobjekte in der Superposition von verschiedenen Zuständen. Messergebnisse sind, wie wir wissen, aber immer **eindeutig** (eine Messung oder ein Messprozess ordnet einem System immer einen klaren Zahlenwert zu). In dem Moment, wo ein Messprozess an diesem Quantenobjekt bezüglich dieser Zustände erfolgt, wird das Objekt also „gezwungen“, sich für einen der Zustände aus der Superposition zu „entscheiden“. Danach befindet sich das Quantenobjekt nicht mehr in einem Superpositionszustand.¹⁹ Das nennt man auch „**Auflösen der Superposition**“.

Beispiel des Messprozesses beim Elektronenspin

Wir betrachten wieder das einzelne Elektron im äußeren Magnetfeld. Es wurde so präpariert, dass es sich im Superpositionszustand aus „Spin ist parallel zum äußeren Magnetfeld“ und „Spin ist antiparallel zum äußeren Magnetfeld“ befindet.

Wird nun der Spins gemessen, z. B. mit der bekannten Stern-Gerlach-Maschine, dann **entscheidet sich das Elektron im Moment des Messprozesses** für einen der beiden Zustände aus der Superposition. Das heißt, wir messen entweder den Spin parallel zum äußeren Magnetfeld oder antiparallel zum äußeren Magnetfeld. Das Ergebnis ist aber ganz eindeutig und die Richtung des Spins danach festgelegt.

Messprozesse erzeugen also das, was bei einem System gemessen wird. Beispielsweise wird bei einem Messprozess der Spinrichtung das Elektron zu einer Entscheidung gezwungen. Wir zwingen es, seinen Spin in eine bestimmte Richtung festzulegen. Vorher hat er weder in die eine, noch in die andere Richtung gezeigt.

Das heißt, dass man aus dem eindeutigen Messergebnis auf keinen Fall schließen kann, dass das Quantenobjekt die gemessene **Eigenschaft** auch schon vorher besessen hat. Erst durch den (aktiven) Messprozess hat das Objekt die Eigenschaft überhaupt erst angenommen.²⁰

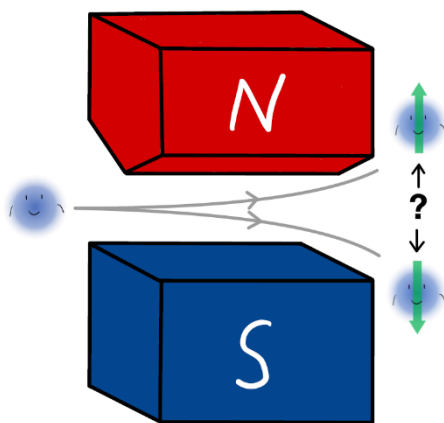


Abb. 15: Das Ergebnis eines Messprozesses ist i. A. zufällig.

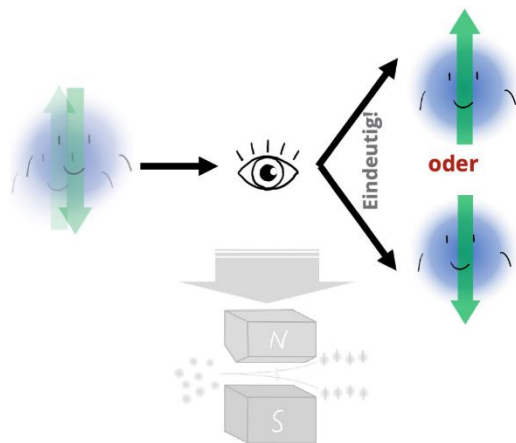


Abb. 16: Messergebnisse sind i. A. zufällig, aber stets eindeutig.

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

5.3 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.²¹

Wir wissen bereits, dass die klassische Mechanik und damit die Physik unserer Alltagswelt deterministisch ist. Wenn wir zum Beispiel einen Pfeil mit der richtigen Geschwindigkeit und dem richtigen Winkel abschießen, können wir sicher sein, dass der Pfeil ins Ziel trifft. Schießen wir einen zweiten Pfeil mit denselben Anfangsbedingungen ab, so legt dieser Pfeil dieselbe Bahn wie der erste zurück und trifft ebenfalls ins Ziel.²²

In der Quantenphysik ist das nicht so: Wir haben gesehen, dass sich i. A. in Superpositionszuständen befinden. Führen wir einen Messprozess an einem Quantenobjekt durch, dann ist das Messergebnis aber eindeutig und das Quantenobjekt wird in einen der möglichen Zustände gezwungen („**Auflösen der Superposition**“).

Der **statistische Charakter** fasst zwei Prinzipien des quantenphysikalischen Messprozesses zusammen:

- **Einzel-Prinzip**

Wir können das Messergebnis bei einem einzelnen Messprozess an einem Quantenobjekt nicht vorhersagen. Es entscheidet sich stets zufällig, welchen Zustand durch den Messprozess einnimmt. Wir können Quantenobjekte aber so präparieren, dass wir Wahrscheinlichkeiten für ein bestimmtes Messergebnis vorher angeben können. Führen wir dann einen Messprozess an dem Quantenobjekt durch, können wir vorhersagen, mit welcher Wahrscheinlichkeit wir welches der möglichen Messergebnisse erhalten – mit Sicherheit vorhersagen können wir es i. A. aber nicht.

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

- **Ensemble-Prinzip**

Auch wenn die Quantenphysik es uns durch das Einzel-Prinzip nicht erlaubt, einzelne Versuchsausgänge vorherzusagen, so führt die Möglichkeit, dass sich für die Versuchsausgänge trotzdem Wahrscheinlichkeiten angeben lassen, zu seinem wichtigen und spannenden Effekt.

Denn wir können Quantenobjekte sehr gut **statistisch** beschreiben: Auch wenn wir ein einzelnes Messergebnis nicht vorhersagen können, so können wir durch das Gesetz der großen Zahlen dennoch vorhersagen, wie die Messergebnisse von sehr vielen Messprozessen statistisch verteilt sein werden.

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

Die häufige Wiederholung eines Messprozesses an sehr vielen identisch präparierten Quantenobjekten („Ensemble“) ergibt eine, bis auf statistische Schwankungen, reproduzierbare Verteilung der Messergebnisse²³.

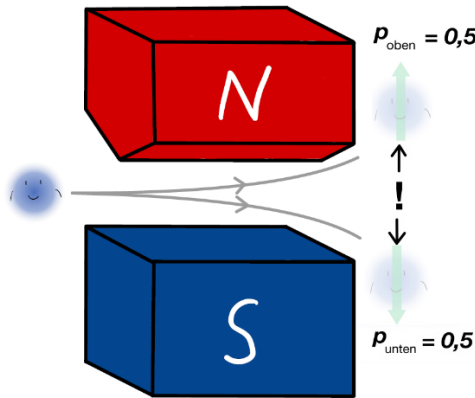


Abb. 17: Einzel-Prinzip

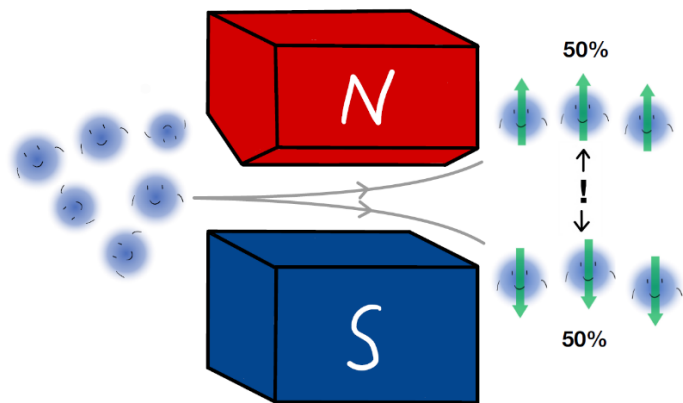


Abb. 18: Ensemble-Prinzip

INFO

Basiszustände von Quantenobjekten und Zufälligkeit von Messergebnissen

Das Einzel-Prinzip gilt nur für Quantenobjekte, die sich in einer Superposition befinden. Befindet sich ein Quantenobjekt in einem eindeutigen Zustand (ein s. g. „Basiszustand“), ist auch das Messergebnis nicht mehr zufällig. Es ist dann durch den Basiszustand vorbestimmt.

