Quantencomputer (Motivation)

Quantencomputer…

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

INFO

Primfaktorzerlegung und Shor-Algorithmus

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

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

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

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

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

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

Die Gebiete der Physik

Klassische Physik

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

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

Moderne Physik

→ Die Teilgebiete der modernen Physik entstanden ca. ab **Beginn des 20. Jahrhunderts.**

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

Grundprinzipien der klassischen Physik und der Quantenphysik

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

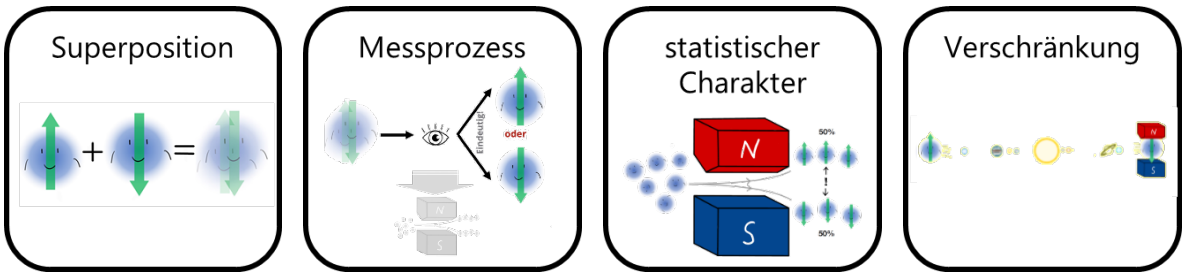
by Carsten Albert (2026), lizensiert unter CC BY-NC-SA 4.0

Die Wesenszüge der Quantenphysik

Was macht die Quantenphysik aus?

Als Wesenszüge der Quantenphysik bezeichnen wir vier besondere Phänomene, die

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



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

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

Wesenszug 1:
Superposition

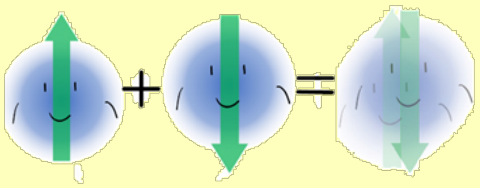
***Definition:* Superposition**

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

Beispiel:

Spin eines Elektrons:

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



Lösungen

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

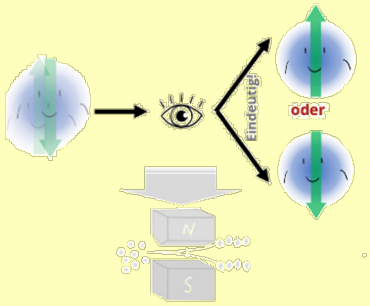
by Carsten Albert (2026), lizensiert unter CC BY-NC-SA 4.0

Wesenszug 2:
Messprozess*

***Definition:* Messprozess**

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

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



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

Aufgabe I:

a. Öffne Simulation 1 (Messprozess).

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

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

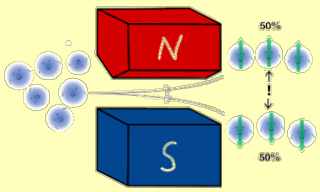
c. Beantworte folgende Fragen:

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

Wesenszug 3:
Statistischer Charakter*

***Definition:* statistischer Charakter**

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



Einzel-Prinzip:

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

Ensemble-Prinzip:

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

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

Aufgabe II:

a. Öffne Simulation 2 (Statistischer Charakter).

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

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

c. Beantworte auf Basis deiner Beobachtungen folgende Fragen:

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

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

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

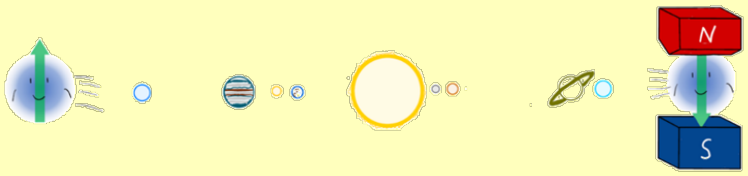
e. Beantworte auf Basis deiner Beobachtungen folgende Fragen:

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

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

***Definition:* Verschränkung**

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



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

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

Aufgabe III:

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

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

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

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

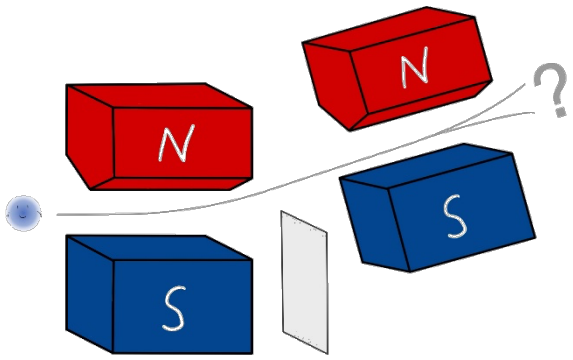
d. Beantworte auf Basis deiner Beobachtungen an den verschränkten Elektronen folgende Fragen:

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

Aufgabe/Weitergedacht:
Zwei identische Messprozesse nacheinander

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

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



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

Nach dem ersten Messprozess befindet sich das Elektron nicht mehr in Superposition, durch den Messprozess hat es die Eigenschaft „Spin up“ angenommen (denn es befindet sich nach dem Messprozess sicher in einem Basiszustand).

Damit ist das zweite Messergebnis **nicht mehr zufällig**, sondern auch sicher „Spin up“.

b. Schlussfolgere: Befinden sich Quantenobjekte immer in Superpositionszuständen?

