

Quantencomputer Ihre Möglichkeiten

Wolfgang Vogg, Eurasburg
Grafiken von: Dr. Wolfgang Zettlmeier



Die Schüler lernen die Möglichkeiten der Quantenphysik in einer technischen Anwendung kennen. Sie verstehen, welche Perspektiven diese neue Technologie für uns in der Zukunft bereithalten könnte, und erkennen, wieso die Zeit noch nicht ganz reif dafür ist. Die Schüler werden dazu aufgefordert, ihre Vorstellungen über die Realität nach der klassischen Physik zu hinterfragen, und begeben sich in die unglaubliche, gar unbegreifliche Welt der Quantenphysik.

Impressum

RAABE UNTERRICHTS-MATERIALIEN Physik

6/2019

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Es ist gemäß § 60b UrhG hergestellt und ausschließlich zur Veranschaulichung des Unterrichts und der Lehre an Bildungseinrichtungen bestimmt. Die Dr. Josef Raabe Verlags-GmbH erteilt Ihnen für das Werk das einfache, nicht übertragbare Recht zur Nutzung für den persönlichen Gebrauch gemäß vorgenannter Zweckbestimmung. Unter Einhaltung der Nutzungsbedingungen sind Sie berechtigt, das Werk zum persönlichen Gebrauch gemäß vorgenannter Zweckbestimmung in Klassensatzstärke zu vervielfältigen. Jede darüber hinausgehende Verwertung ist ohne Zustimmung der Verlags unzulässig und strafbar. Hinweis zu §§ 60a, 60b UrhG: Das Werk oder Teile hiervon dürfen nicht ohne eine solche Einwilligung an Schulen oder in Unterrichts- und Lehrmedien (§ 40b Abs. 3 UrhG) vervielfältigt, insbesondere kopiert oder eingescannt, verbreitet oder in ein Netzwerk eingestellt oder sonst öffentlich zugänglich gemacht oder wiedergegeben werden. Dies gilt auch für Kopien von Schulen und sonstigen Bildungseinrichtungen. Die Aufführung abgedruckter musikalischer Werke ist ggf. GEMA-meldepflichtig.

Für jedes Material wurden Fremdrechte recherchiert und ggf. angefragt.

In unseren Beiträgen sind wir bemüht, die für Experimente nötigen Substanzen mit den entsprechenden Gefahrenhinweisen zu kennzeichnen. Dies ist ein zusätzlicher Service. Dennoch ist jeder Experimentator selbst angehalten, sich vor der Durchführung der Experimente genauestens über das Gefährdungspotenzial der verwendeten Stoffe zu informieren, die nötigen Vorsichtsmaßnahmen zu ergreifen sowie alles ordnungsgemäß zu entsorgen. Es gelten die Vorschriften der Gefahrstoffverordnung sowie die Dienstvorschriften der Schulbehörde.

Dr. Josef Raabe Verlags-GmbH
Ein Unternehmen der Klett Gruppe
Rotebühlstraße 77
70178 Stuttgart
Telefon +49 711 62900-0
Fax +49 711 62900-60
meinRAABE@raabe.de
www.raabe.de

Redaktion: Anna-Greta Wittnebel
Satz: Röser MEDIA GmbH & Co. KG, Karlsruhe
Illustrationen: Dr. Wolfgang Zettlmeier, Barbing
Bildnachweis Titel: The World in HDR / Shutterstock
Korrektorat: Mona Hitznauer, Regensburg; Johanna Stotz, Wyhl a. K.
Druck: SDK Systemdruck Köln GmbH & Co. KG, Maarweg 233, 50825 Köln
Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier

Quantencomputer und ihre Möglichkeiten

Wie weit ist die Forschung?