INFO

Zwei Messprozesse nacheinander

Werden zwei identische Messprozesse unmittelbar nacheinander am selben Quantenobjekt durchgeführt, so ist das zweite Messergebnis identisch mit dem ersten Messergebnis und damit sicher vorhersagbar.

Erster Messprozess

Vor einem Messprozess kann das Quantenobjekt in Superposition sein. In diesem Fall wird durch den ersten Messprozess diese Superposition aufgelöst, und man erhält ein eindeutiges Ergebnis. Das Quantenobjekt befindet sich danach in einem Basiszustand.

Befand sich das Quantenobjekt zu Beginn nicht in einem Superpositionszustand (sondern in einem Basiszustand), erhalten wir durch das eindeutige Ergebnis des ersten Messprozesses einfach eine Information darüber, in welchem Basiszustand sich das Quantenobjekt befindet. In diesem Fall ändert der Messprozess nichts, und das Ergebnis ist auch nicht zufällig.

Zweiter Messprozess

Egal ob das Quantenobjekt ganz zu Beginn in einem Superpositionszustand war oder nicht – nach dem ersten Messprozess ist der Zustand eindeutig und es liegt definitiv kein Superpositionszustand mehr vor. Der zweite Messprozess muss darum auf jeden Fall das gleiche Ergebnis liefern, wie der erste Messprozess, und das Messergebnis ist somit nicht mehr zufällig. Das gilt, solange beide Messprozesse absolut identisch sind und der Zustand des Quantenobjektes zwischendurch nicht verändert wurde.

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

INFO

Gesetz der großen Zahlen

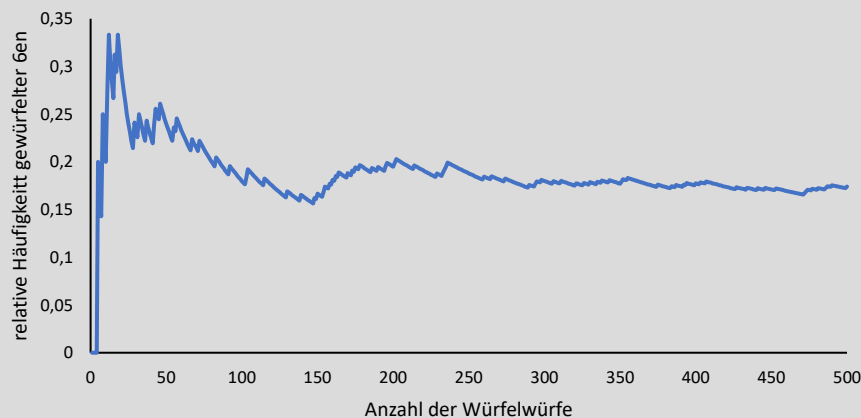
Für ein ideales Zufallsexperiment nähert sich die relative Häufigkeit eines Ereignisses seiner theoretischen Wahrscheinlichkeit immer weiter an, je häufiger man das Experiment unter gleichen Bedingungen durchführt.⁶

Beispiel:

Beim Wurf eines Würfels soll eine „6“ gewürfelt werden. Die Wahrscheinlichkeit für das Werfen einer 6 liegt bei $p = \frac{1}{6}$.

Wir können (im Alltag und aus Unkenntnis über die Anfangsbedingungen) nicht vorhersagen, ob bei einem einzelnen Wurf eine 6 gewürfelt wird.

Werfen wir den Würfel aber sehr oft, dann stellen wir fest, dass die relative Häufigkeit des Ereignisses „Es wurde eine 6 gewürfelt“ sich bei $\frac{1}{6}$ stabilisiert. Das heißt, das Ergebnis ist statistisch reproduzierbar.



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

5.4 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.²⁴

Eine große Besonderheit von Quantenobjekten ist die Tatsache, dass sie sich in Superpositionszuständen befinden können. Eine weitere neue und besondere Eigenschaft von Quantenobjekten ist nun außerdem, dass man sie „**verschränken**“ kann. Damit meint man, dass bestimmte Eigenschaften von zwei oder mehreren Quantenobjekten **nicht mehr unabhängig voneinander** sind, z. B. ihr Spin. Wenn man Superpositionszustände und Verschränkung miteinander kombiniert, dann erhält man ein auf den ersten Blick ziemlich paradoxes Phänomen, das Albert Einstein einmal als „**spukhafte Fernwirkung**“ bezeichnet hat.²⁵

Um das Prinzip besser zu verstehen, schauen wir uns im Folgenden den Begriff der **Korrelation** und das s. g. „**EPR-Experiment**“ an.

Korrelationen

Eine **Korrelation** ist ein Ausdruck, der angibt, dass zwischen zwei Größen ein Zusammenhang besteht. Beispielsweise besteht beim Tanken eine Korrelation zwischen Benzinmenge und zu zahlendem Preis (je mehr Benzin, umso mehr kostet es).

Wir unterscheiden zwei Arten von Korrelationen²⁶:

Handschuh-Korrelation	Münzen-Korrelation																
Stell dir vor, dass du im Winter früh das Haus verlässt und ausversehen nur einen Handschuh mitnimmst. 	Stell dir vor, dass du sehr oft zwei Münzen wirfst. Bei jedem Münzwurf zeigen beide jeweils zwei genau entgegengesetzte Seiten. 																
Wenn du unterwegs merkst, dass du nur den linken Handschuh eingepackt hast, weißt du, dass der rechte Handschuh daheim ist. linker Handschuh eingepackt ↔ rechter Handschuh zuhause rechter Handschuh eingepackt ↔ linker Handschuh zuhause → hier liegt eine Korrelation (links-rechts) vor → diese Korrelation erscheint uns ganz natürlich → schon vor dem Nachschauen steht fest, welcher Handschuh zuhause ist und welcher dabei	<table border="1"><thead><tr><th>Münze 1</th><th>Münze 2</th></tr></thead><tbody><tr><td>Zahl</td><td>Kopf</td></tr><tr><td>Kopf</td><td>Zahl</td></tr><tr><td>Kopf</td><td>Zahl</td></tr><tr><td>Kopf</td><td>Zahl</td></tr><tr><td>Zahl</td><td>Kopf</td></tr><tr><td>Kopf</td><td>Zahl</td></tr><tr><td>Zahl</td><td>Kopf</td></tr></tbody></table> → auch hier liegt eine Korrelation vor → diese Korrelation erscheint uns spukhaft → es steht vor dem Wurf grundsätzlich nicht fest, auf welche Seiten die Münzen fallen werden	Münze 1	Münze 2	Zahl	Kopf	Kopf	Zahl	Kopf	Zahl	Kopf	Zahl	Zahl	Kopf	Kopf	Zahl	Zahl	Kopf
Münze 1	Münze 2																
Zahl	Kopf																
Kopf	Zahl																
Kopf	Zahl																
Kopf	Zahl																
Zahl	Kopf																
Kopf	Zahl																
Zahl	Kopf																

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

Das EPR-Experiment

Neben Schrödingers Katze gibt es noch ein weiteres sehr bekanntes Gedankenexperiment in der Quantenphysik: das EPR-Experiment, das sich Albert Einstein 1935 zusammen mit zwei seiner Studenten überlegte²⁷.

Auf unser Vorwissen abgewandelt* und angepasst lautet das Gedankenexperiment wie folgt:

Ein Objekt (z. B. ein Cooper-Paar, siehe Infobox) **zerfällt** in **zwei** Elektronen, die in entgegengesetzte Richtungen auseinanderfliegen. Die Spins der Elektronen sind in diesem Fall **verschränkt**, d. h. sie sind voneinander abhängig und bilden ein großes **Gesamtsystem** (weil sie aus *einem* Objekt entstanden sind).²⁸

Ohne Messprozess sind die Spins der Elektronen nicht festgelegt – sie befinden sich wie üblich im Superpositionszustand.

Nun stellen wir uns vor, dass wir einen der Spins messen – beispielsweise indem das rechte Elektron durch eine Stern-Gerlach-Maschine fliegt. Die Wahrscheinlichkeit, dass wir den Spin parallel oder antiparallel zum Magnetfeld messen, beträgt jeweils 50% - das Messergebnis ist komplett zufällig.