Quantenobjekte können, müssen sich aber nicht in Superpositionszuständen befinden. Nach einem Messprozess sind sie bzgl. der gemessenen Größe stets nicht mehr in einem Superpositionszustand.

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

Dekohärenz und Dekohärenzzeit

Warum ist unsere Alltagswelt klassisch?

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

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

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

→ Makroskopische Körper sind **nicht** von ihrer Umgebung **isoliert**.
→ Sie **wechselwirken**/interagieren praktisch dauerhaft und extrem oft **mit ihrer Umgebung** (z. B. Licht, Gasmoleküle, Wärmestrahlung).
→ Jede dieser Wechselwirkungen stellt einen **Messprozess** dar.
→ Die Superposition wird **extrem schnell** aufgelöst.

Übernimm die Definition der **Dekohärenzzeit:**

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

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

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

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

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

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

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

Variiere die Objekte und die Umgebungsparameter systematisch, sodass du Vergleiche anstellen kannst.
Notiere deine Beobachtungen in der folgenden Tabelle:

Objekt	Temperatur	Druck	Lichteinfall	Dekohärenzzeit

Auswertung:

Vervollständige folgende Sätze:

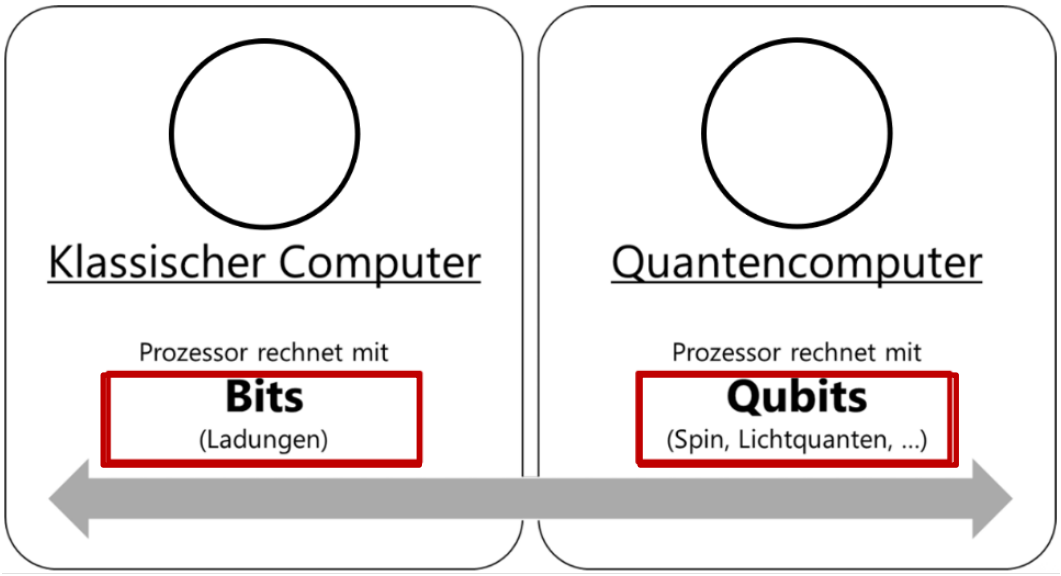
- **Masse**
  Je *größer* die Masse des Objektes ist, umso kleiner ist seine Dekohärenzzeit.
- **Temperatur**
  Je *geringer* die Umgebungstemperatur ist, umso größer ist die Dekohärenzzeit.
- **Druck**
  Je *größer* der Umgebungsdruck ist, umso kleiner ist die Dekohärenzzeit.
- **Lichteinfall**
  Je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

Entscheide, ob folgende Aussagen wahr oder falsch sind:

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

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

Wie funktionieren Quantencomputer?



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

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

Informationsträger

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

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

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

Berechnungen („Quantenparallelismus“)

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

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

Klassischer Computer:

Berechnungen bei klassischen Computern werden ☐ gleichzeitig ☒ nacheinander ausgeführt.

Quantencomputer:

Berechnungen bei Quantencomputern werden ☒ gleichzeitig ☐ nacheinander ausgeführt.

Dieses Phänomen nennt man **Quantenparallelismus**

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

Begründung anhand der Wesenszüge:

- **1. Wesenszug: Superposition**

  Durch das Superpositionsprinzip können Quantencomputer immer mehrere Rechnungen gleichzeitig ausführen.

- **2. Wesenszug: Verschränkung**

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

Auslesbarkeit der Rechenergebnisse

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

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

Klassischer Computer:

Rechenergebnisse bei klassischen Computern lassen sich auslesen.

☒ auch zwischendurch
☐ nur ganz zum Schluss

Das ausgegebene Endergebnis ist dabei das Ergebnis der Berechnung.

☒ auf jeden Fall
☐ nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit

Quantencomputer:

Rechenergebnisse bei Quantencomputern lassen sich auslesen.

☐ auch zwischendurch
☒ nur ganz zum Schluss

Das ausgegebene Endergebnis ist dabei das Ergebnis der Berechnung.

☐ auf jeden Fall
☒ nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit

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

Begründung anhand der Wesenszüge:

- **1. Wesenszug: Messprozess**

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

- **2. Wesenszug: statistischer Charakter**

  Man kann Rechnungen so gestalten, dass die Wahrscheinlichkeit für das gewünschte Ergebnis möglichst groß wird. Der statistische Charakter der Quantenphysik erlaubt es, mit großer Sicherheit das gewünschte Ergebnis zu erhalten, wenn man die Rechnung oft durchführt.

Mögliche Einsatzgebiete von Quantencomputern

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

   → ***als „Co-Rechner“***

Herausforderung in der technischen Realisierung

Ein Hauptproblem:

Fehleranfälligkeit aufgrund **Dekohärenz**