Wolfgang Vogg, Eurasburg

Grafiken von Dr. Wolfgang Zettlmeier

M1 Einleitung	3
M2 Warum werden Quantencomputer benötigt?	5
M3 Wie soll ein Quantencomputer prinzipiell funktionieren?	7
M4 Die verschiedenen technischen Ansätze von Quantencomputern	13
M5 Welche Probleme machen den Bau von Quantencomputern so schwierig?	21
M6 Welche Zukunftsperspektiven sind denkbar?	22

Die Schüler lernen:

Möglichkeiten der Quantenphysik in einer technischen Anwendung kennen. Sie verstehen, welche Perspektiven diese neue Technologie für uns in der Zukunft bereithalten könnte, und erkennen, wieso die Zeit noch nicht ganz reif dafür ist. Die Schüler werden dazu aufgefordert, ihre Vorstellungen über die Realität nach der klassischen Physik zu hinterfragen, und begeben sich in die unglaubliche, gar unbegreifliche Welt der Quantenphysik.

Überblick:

Legende der Abkürzungen:

AB: Arbeitsblatt

TA: Tafelbild

Thema	Material	Methode
Einleitung	M1	Lehrervortrag
Warum werden Quantencomputer benötigt?	M2	Schülerreferat
Wie soll ein Quantencomputer prinzipiell funktionieren?	M3	Herleitungen und Besprechung von Beispielen
Die verschiedenen technischen Ansätze von Quantencomputern	M4	Videos - YouTube etc.
Welche Probleme machen den Bau von Quantencomputern so schwierig?	M5	Schülerreferat/ ggf. Firmenvideos oder Animationen
Welche Zukunftsperspektiven sind denkbar?	M6	Lehrervortrag mit Diskussion

Es sind nicht einmal hundert Jahre vergangen, seit in den Jahren von 1925 bis 1932 zahlreiche Physiker, darunter die späteren Nobelpreisträger **Paul Dirac**, **Erwin Schrödinger** und **Werner Heisenberg**, die physikalische Theorie der Quantenmechanik erarbeiteten, die im Gegensatz zu den Theorien der klassischen Physik eine Erklärung der physikalischen Eigenschaften von Atomen und ihren noch kleineren Bestandteilen ermöglichte. Die Quantenmechanik wurde schnell zu einer der Hauptsäulen der modernen Physik und bildet die Grundlage für viele ihrer Teilbereiche wie etwa die Atom- und Kernphysik, die Elementarteilchenphysik oder die Festkörperphysik. Neben der speziellen Relativitätstheorie (1905) und der allgemeinen Relativitätstheorie (1915) durch Albert Einstein war es vor allem die Quantenmechanik, die das Weltbild der Physiker grundlegend veränderte. Erfindungen wie der Transistor, der Laser oder das moderne GPS-Ortungssystem wären ohne Quantenmechanik nicht möglich gewesen. Die Quantentechnologie hat längst Einzug in den Alltag von uns Menschen gefunden – wie etwa in Form von Flash-Speichern (die z. B. in USB-Sticks verbaut sind), denen der quantenmechanische Tunneleffekt zugrunde liegt, oder Quantenkryptografie-Systemen sowie Quantenzustands-Generatoren. Den Entwicklungen der Quantenmechanik des zwanzigsten Jahrhunderts – oft als wissenschaftliche Revolution bezeichnet – soll nun gemäß den Prognosen von zahlreichen Experten eine „zweite Quantenrevolution“ folgen, die entscheidende wirtschaftliche und gesellschaftliche Folgen mit sich bringen kann. Völlig neu gedachte Technologien, die sich die bizarr anmutenden Gesetze im Reich der Atome und Moleküle auf viel grundlegendere Weise als bisher nutzen machen, eröffnen faszinierende Möglichkeiten. Die Quantentheorie besagt, dass sich mikroskopische Teilchen in mehreren Zuständen gleichzeitig befinden – diesen Zustand nennt man *Superposition*. Zudem lassen sich diese Objekte mit anderen Quantenpartikeln derart vernetzen, dass sie selbst über große Entfernungen untrennbar miteinander verbunden bleiben – dazu wurde der Begriff der *Verschränkung* eingeführt. Mit lange nicht vorstellbaren Effekten will man Computer bauen, die schwierigste, komplexe Berechnungen viel schneller erledigen können als heutige Spitzencomputer. Man will Kommunikationsnetze schaffen, die zu hundert Prozent abhörsicher sind, und damit eine Informationsübertragung erschaffen, die aufgrund der quantenphysikalischen Gegebenheiten von keinem Hacker mehr geknackt werden kann.