Trotzdem wird durch diesen Messprozess **sofort und ohne Zeitverzögerung** der Spin des linken Elektrons festgelegt – völlig egal, wie weit die beiden Elektronen schon auseinandergefliegen sind. Denn durch die Verschränkung der Elektronen ist festgelegt, dass der Spin des linken Elektrons immer genau **entgegengesetzt** zum Spin des rechten Elektrons ist.

Und wenn der Spin des rechten Elektrons feststeht, muss auch sofort der Spin des linken Elektrons feststehen (selbst wenn sich die Elektronen an unterschiedlichen Enden der Milchstraße befinden würden).

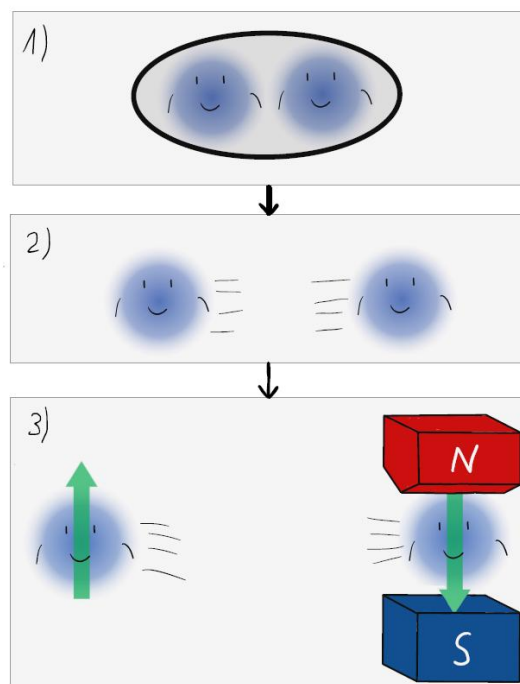


Abb. 19: EPR-Experiment (vereinfacht)

27, 28 - vgl. Apolin (2019)

* - für EPR-Experiment mit Elektronen siehe auch Hofstetter et al. (2009)

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

Albert Einstein empfand diese Tatsache (die heute als bewiesen gilt) als großes Problem. Denn laut seiner Relativitätstheorie kann sich keine Information schneller als mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten – das Messen des einen Spins legt aber sofort den anderen Spin fest – auch wenn das Licht quer durch die Milchstraße rund 100.000 Jahre bräuchte.

Darum vermutete Einstein, dass der Spin der Objekte schon vorher feststehen muss (*Handschuh-Korrelation*).

Mittlerweile ist aus dem Gedankenexperiment aber ein „echtes“ Experiment geworden und man konnte eindeutig belegen, dass die Spinrichtung tatsächlich erst durch das Messen festgelegt wird, und dass das verschränkte andere Quant trotzdem sofort den „richtigen“ Zustand annimmt (*Münzen-Korrelation*).

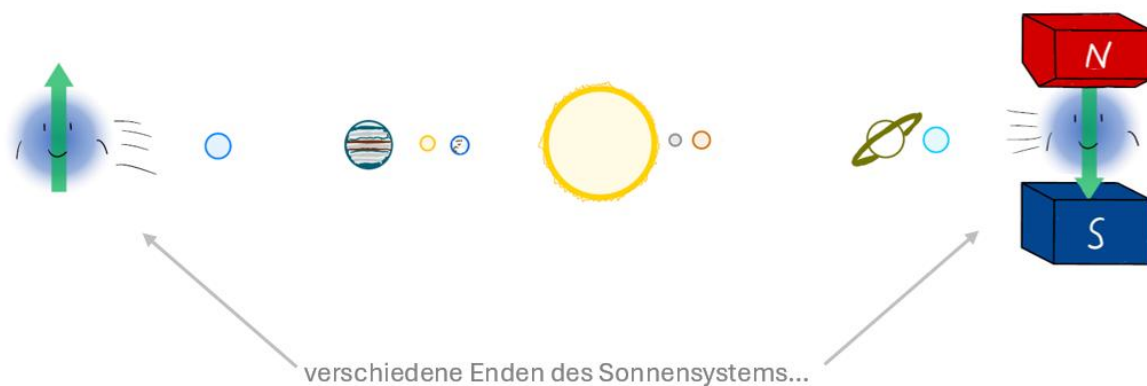


Abb. 20: Verschränkung.

Shut Up and Calculate²⁹

Das große Rätsel ist zu verstehen, woher das linke Elektron sofort von der Spinmessung des rechten Elektrons „weiß“. Mathematisch ist es gar kein Problem – aus der mathematischen Beschreibung der Quantenphysik wird die Verschränkung sofort ersichtlich, weil verschränkte Quantenobjekte mathematisch mithilfe eines einzigen Zustandes beschrieben werden. Nur anschaulich finden wir keine gute Erklärung dafür. Darum rät man jungen Nachwuchsphysiker:Innen in solchen unverständlichen Situationen auch *immer* „Shut up and calculate“.

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

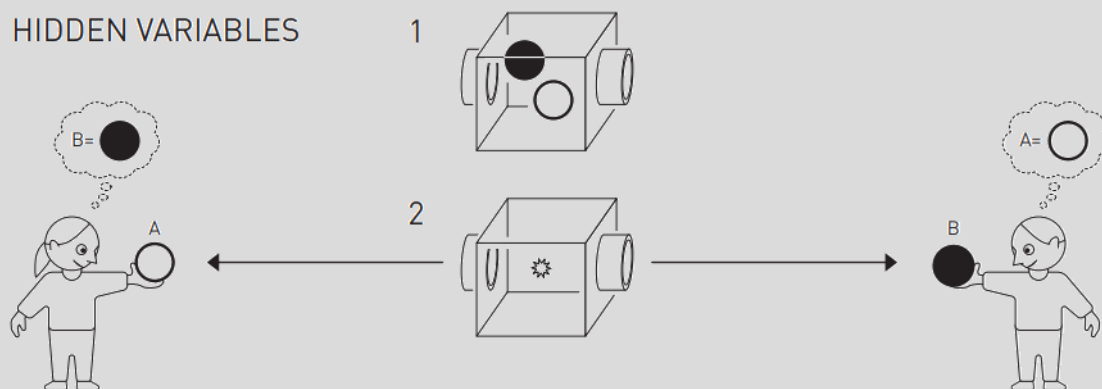
INFO

Verborgene Variablen

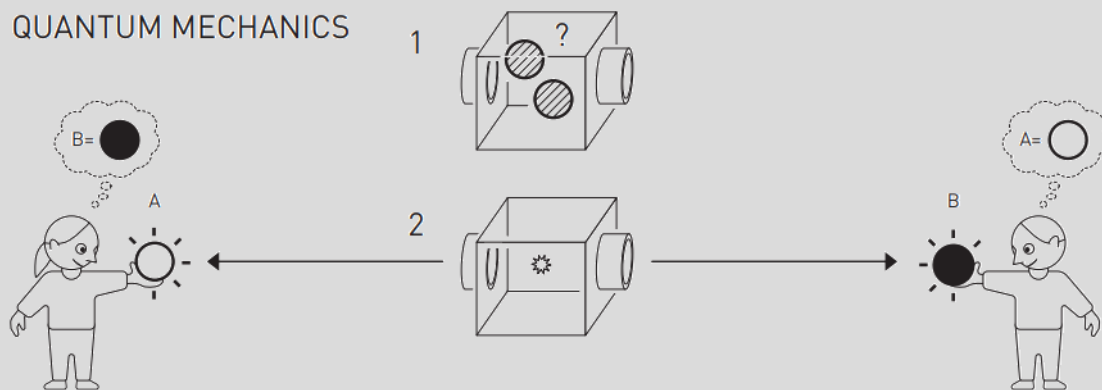
Albert Einstein ging davon aus, dass es keine „echte“ Verschränkung im quantenphysikalischen Sinn gibt. Stattdessen glaubte er, dass es s. g. „verborgene Variablen“ gäbe – also versteckte Anfangsbedingungen in der Quantenphysik. Demnach gäbe es auch in der Quantenphysik keinen echten Zufall, sondern es würde auch hier der Determinismus gelten.

Experimente zur Verschränkung (siehe Zusatzinfo zum Nobelpreis 2022) konnten aber mittlerweile nachweisen, dass Einstein falsch lag – Quantenphysik ist tatsächlich geprägt vom echten Zufall.