Wie werden solche Quantencomputer aufgebaut sein, welche physikalischen Grundlagen müssen noch erforscht werden und welche Probleme kommen den Entwicklern auf ihrem langen Weg bis zur Serienreife in die Quere? Diese Überlegungen und vieles mehr will der folgende Beitrag beschreiben und eingehend erläutern.

M3 Wie soll ein Quantencomputer prinzipiell funktionieren?

Will man das Prinzip von Quantencomputern und der daraus resultierenden Rechenleistung verstehen, muss man tief in die Quantenphysik mit ihren mysteriös anmutenden Gesetzen eintauchen.

Heutige Computer verarbeiten und speichern komplexe Informationen wie Zahlen und Texte mit einem System, das nur auf zwei Zeichen (0 und 1) basiert. Diese Zeichen sind jeweils ein **Bit** Information, das im Computer in einem winzigen schaltbaren Stromkreis gespeichert wird, der entweder eingeschaltet (ON = 1) oder ausgeschaltet (OFF = 0) ist. Die Verarbeitung erfolgt durch extrem viele und extrem schnelle EIN- und AUS-Schaltvorgänge.

Eine Zerlegung von komplexen Informationen in Bits wird auch ein zukünftiger Quantencomputer vornehmen. Dabei verwendet er aber keine schaltbaren Stromkreise, sondern ein quantenphysikalisches System, das die Zustände 1 und 0 gleichzeitig annehmen kann – und zusätzlich noch jeden Zustand dazwischen!

Dies hat Konsequenzen für die Datenverarbeitung, wenn man sich z. B. einen Quantencomputer vorstellt, der Schach spielt.

So könnte er alle möglichen Bewegungen auf einmal analysieren und dann die beste auswählen – ein gewaltiger Fortschritt im Vergleich zu einem modernen Computer, der alle Bewegungen nacheinander analysieren und entsprechende Maßnahmen auswählen muss.

Man hat für den Quantencomputer die Informationseinheit Quantenbit (kurz **Qubit**) gewählt als quantenmechanisches Pendant zum klassischen digitalen Bit.

Quantenphysiker bezeichnen diesen Zwischenzustand als Überlagerung (*Superposition*), also einen Mischzustand, ähnlich einer in die Luft geworfenen Münze, die während des Fluges Kopf und Zahl gleichzeitig repräsentiert und erst beim Aufprall auf den Boden auf einen Zustand festgelegt wird. Diese Festlegung auf einen Zustand ergibt sich bei Quantenteilchen durch mögliche äußere *Störungen* oder durch die bewusst gewollte *Messung*.

Den Unterschied zwischen klassischem Bit und Qubit zeigt Abb. 1 in einer sehr allgemein gehaltenen Darstellung:

klassisches Bit
OFF = 0 ON = 1



Qubit
Bloch-Kugel

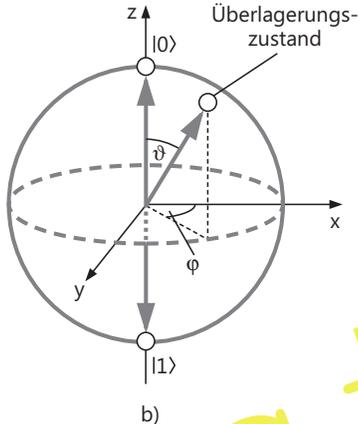


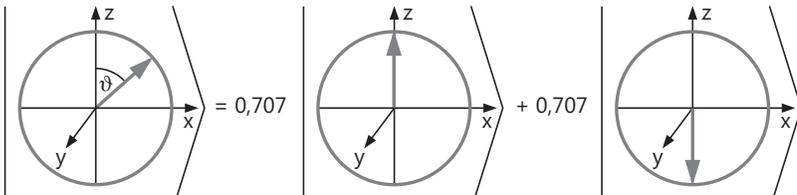
Abb. 1: Vergleich zwischen klassischem Bit und Qubit

Abb. 1 a zeigt ein klassisches Bit (binary digit), das nur zwei mögliche Werte annehmen kann: Pfeil nach oben (0) oder Pfeil nach unten (1). Dabei sollte ein Bit als abstraktes Objekt verstanden werden, wie etwa ein Schalter mit zwei möglichen Stellungen (OFF – ON) oder eine Spannung, die z. B. die Werte $U = 0 \text{ V}$ (OFF) oder $U = 2 \text{ V}$ (ON) einnehmen kann. Abb. 1 b zeigt ein quantenphysikalisches Qubit, das letztendlich bei einer Messung auch wieder zwei mögliche Werte annehmen kann – die 0 oder die 1.

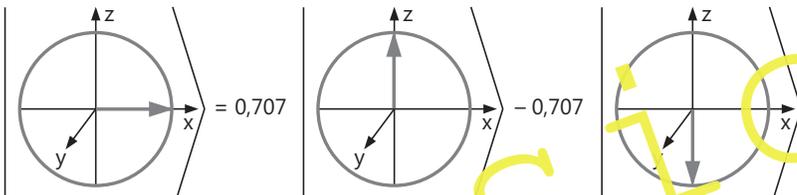
Der entscheidende Unterschied ist aber der, dass bis zu einer Messung beliebig viele Überlagerungen von quantenmechanischen Zuständen zwischen 0 und 1 möglich sind. Diese quantenmechanischen Zustände werden folgendermaßen bezeichnet:

$$|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Abb. 2 zeigt beispielhaft zwei Überlagerungszustände, die auf der Bloch-Kugel in $\pm x$ -Richtung orientiert sind: für $\vartheta = \pi$ und $\phi = 0$ (Abb. 2 b) und $\vartheta = \pi/2$ und $\phi = \pi$. Dabei reicht es für Berechnungen in der Schule völlig aus, nur reelle Koeffizienten zu betrachten (Phase $e^{i\phi} = 1$) mit $\vartheta \in [0, 2\pi]$.



a)



b)

Abb. 2: Beispiele für Überlagerungszustände auf der Bloch-Kugel

Es gilt die Euler'sche Formel $e^{i\phi} = \cos\phi + i \cdot \sin\phi$.

Für $\vartheta = \pi/2$ und $\phi = 0$ ergibt sich (Abb. 2 b):

$$|0_x\rangle = \cos\frac{\pi}{2}|0\rangle + \sin\frac{\pi}{2} \cdot e^{i\cdot 0}|1\rangle \Rightarrow |0_x\rangle = 0,707|0\rangle + 0,707 \cdot 1|1\rangle$$

Für $\vartheta = \pi/2$ und $\phi = \pi$ ergibt sich:

$$\begin{aligned} |1_x\rangle &= \cos\frac{\pi}{2}|0\rangle + \sin\frac{\pi}{2} \cdot e^{i\pi}|1\rangle \\ &= 0,707|0\rangle + 0,707 \cdot (\cos\pi + i \cdot \sin\pi)|1\rangle \Rightarrow |1_x\rangle = 0,707|0\rangle - 0,707 \cdot 1|1\rangle \\ &= 0,707|0\rangle + 0,707 \cdot (-1 + i \cdot 0)|1\rangle \end{aligned}$$

Wie bei einem klassischen Computer werden mehrere Bits oder Qubits zu sogenannten Registern zusammengefasst. Für klassische Bits gilt dabei:

2 Bits: $|01\rangle$; 3 Bits: $|010\rangle$; 4 Bits: $|0101\rangle$ usw.

Qubits hingegen können durch die Überlagerung alle Zustände gleichzeitig einnehmen:

2 Qubits: $|00\rangle + |01\rangle + |10\rangle + |11\rangle$

M4 Verschiedene technische Ansätze von Quantencomputern

Der Volkswagen-Konzern und das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt spielen Vorreiter, indem sie begonnen haben, Quantencomputer der Firma D-Wave aus Kanada zu testen. Es sind die ersten kommerziell vertriebenen Quantencomputer auf dem Markt, die als vielversprechende Anwendung die Lösung von Optimierungsproblemen bringen sollen, an denen klassische Computer häufig sehr lange rechnen müssen. Der von D-Wave 2017 präsentierte Prozessor mit 2 048 Qubits (Abb. 4) zeigt allerdings noch keinen Quantenvorteil bei Berechnungen, da diese bisher effizienter auf klassischen Rechnern durchgeführt werden können.