HIDDEN VARIABLES



QUANTUM MECHANICS



©Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

Abb. 21: Erklärung der Verschränkung - Verborgene Variablen (oben) vs. Quantenphysik (unten).^{A4}

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

ZUSATZINFO

Physik-Nobelpreis 2022 für Experimente zur Verschränkung

„für Experimente mit verschränkten Photonen, den Nachweis der Verletzung der Bell'schen Ungleichungen und wegweisende Quanteninformationswissenschaft“

Die drei Physiker Alain Aspect (Frankreich), John F. Clauser (USA) und Anton Zeilinger (Österreich) haben im Jahr 2022 den Nobelpreis in Physik für ihre Forschung zur Verschränkung erhalten. Insbesondere haben sie ausgeklügelte EPR-Experimente zur Verschränkung praktisch durchgeführt und verbessert. Sie haben das Phänomen der Verschränkung damit experimentell bestätigt und zugänglicher gemacht. Das war ein wichtiger Schritt für die Physik generell und damit auch für die technischen Anwendungen, die uns die Verschränkung erlaubt - etwa Quanteninformation, Quantenverschlüsselung und schließlich auch Quantencomputing.



Alain Aspect^{A5}

© Nobel Prize Outreach. Photo: Stefan Bladh



John F. Clauser^{A6}

© Nobel Prize Outreach. Photo: Stefan Bladh



Anton Zeilinger^{A7}

© Nobel Prize Outreach. Photo: Stefan Bladh

Abb. 22: Physik-Nobelpreisträger 2022.

ZUSATZINFO

Warum verstößt die Verschränkung nicht gegen die Relativitätstheorie?

Die Relativitätstheorie von Albert Einstein besagt unter anderem, dass sich im Universum nichts schneller als das Licht ausbreiten kann – zumindest nichts, womit man Informationen übertragen könnte.

Die Relativitätstheorie wird darum nicht verletzt, weil man durch verschränkte Quantenobjekte keine Information übertragen kann. Zwar legt der Messprozess an einem Objekt sofort den Zustand am anderen Objekt fest – welcher Zustand angenommen wird, ist aber nach wie vor rein zufällig. Darum kann man die Verschränkung nicht zur Datenübertragung mit Überlichtgeschwindigkeit verwenden.

ZUSATZINFO

Cooper-Paare: Wie erzeugt man verschränkte Elektronen?

Die gezielte Erzeugung von verschränkten Elektronen ist eine schwierige Aufgabe. Mittlerweile ist es Forschenden aber gelungen, ein Bauteil zu entwickeln, das verschränkte Elektronen nach Bedarf liefern kann. Dafür wird ein Supraleiter genutzt – also ein Material, das bei sehr tiefen Temperaturen elektrischen Strom ganz ohne elektrischen Widerstand leiten kann. Solche Supraleiter enthalten Elektronen-Pärchen, die verschränkt sind und voneinander getrennt werden können.³⁰

30 - vgl. Schönenberger (2009)

A5, A6, A7 - Abbildung von © Nobel Prize Outreach. Photo: Stefan Bladh (2023). <http://www.nobelprize.org>

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

TAKE-HOME-MESSAGE

Die Wesenszüge der Quantenphysik

Die Quantenphysik unterscheidet sich in ihrem Wesen sehr von der klassischen Physik – das wird z. B. in den Wesenszügen deutlich:

- **Superposition:** Quantenobjekte können sich in einer Superposition von sich klassisch widersprechenden Zuständen befinden - solange man keinen Messprozess an ihnen vornimmt.
- **Messprozess:** Im Gegensatz zur Messung der klassischen Physik verändert der Messprozess in der Quantenphysik den Zustand des Systems, an dem gemessen wird. Messprozesse zwingen das Quantenobjekt, einen der Zustände anzunehmen, aus dem die Superposition besteht. Messergebnisse sind damit immer eindeutig.
- **Statistischer Charakter:** Einzelne Messergebnisse sind i. A. zufällig und damit nicht vorhersagbar. Trotz der Zufälligkeit von Messergebnissen kann vor dem Messprozess an einem Quantenobjekt die Wahrscheinlichkeit für jedes mögliche Messergebnis angegeben werden (**Einzel-Prinzip**). Darum lassen sich bei sehr vielen Messprozessen an identisch präparierten Quantenobjekten statistische Vorhersagen treffen (**Ensemble-Prinzip**).
- **Verschränkung:** Mehrere Quantenobjekte können ein Gesamtsystem bilden und besitzen dann keine definierten Zustände als einzelne Objekte mehr. Bei einem Messprozess an einem Teilobjekt wird der Zustand des anderen Teilobjektes ohne Zeitverzögerung unmittelbar festgelegt.

Kapitel 6

Dekohärenz

—

Zusammenhang zwischen klassischer Physik und Quantenphysik

6. Dekohärenz – Zusammenhang zwischen klassischer Physik und Quantenphysik

6.1 Quantenphysik und Alltagserfahrungen

Wir rufen uns nochmal das Gedankenexperiment von Erwin Schrödinger in Erinnerung: Bei Schrödingers Katze ist das radioaktive Atom über Hammer und Giftampulle mit der Katze verschränkt³¹. Das System aus Hammer und Katze kann nämlich nur im Ganzen betrachtet werden – und sobald man den Zustand des einen Objektes weiß, ist automatisch der des anderen Objekts festgelegt.

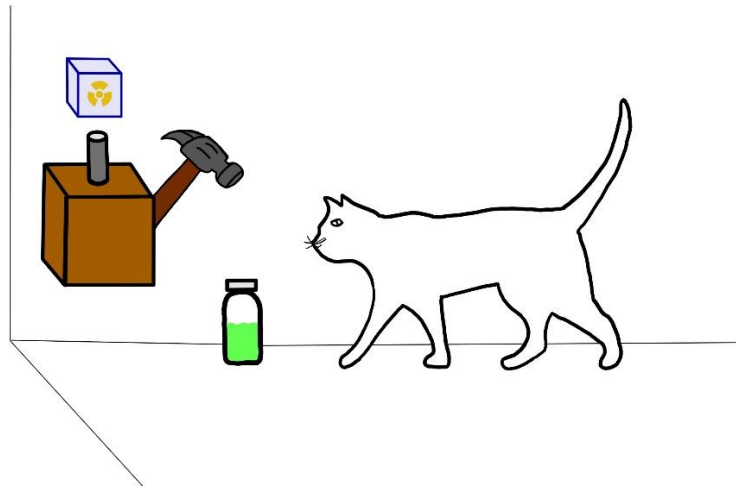


Abb. 23: Inhalt der Box bei Schrödingers Katze.

Das Öffnen der Kiste stellt einen Messprozess dar und der Superpositionszustand der Katze „tot und lebendig“ wird damit beendet – wir sehen die Katze entweder **tot** **oder** lebendig. Aber was genau passiert vor dem Öffnen der Kiste?

Nach dem, was wir bisher von der Quantenphysik wissen, befindet sich die Katze eigentlich in einer Superposition aus den Zuständen „lebendig“ und „tot“. Das ist eine Situation, die wir uns bei einem echten Lebewesen überhaupt nicht vorstellen können.

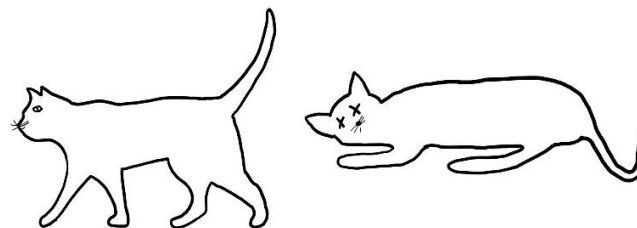


Abb. 24: Katze tot oder lebendig?

Warum erleben wir die Existenz solcher Superpositionszustände in unserem **Alltag** also nicht?

6. Dekohärenz – Zusammenhang zwischen klassischer Physik und Quantenphysik

6.2 Dekohärenztheorie

Eine Theorie, die erklärt, weshalb wir die gelernten Quantenphänomene aus dem Alltag nicht kennen, wurde erst relativ spät (um die 1970er Jahre) entwickelt³². Es scheint auf den ersten Blick seltsam, dass wir von Atomen, Elektronen und anderen Objekten in atomarer Größenordnung sicher wissen, dass sie sich nach den Gesetzen der Quantenphysik verhalten. Aber trotz der Tatsache, dass alles aus Atomen, Elektronen und Co. besteht, sehen wir diese Effekte im Alltag überhaupt nicht.

Lange Zeit haben die Physiker:Innen versucht, physikalische Systeme isoliert von ihrer Umwelt zu betrachten³³. Das heißt, man betrachtet z. B. beim Schrödingers Katze nur das Atom, den Hammer, die Giftampulle und die Katze und lässt alles andere (Karton, Staub, Luft im Karton, Wärmestrahlung, ...) außer Acht. Das hat zum Fehlurteil geführt, dass die Quantentheorie für makroskopische Systeme wie eine Katze gar nicht gilt³⁴.

Die Grundidee eines weiterführenden Erklärungsansatzes war darum, dass makroskopische Körper nicht wie einzelne Quantenobjekte isoliert, sondern **offen** sind und **mit ihrer Umgebung wechselwirken**. Die Wärmestrahlung der Katze etwa beeinflusst die Luftmoleküle in ihrer Umgebung, und jede Sekunde treffen unzählige Luftmoleküle und Lichtquanten auf Katze, Hammer und Co.³⁵.

Solange wirklich keinerlei Messprozess stattfindet, kann sich das Atom im Superpositionszustand „zerfallen und nicht zerfallen“, der Hammer im Zustand „oben und unten“, die Giftampulle im Zustand „zerbrochen und ganz“ und die Katze damit im Zustand „tot und lebendig“ befinden³⁶.

Zählrohr, Hammer, Giftampulle und Katze sind aber **makroskopische** Objekte, die **ständig** mit sehr vielen weiteren Objekten **wechselwirken**. Dazu zählen z. B. die etwa 10^{23} Luftmoleküle in der Kiste – und alle diese mikroskopischen Teilchen interagieren miteinander.³⁷

Jede dieser kleinen Wechselwirkungen ist gewissermaßen aber **eine Art Messprozess** und **zerstört damit die Fähigkeit zur Superposition** der makroskopischen Objekte ein wenig! In der Summe addieren sich auch winzige Abweichungen stark, sodass eine Superposition bereits **nach kürzester Zeit** nicht mehr wahrnehmbar ist und das Objekt **klassisch** wird.

Das **kontinuierliche Verschwinden** der Fähigkeit eines makroskopischen Objektes zu einer wahrnehmbaren Superposition **unter dem Einfluss der Außenwelt** nennt man **Dekohärenz**³⁸. Diese entsprechende Zeitspanne bis zum Verschwinden der wahrnehmbaren Superposition nennt man **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

32 - vgl. Apolin (2019)

33, 34 - vgl. Zeh (2005)

35 - vgl. Appel (2022)

36, 37 - vgl. Kienle & Pardall (2021)

38 - vgl. Krause & Grehn (2020)

6. Dekohärenz – Zusammenhang zwischen klassischer Physik und Quantenphysik

Mit zunehmender Masse eines Objektes und damit mit zunehmender Teilchenzahl steigt auch die Anzahl der Wechselwirkungen mit seiner Umwelt. Da diese Wechselwirkungen ein Verschwinden der nachweisbaren Superposition bewirken, sinkt die **Dekohärenzzeit** mit zunehmender Masse.

Die **Dekohärenzzeit** t_d ist darum näherungsweise indirekt proportional zur Masse m des Objektes: $t_d \sim \frac{1}{m}$.³⁹

Dekohärenzzeiten in Sekunden			
Umgebungseinfluss	freies Elektron	Staubteilchen 10 µg	Bowlingkugel
300 K, Normaldruck	10^{-12}	10^{-18}	10^{-26}
300 K, Ultrahochvakuum (Labor)	10	10^{-4}	10^{-12}

Abb. 25: Beispiele für Dekohärenzzeiten.^{A8}

Die **Dekohärenzzeit** von klassischen Objekten wie einer Bowlingkugel oder sogar eines Staubteilchens ist **unfassbar kurz**. Die Superposition eines makroskopischen Objektes verschwindet für uns also so schnell, dass wir sie **niemals im Alltag** beobachten können⁴⁰. Darum gelten bei sehr vielen Teilchen und makroskopischen Systemen die Gesetze der klassischen Physik – aber damit nur als „Grenzfall“ der Quantenphysik für sehr viele miteinander wechselwirkende Teilchen.

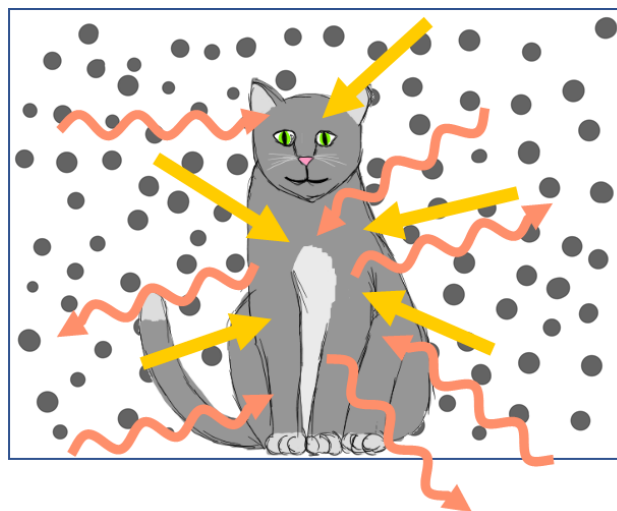


Abb. 26: Dekohärenz durch Umwelteinflüsse (Licht, Gasmoleküle, Wärmestrahlung).^B

Info

Negative Zehnerpotenzen

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

Beispiel:

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

39 - vgl. Apolin (2019)

40 - vgl. Schmöser (2012)

A8 - Abbildung angepasst nach Willig (o. J.) | CC-SA 3.0

B - Abbildung angepasst nach einer Vorlage von Michelle Weck (2023)

6. Dekohärenz – Zusammenhang zwischen klassischer Physik und Quantenphysik

TAKE-HOME-MESSAGE

Dekohärenz

- Superpositionszustände von Quantenobjekten sind sehr **fragil**.
- Sobald ein Quantenobjekt mit einem anderen Objekt **wechselwirkt**, kann die Superposition verschwinden.
- In unserer makroskopischen Welt **interagieren** Objekte dauerhaft und ständig mit ihrer **Umwelt**. Die Superposition von makroskopischen Objekten verschwindet dabei, und wir bemerken sie im Alltag nicht.
- Die Zeit t_d , wie lange ein echter quantenphysikalischer Superpositionszustand des makroskopischen Systems bestehen kann („**Dekohärenzzeit**“), ist umgekehrt proportional zur Masse m des Systems: $t_d \sim \frac{1}{m}$

Kapitel 7

Anwendungen von Qubits

—

Quantencomputer

7. Anwendungen von Qubits – Quantencomputer

Quantencomputer sind im Vergleich zu klassischen Computern sehr exotische Geräte. Im Folgenden soll vorgestellt werden, welche physikalischen Prinzipien dafür sorgen, dass Quantencomputer künftig (spezielle) komplexe Probleme enorm zeiteffektiv lösen können.

7.1 Was ist eine Berechnung bei einem Computer?

Egal für was man einen Computer nutzt – grundsätzlich liefert man einem Computer immer eine **Eingabe**, anhand der er **Berechnungen** durchführt und die Lösung als **Ausgabe** liefert. Was dazwischen passiert, kann man sich am Beispiel der schriftlichen Addition sehr gut verdeutlichen:

Addiert ein Mensch beispielsweise die Zahlen 42.742 und 63.495 schriftlich, so schreibt er diese zunächst untereinander auf ein Blatt.

Dann betrachtet er die letzten Stellen und addiert sie: $5 + 2 = 7$. Also ist die letzte Stelle eine 7, was er unter der Aufgabe notiert.

Es folgt die nächste Stelle: $9 + 4 = 13$. Also die nächste Stelle 3, mit Übertrag 1.

So wird immer weiter fortgefahren und die Berechnung ist in einzelne Schritte unterteilt.

Den addierenden Menschen betrachten wir nun als eine Einheit – einen Rechner. Er durchläuft die verschiedenen **Rechenschritte** – im Beispiel die Addition von Ziffern, das Testen ob ein Ergebnis größer als 9 ist, das Notieren der Zwischenergebnisse, etc.