© RAABE 2019

Abb. 4: Quantencomputerchip von D-Wave,

Foto: Trias Research

Der Aufwand bei Quantencomputern ist immens: So verwenden neben D-Wave auch Google, IBM oder Intel supraleitende Stromkreise als Qubits, die aufwendig gekühlt werden müssen, damit sie beim Unterschreiten einer bestimmten Temperatur (die nur knapp über dem absoluten Nullpunkt von minus 273,15 Grad Celsius liegen muss) keinen elektrischen Widerstand mehr aufweisen. Abb. 5 zeigt die umfangreiche Peripherie des neuen Quantencomputers von Google, der den 72 Qubits starken Quantenprozessor Bristlecone enthält.

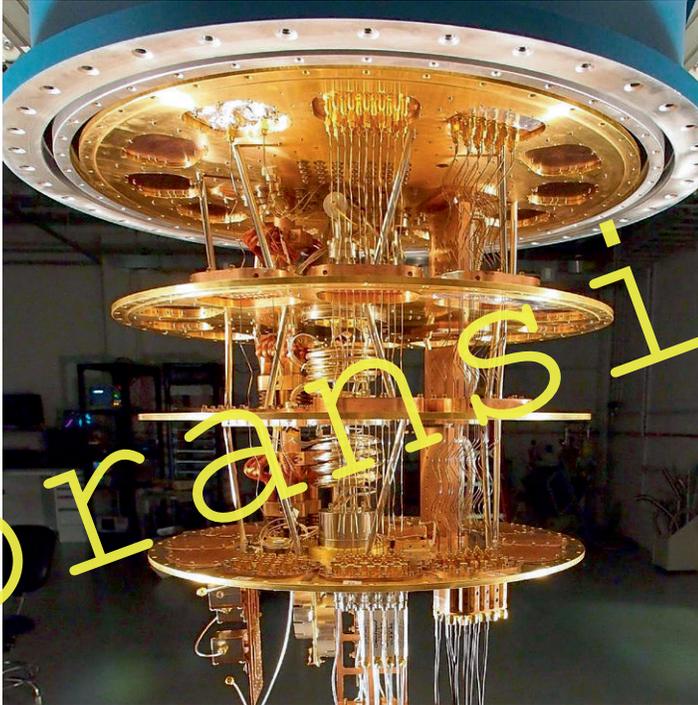


Abb. 5: Quantencomputer von Google,

© Daimler Benz AG

Erschwerend kommt bei der Herstellung dieser Art von Quantencomputern hinzu, dass sich die supraleitenden Qubits aufgrund der Ungenauigkeiten bei der extrem schwierigen Fertigung nie völlig identisch verhalten. Werden die Leiterschleifen dicht zusammen angeordnet, lassen sie sich nur schwer individuell ansteuern, was die Präzision logischer Operationen limitiert.

Dabei wurde deren Bewegung so „eingefroren“, dass ihre vormals schnellen Bewegungen auf einen Raumbereich eingeschränkt werden konnten, der kleiner als die Wellenlänge der das Ion anregenden Laser-Strahlung ist.

Als Folge davon streut ein einzelnes gespeichertes Ion so viele Photonen, dass sich die Fluoreszenz sogar mit dem Auge beobachten lässt. Die Experimente von damals bilden die Grundlagen für die heutigen Experimente mit einzelnen Atomen und deren Manipulation mit Laserlicht.

In der physikalischen Praxis haben sich sogenannte lineare Paulfallen etabliert, die in den unterschiedlichsten Bauformen ihre Anwendung finden – eine davon zeigt schematisch und nicht maßstabsgetreu Abb. 7.