Der Rechner durchläuft also eine Reihe von **Zuständen**⁴¹:

- Zu Beginn liegt ein **Anfangszustand** vor, bestimmt durch die Eingabe auf dem Blatt.
- Danach werden **Rechenschritte** ausgeführt: die letzte Stelle der ersten Zahl wird betrachtet, mit der letzten Stelle der anderen Zahl addiert und das Ergebnis notiert. Damit ist der Rechner in einem neuen Zustand – dieses **Zwischenergebnis** kannte er zuvor noch nicht.
- In gleicher Weise werden die weiteren Rechenschritte ausgeführt, die jeweils zu einem neuen **Zustand** führen.
- Zum Schluss bricht die Rechnung in einem **Endzustand** ab, und das Ergebnis kann ausgegeben werden.

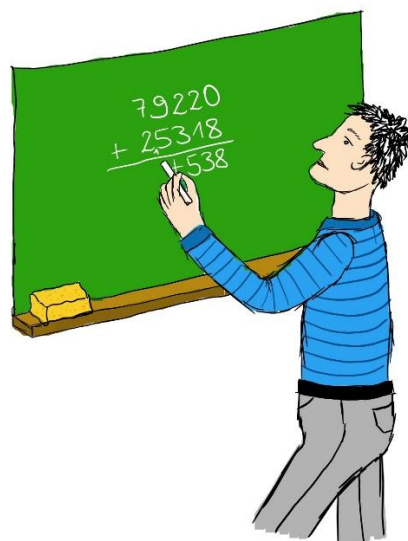


Abb. 27: Rechner beim schriftlichen Addieren.^{A9}

41 - vgl. Homeister (2013)

A9 - Abbildung von Michelle Weck (2023)

7. Anwendungen von Qubits – Quantencomputer

7.2 Wie funktioniert ein Quantencomputer?

Klassische Computer rechnen nicht mit Dezimalzahlen, sondern mit Nullen und Einsen. Umgesetzt wird das technisch durch elektrische Ladungen, die entweder fließen (= 1) oder nicht fließen (= 0).

Die Grundidee von Quantencomputern ähnelt der Funktionsweise von klassischen Computern: auch sie rechnen gewissermaßen mit Nullen und Einsen. Statt Bits werden aber **Qubits** eingesetzt – und das hat dramatische Auswirkungen auf die Rechenprinzipien und -geschwindigkeit, die sich mithilfe der Wesenszüge der Quantenphysik erklären lassen.

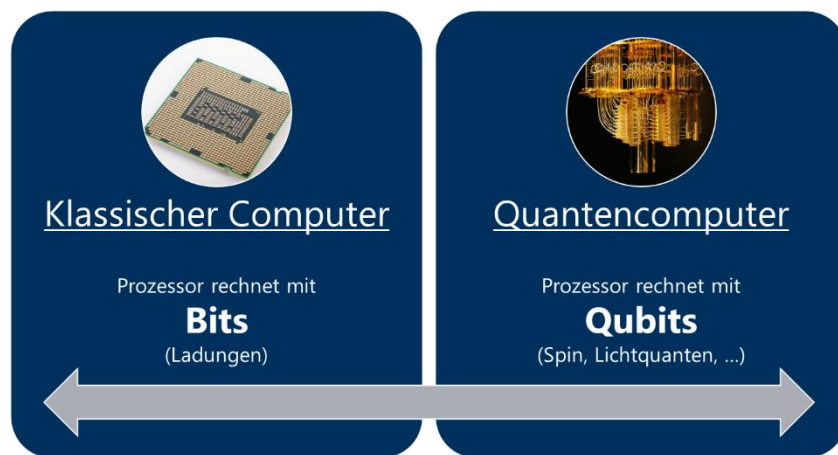


Abb. 28: Gegenüberstellung klassischer Computer und Quantencomputer.^{A10, A11}

Konkret unterscheidet sich das Grundprinzip von Quantencomputern von dem klassischer Computer in folgenden drei Punkten⁴²:

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 ⁴³ .

► Wesenszug Superposition

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

42 - vgl. Pospiech & Schorn (2016)

43- vgl. Murer (2021)

A10 - Abbildung Prozessor von cnull.de, CC-BY 2.0

A11 - Abbildung Quantum Computer von IBM Research, CC-BY-ND 2.0

7. Anwendungen von Qubits – Quantencomputer

Berechnungen

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> Die meisten Prozessoren besitzen mittlerweile mehrere Prozessorkerne, die dadurch Berechnungen auch gleichzeitig („parallel“) durchführen können – jeder Kern für sich arbeitet aber wieder seriell.	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 besteht⁴⁴. 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“).⁴⁵

- **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.

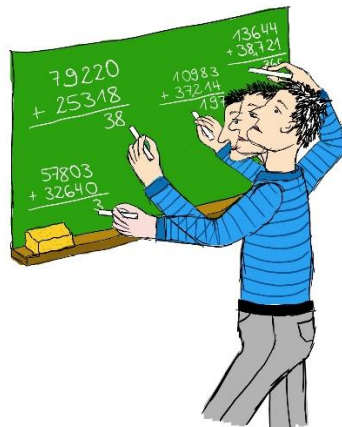


Abb. 29: Ein Quantenrechner im Quantenparallelismus.^{A12}

7. Anwendungen von Qubits – Quantencomputer

Auslesbarkeit von Rechenergebnissen

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 ⁴⁶ . Um das Endergebnis zu erhalten, ist ein Messprozess notwendig. Auch wenn alle Rechnungen durch die Superposition gleichzeitig abgelaufen sind – beim Messprozess wird dieser Superpositionszustand zerstört und das Messergebnis ist eindeutig. Das heißt, der Messprozess 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 . ⁴⁷

► **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.

7.3 Einsatzgebiete⁴⁸

Ein Quantencomputer wird in absehbarer Zukunft vor allem als Co-Prozessor in Zusammenarbeit zusammen mit klassischen Computern eingesetzt werden. Außerdem eignen sich Quantencomputer nach heutigem Wissen i. d. R. nur für spezielle Aufgaben, z. B.

1. **Simulation** von Quantensystemen (z. B. die Simulation der Wirkweise medizinischer Wirkstoffe)
2. Berechnungen zur **Optimierung / KI**
3. **Primfaktorzerlegung/Verschlüsselung**

46, 47 - vgl. Pospiech & Schorn (2016)

48 - vgl. Murer (2021)

7. Anwendungen von Qubits – Quantencomputer

INFO

Quantenüberlegenheit

Als Quantenüberlegenheit bezeichnet man die Überlegenheit von Quantencomputern gegenüber klassischen Computern bei der Berechnung und Lösung von komplexen Problemen.

Google konnte 2019 erstmals die Quantenüberlegenheit nachweisen. Damals löste ein Quantencomputer mit dem Namen „Sycamore“ ein mathematisches Problem innerhalb von 200 s, für das ein normaler Supercomputer u. U. mehrere tausend Jahre benötigen würde. Der Quantencomputer von Google verwendete dabei 53 Qubits. Mit jedem zusätzlichen Qubit verdoppelt sich die Anzahl von sich überlagernden Zuständen, wodurch ihre Rechenfähigkeit enorm wächst. Neuste Quantencomputer haben bereits über 100 Qubits.

7.4 Physikalische Realisierung und Grenzen

Probleme/Grenzen

Ein Hauptproblem eines Quantencomputers ist seine **Fehleranfälligkeit** aufgrund der **Dekohärenz**⁴⁹. Der quantenphysikalische Superpositionszustand der Qubits muss möglichst lange aufrechterhalten werden. Weil schon kleinste Wechselwirkungen der Umwelt (Licht oder Wärme) den Superpositionszustand der Qubits zerstören können, müssen die Qubits und damit der Quantencomputer insgesamt sehr gut von der Umwelt abgeschirmt werden. Quantencomputer können darum meist nur bei extrem niedrigen Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt, im Vakuum und abgeschirmt von Funkwellen betrieben werden.

Aktuelle Quantencomputer haben je nach Typ eine **Dekohärenzzeit** von Bruchteilen einer Millisekunde bis hin zu Minuten. Sie sind also nur für eine kurze Zeit lauffähig, ehe die Dekohärenz die Superposition zerstört.

Darum müssen die Algorithmen im Quantencomputer extrem schnell ablaufen. Außerdem sind Fehlerkorrekturen notwendig, da es durch die Dekohärenz zu Rechenfehlern kommt.⁵⁰

Realisierungen von Quantencomputern: Qubits

Es gibt verschiedene Möglichkeiten für Qubits, aus denen man Quantencomputer entwickeln kann. Auch wenn man den Elektronenspin im Prinzip bereits zur Realisierung von Quantencomputern nutzen könnte, eignen sich andere Umsetzungen in der Praxis besser – z. B. weil man sie besser von der Umwelt abschirmen oder kontrollieren kann. Vielversprechende Ansätze sind

- **Ionenfallen**

Mithilfe von Ionenfallen können Ionen oder Atome eingefangen und von der Außenwelt abgeschirmt werden. Meist werden in solchen Fallen einige Atome durch elektrische und magnetische Felder bei extrem niedrigen Temperaturen und in einem Vakuum festgehalten⁵¹.

- **Unregelmäßigkeiten im Kristallgitter von Diamanten**⁵²

- **Photonen (Lichtquanten)**

49 - vgl. Pospiech (2021)

50 - vgl. Murer (2021)

51 - vgl. Schorn (2014)

52 - vgl. Murer (2021)

7. Anwendungen von Qubits – Quantencomputer



Abb. 30: IBM Quantum lab in Yorktown Heights (New York).^{A13}



Abb. 31: IBM Quantenforscherin Dr. Maika Takita im Labor.^{A14}

Abbildungen freundlicherweise zur Verfügung gestellt von IBM Corporation ©

TAKE-HOME-MESSAGE

Grundprinzip von Quantencomputern

- Quantencomputer nutzen Qubits statt klassischen Bits. Hierdurch ...
 - können an wenigen miteinander verschränkten Qubits viele Rechnungen parallel ausgeführt werden. Das nennt man „**Quantenparallelismus**“ (*Superposition und Verschränkung*).
 - gehen beim **Auslesen eines Endergebnisses** alle anderen Ergebnisse verloren. Darum muss die Wahrscheinlichkeit für das gewünschte Ergebnis möglichst groß sein. **Zwischenergebnisse** können nicht ausgelesen werden (*Messprozess und statistischer Charakter*).
- Quantencomputer können in Zukunft bei **Simulationen, Optimierungsaufgaben und Verschlüsselungsverfahren** eingesetzt werden.
- Es gibt verschiedene Umsetzungen für Qubits in Quantencomputern, bei allen ist die **Dekohärenzzeit ein wichtiger limitierender Faktor**.

Formulierungshilfen

Quantenphysik kennen wir aus unserem Alltag nicht – entsprechend ist es auch schwierig, mit unserer Alltagssprache sauber über Quantenphysik zu sprechen.

Auf dieser Seite kannst du dir festhalten, welche Formulierungen bei bestimmten Themen der Quantenphysik aus fachlicher Sicht gut geeignet sind, und welche eher vermeiden werden sollten (z. B. weil sie unsauber oder ungenau sind).

Phänomen/Tätigkeit/ Größe/Beobachtung/...	Formulierung	
	gut geeignet	eher vermeiden
ein Objekt, das mithilfe der Quantenphysik beschrieben wird	Quantenobjekt	Quantenteilchen
Quantenphysik zeigt ungewohnte Phänomene.	Quantenphysik ist anders als Alltagsphysik. Dennoch ist sie gut erforscht und ein Teilgebiet der modernen Physik.	Quantenphysik ist mysteriös oder gespenstig.
Elektronenspin	Der Elektronenspin ist eine quantenphysikalische magnetische Eigenschaft (magnetische Ausrichtung) von Elektronen.	Der Elektronenspin gibt an, in welche Richtung sich ein Elektron dreht.
Ein Quantenobjekte befindet sich in mehreren, sich klassisch ausschließenden Zuständen.	- Superposition - Superpositionszustand - mehrere Zustände gleichzeitig/teilweise	Überlagerung
ein Quantenobjekt messen	Messprozess	Messung
Ensemble-Prinzip	- Wir können bei einem quantenphysikalischen Experiment <i>statistische</i> Voraussagen treffen. - Beim Stern-Gerlach-Versuch wird <i>etwa die Hälfte</i> der Elektronen nach dem Messprozess im Zustand „Spin up“, und die andere Hälfte im Zustand „Spin down“ sein.	Beim Stern-Gerlach-Versuch wird die Hälfte der Elektronen Spin up, und die andere Hälfte Spin down haben.

Formulierungshilfen

Dekohärenz	• Dekohärenz beschreibt das schnelle Auflösen der Superposition makroskopischer Objekte durch Wechselwirkung mit ihrer Umwelt. • Makroskopische Objekte wechselwirken sehr oft mit ihrer Umwelt. Weil jede Wechselwirkung einen Messprozess darstellt, wird ihre Superposition sehr schnell aufgelöst.	• Dekohärenz sagt, dass makroskopische Objekte in Superposition sind. • Makroskopische Objekte können nicht in Superposition sein. • Wir können Superpositionen nicht sehen, weil makroskopische Objekte nicht in Superposition sind.
Quantenparallelismus	• Quantencomputer rechnen durch das Superpositionsprinzip mit mehreren Zuständen gleichzeitig bzw. mit Superpositionen von Zuständen, können aber nur ein Rechenergebnis ausgeben.	• Quantencomputer rechnen alle möglichen Rechenergebnisse gleichzeitig aus.
Zustand nach einem Messprozess	• Basiszustand	• eindeutiger Zustand • Teilzustand • echter Zustand • klarer Zustand

Quellenverzeichnis

Bildquellenverzeichnis:

Alle Abbildungen und Grafiken entstammen, mit Ausnahme der folgenden Abbildungen, dem Autor.

- Abbildung 1: Quantencomputer | <https://tueftelakademie.de/quanten1x1/>, CC-BY-SA 4.0,
- Abbildung 4: Ausblenden einer bestimmten Farbe | Müller, Rainer; Wiesner, Hartmut; Schorn, Bernadette (o. J.): Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik. Gesamtskript. URL: https://www.milq.info/data/_uploaded/Lehrgang/milq_gesamt_skript.pdf (letzter Abruf am 23.01.2023)
- Abbildung 5: Test auf Präparation einer Eigenschaft | Müller, Rainer; Wiesner, Hartmut; Schorn, Bernadette (o. J.): Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik. Gesamtskript. URL: https://www.milq.info/data/_uploaded/Lehrgang/milq_gesamt_skript.pdf (letzter Abruf am 23.01.2023)
- Abbildung 6: Illustration eines klassischen Bits, Abbildung nach Dür, W., & Heusler, S. (2012). Was man vom einzelnen Qubit über Quantenphysik lernen kann. 2012, 16. <http://www.phydid.de/index.php/phydid/article/view/311/450>
- Abbildung 21: Does colour exist when no one is watching? | Abbildung von © Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences (o. J.). URL: https://www.nobelprize.org/uploads/2022/10/fig2_fy_en_22_colours.pdf (letzter Abruf am 26.01.2023) *Special permission for educational use*
- Abbildung 22: The Nobel Prize in Physics 2022 | Abbildung von © Nobel Prize Outreach. Photo: Stefan Bladh (2023). URL: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2022/summary/> (letzter Abruf am 23.01.2023) *Special permission for educational use*
- Abbildung 25: *Angepasst nach einem Vorbild nach* Hans-Peter Willig (o. J.) | Typische Dekohärenzzeiten. CC-SA 3.0 | URL: https://www.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Dekoh%C3%A4renz?utm_content=cmp-true (letzter Abruf am 21.11.2023).
- Abbildung 26: Verändert nach einer Vorlage von Michelle Weck (2023)
- Abbildung 27: Michelle Weck (2023)
- Abbildung 28: Prozessor | ccnull.de, CC-BY 2.0
- Abbildung 28: Quantum Computer | IBM Research, CC-BY-ND 2.0
- Abbildung 29: Michelle Weck (2023)
- Abbildung 30: IBM Quantum lab in Yorktown Heights, NY (1994,2023): https://newsroom.ibm.com/media-quantuminnovation?l=100#gallery_gallery_0:22084
- Abbildung 31: IBM Quantum scientist Dr. Maika Takita in lab (1994,2023): https://newsroom.ibm.com/media-quantuminnovation?l=100#gallery_gallery_0:22083
IBM, the IBM logo, and ibm.com are trademarks or registered trademarks of International Business Machines Corporation, registered in many jurisdictions worldwide. Other product and service names might be trademarks of IBM or other companies. A current list of IBM trademarks is available on the Web at "IBM Copyright and trademark information" at www.ibm.com/legal/copytrade.shtml.