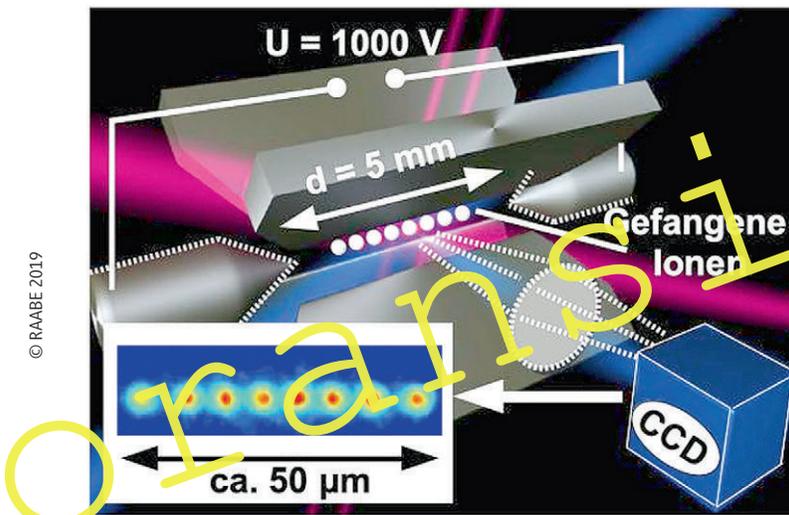


Abb. 7: Lineare Paulfalle;

Grafik: Wolfgang Vogg auf Basis von Thomas Strohm/Universität Innsbruck

M5 Welche Probleme machen den Bau von Quantencomputern so schwierig?

Es sind zwar schon Systeme aus wenigen Qubits in Laborexperimenten für einfache Algorithmen eingesetzt worden, doch hindern noch verschiedene größere Probleme die Wissenschaftler daran, einen anwendbaren Quantencomputer zu bauen:

- Soll ein Qubit einen Überlagerungszustand einnehmen, müssen oft entsprechende Quantenbauelemente nahezu auf den absoluten Nullpunkt (-273 °C) heruntergekühlt werden, um ungewollte Zustände zu vermeiden.
- Die Qubits müssen von jeder Art Strahlung als Störfaktor abgeschottet werden. Dazu gehören auch Wärmestrahlung oder die Mikrowellenstrahlen von Mobiltelefonen. Andernfalls besteht ständig die Gefahr, dass der Superpositionszustand bei den Qubits zusammenbricht.
- Sobald man ein Qubit misst, ändert es seinen Superpositionswert in eine 1 oder 0, was die Vorteile der Superposition aufhebt. Will man einen Quantencomputer manipulieren, müssen indirekte Messungen durchführbar sein, die ein Qubit nicht „registriert“.
- Quantenlogische Operationen sind noch nicht perfekt genug, da selbst durch sehr kleine Fehler nach einer Folge von Rechenoperationen das Endergebnis fehlerhaft ist. Obwohl heute schon Genauigkeiten von über 99 % möglich sind, muss das Ziel sein, diese auf 99,99 % zu erhöhen.
- Heute ist es noch nicht möglich, einen skalierbaren, also auf viele Qubits erweiterbaren Quantenprozessor zu realisieren. Es sind je nach Aufgabe und Algorithmus zwischen 40 und 1.000 Qubits nötig – derzeit arbeiten aktuelle Experimente noch mit wenigen Qubits.

Das erste und wichtigste Ziel für die Forscher wird sein, Qubits zu kreieren, die so reagieren, wie sie es wünschen. Daran arbeiten zurzeit viele Wissenschaftler; sie erproben die unterschiedlichsten Materialien und Methoden, um aus Molekülen, Atomen, Elektronen und Photonen Qubits herzustellen, die leicht manipuliert werden können.

Zudem muss mit Nachdruck versucht werden, die Zahl der in den Experimenten verwendeten Qubits laufend zu erhöhen. Eine heute mögliche Verwendung von 12 Qubits in einem Experiment ist zu gering, um mit heutigen Computern zu konkurrieren, die mit Milliarden von Transistoren arbeiten. Es wird auch nötig sein, dass sich Wissenschaftler, Ingenieure und Hersteller darauf einigen, welche Art von Qubits am besten dafür geeignet ist, die Zukunft des Quantencomputers in absehbarer Zeit voranzutreiben. Der Quantencomputer ist dem klassischen nicht immer überlegen, sondern zieht manchmal mit ihm gleich. Das Einsatzgebiet bzw. die Art des Problems ist entscheidend.