Literaturverzeichnis:

- 100SekundenPhysik (2021): Steht die Zukunft schon fest? [Video]. YouTube., URL: <https://www.youtube.com/watch?v=7HX-fF1YH3Q> (letzter Abruf am 29.04.2022).
- Aktas, B. (2019): Quantum Computing und Shor-Algorithmus. Fakultät für Mathematik und Wirtschaftswissenschaften. Universität Ulm. URL: https://oparu.uni-ulm.de/xmlui/bitstream/handle/123456789/26053/quantum_computing.pdf?sequence=3&isAllowed=y (letzter Abruf am 26.01.2023).
- Apolin, M. (2019): Big Bang Physik Oberstufe [Ausgabe ab 2019], 1. Auflage. Stuttgart, Leipzig: Ernst Klett Verlag GmbH.
- Appel, T. R. (2022): Impulse Physik - Oberstufe. [Ausgabe BE, BB, BW, HB, HH, HE, MV, NI, NW, RP, SL, SN, ST, SH, TH ab 2021], 1. Auflage. Stuttgart, Leipzig: Ernst Klett Verlag.
- Bricmont, J. (2018): Quantensinn und Quantenunsinn.
- Brockhaus Enzyklopädie Online, Zustand (Physik). <https://brockhaus.de/ecs/enzy/article/zustand-physik> (letzter Abruf am 29.09.2022), NE GmbH Brockhaus
- Bührke, T. (2008): Sternstunden der Physik. Von Galilei bis Heisenberg. Limitierte Sonderausg. München: Beck (Beck'sche Reihe, 4062).
- Dür, W.; Heusler, S. (2012): Was man vom einzelnen Qubit über Quantenphysik lernen kann. PhyDid A - Physik und Didaktik in Schule und Hochschule, [S.l.], p. 01-16, März 2012. ISSN 1865-5521.
- Dür, W.; Heusler, S. (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.
- Hoffmann, D. (1998): Geschichte der Physik. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/geschichte-der-physik/5780> (letzter Abruf: 21.11.2023).
- Hofstetter, L.; Csonka, S.; Nygård, J.; Schönenberger, C. (2009): Cooper pair splitter realized in a two-quantum-dot Y-junction. In: Nature 461 (7266), S. 960–963. DOI: 10.1038/nature08432.

Quellenverzeichnis

- Homeister, M. (2013): Quantum Computing verstehen. Grundlagen - Anwendungen - Perspektiven. 3. Aufl. 2013. Wiesbaden: Springer Vieweg (Springer eBook Collection).
- Kempfert, T. (2013): Hauptseminar Physik des Quantencomputers. Shor-Algorithmus. Institut für Theoretische Festkörperphysik. Karlsruher Institut für Technologie. URL: https://www.tfp.kit.edu/downloads/lehre_2013_ss/aaa_HSS13_Shor.pdf (letzter Abruf am 21.06.2022).
- Kienle, R.; Pardall, C.-J. (Hrsg.) (2021): Universum Physik – Kursstufe Gymnasium Baden-Württemberg [Autoren: Kienle, R.; Küblbeck, J.; Pardall, C.-J.; Schäfer, J. & Wienbruch, U.]. 1. Auflage. Berlin: Cornelsen.
- Knop, R. (2012): Energy & Matter: Our Quantum World. Westminster College. URL: [https://phys.libretexts.org/Under_Construction/Energy_and_Matter%3A_Our_Quantum_World_\(Knop\)](https://phys.libretexts.org/Under_Construction/Energy_and_Matter%3A_Our_Quantum_World_(Knop)) (letzter Abruf am 13.04.2023).
- Krause, J.; Grehn, J. (2020): Metzler Physik. 5. Aufl. Braunschweig: Westermann.
- Küblbeck, J. (2022): Cornelsen-Fortbildung „Welcher-Weg-Information und Verschränkung in der Quantenphysik“ am 27.04.2022.
- Kuhn, J. (Hrsg.) (2000): Kuhn Physik 2. Ausgabe 2000: Grundkurse 11.-13. Schuljahr [Bearbeitet von Bang, G.; Euler, M.; Kreß, K.; von Kuhn, W.; Lochhaas, H.; Müller, R.; Pientka, H. & Zittlinger, K. H.]. 1. Aufl.: Braunschweig: Westermann.
- Lämmerzahl, C. (2022): Quantenkryptografie für die Schule. Universität Bremen
- LEIFiPhysik (o. J.a): Max PLANCK (1858-1947). URL <https://www.leifiphysik.de/quantenphysik/quantenobjekt-photon/geschichte/max-planck-1858-1947> (letzter Abruf am 05.10.2026).
- LEIFiPhysik (o. J.b): Wesenszüge Quantenphysik. URL: <https://www.leifiphysik.de/quantenphysik/quantenobjekt-photon/geschichte/max-planck-1858-1947>
- Löwen, H. (2002): Weiche Materie: vom hässlichen Entlein zum schönen Schwan. URL: <https://www2.thphy.uni-duesseldorf.de/~hloewen/doc/ra/ra0016.pdf> (letzter Abruf am 16.05.2022).
- Müller, R. (o. J.): Präparation dynamischer Eigenschaften. MILQ – Quantenphysik in der Schule. URL: <https://www.milq.info/mehr/2-prapARATION/> (letzter Abruf am 29.09.2022).
- Müller, R. (2003): Quantenphysik in der Schule.
- Müller, R. (2005): Qualitative Quantenphysik. Eine Handreichung für die Sekundarstufe I. Hg. v. Physik im Kontext – Ein Programm zur Förderung der naturwissenschaftlichen Grundbildung durch Physikunterricht.
- Müller, R.; Wiesner, H.; Schorn, B. (o. J.): Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik. Gesamtskript. URL: https://www.milq.info/data/_uploaded/Lehrgang/milq_gesamt_skript.pdf.
- Murer, G. (2021): Eine Reise durch die Quantenwelt. Von den Anfängen der Quantenphysik bis zum Quantencomputer - anschaulich und kompakt.
- Press release. NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach (2023):. Press release, NobelPrize.org., URL: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2022/press-release/> (letzter Abruf am 26.01.2023).
- Pospiech, G. (2021): Quantencomputer & Co. Grundideen und zentrale Begriffe der Quanteninformation verständlich erklärt. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Spektrum (essentials).
- Pospiech, G.; Schorn, B. (2016): Der Quantencomputer in der Schule. In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule 65 (1), S. 5–10.
- Quizlet, Inc. (2023): Wesenszüge der Quantenphysik. URL: <https://quizlet.com/de/karteikarten/wesenszuge-der-quantenphysik-245580082> (letzter Abruf am 23.11.2023)
- Schmüser, P. (2016): Faszination Quantentheorie. In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule 65 (4), S. 5–16.
- Schnabel, P. (o. J.): Elektronik Kompendium. Einheiten in der IT. URL: <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/com/1401171.htm> (letzter Abruf am 18.05.2022).
- Schönenberger, C. (2009): Verschränkte Elektronen für Quantencomputer. Universität Basel. Welt der Physik. Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V.
- Schorn, B. (2014): Quantenphysik in der Schule. Eine Unterrichtskonzeption zur Einführung in die Quantenphysik für die 10. Jahrgangsstufe. Dissertation. Technische Universität Dresden, Dresden. Physik.
- Statista GmbH (o. J.): Definition Gesetz der großen Zahl. URL: https://de.statista.com/statistik/lexikon/definition/58/gesetz_der_gro_c3_9fen_zahl/ (letzter Abruf am 29.09.2022).
- Zeh, H.-D. (2005): Entropie. Physik der Wahrscheinlichkeiten: Statistische Mechanik; Information, Ordnung, Determinismus und Kausalität; Entropie in der Quantenmechanik; das große Ganze: Zeit und Universum. Orig.-Ausg., Fischer kompakt, 16127, Frankfurt a. M.: Fischer-TB-Verl.

DRESDEN
concept
SCIENCE AND
INNOVATION CAMPUS



Leibniz
Leibniz
Gemeinschaft