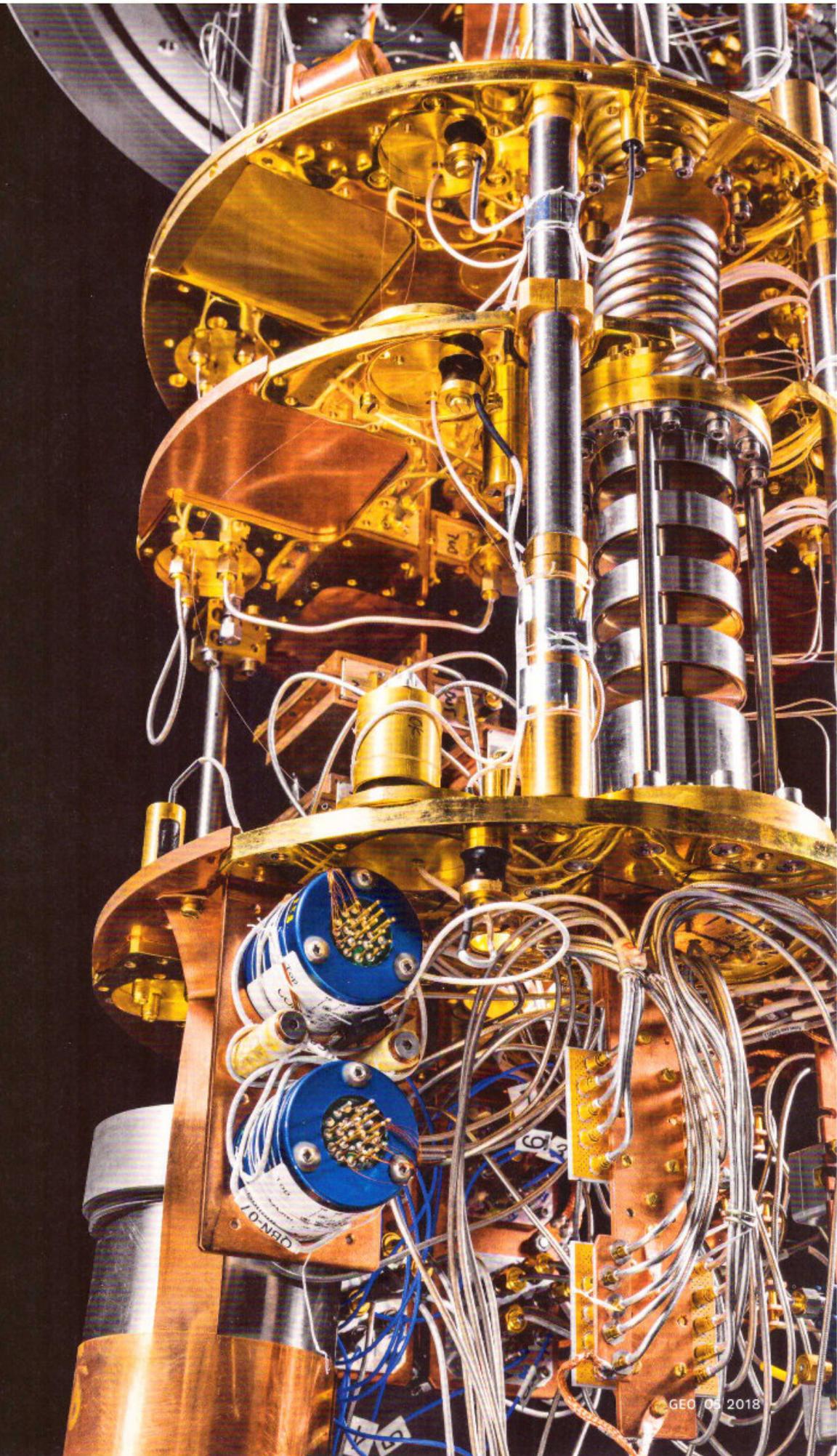


Blick  
unter die  
Haube:

Das Gros der  
Bauteile  
eines Quanten-  
computers – hier  
der von IBM –  
dient der Kühlung  
auf Temperaturen  
knapp über  
dem absoluten  
Nullpunkt





PHYSIK

# Dieser Apparat könnte bald Ihr Bankkonto knacken

Noch stecken Quantencomputer in den Anfängen: Sie bewältigen nur einfache Aufgaben und machen viele Fehler. In naher Zukunft aber dürften sie herkömmliche Elektronenhirne überflügeln und derzeit noch unlösbare Probleme knacken – aber auch bisherige Sicherheitssysteme. Versuch, eine vertrackte Technologie zu verstehen

*Text: Wolfgang Richter*

# P

PHYSIKER NEHMEN ANLAUF zu einem Quantensprung. In den Labors von Digitalriesen wie IBM, Google und Intel, von Universitäten und Start-up-Firmen tüfteln sie an einem Computer, der fundamental anders funktioniert als die Rechner in unseren Smartphones und Laptops. Sie bauen an einer Rechenmaschine, die auf den bizarren Gesetzen der Quantenmechanik beruht.

Einer Maschine, die Aufgaben lösen soll, an denen selbst die schnellsten Supercomputer herkömmlicher Bauart scheitern oder eine halbe Ewigkeit lang rechnen würden. Einer Maschine, von der das Nobelpreiskomitee 2012, als es Forscher für Vorarbeiten auszeichnete, sagte: Sie werde „vielleicht unser tägliches Leben in diesem Jahrhundert genauso radikal verändern, wie es der klassische Computer im vergangenen Jahrhundert getan hat“.

In jüngster Zeit hat sich die Quantentechnik dermaßen stürmisch weiterentwickelt, dass Experten für 2018 auf entscheidende Durchbrüche hoffen.

Die Erwartungen an die neue Technik sind hoch: In riesigen Datenmengen soll sie leichter Muster erkennen können – Voraussetzung für maschinelles Lernen und ein weiterer Schritt in Richtung Künstliche Intelligenz. In der Chemie soll sie das Verhalten von Molekülen mit ungekannter Präzision berechnen und so die Entwicklung von Medikamenten beschleunigen. In der Logistik könnte sie das „Problem des Handlungsreisenden“ besser bewältigen, also die optimale Tour für den Besuch vieler Stationen zusammenstellen – und somit Zeit und Treibstoff sparen.

Hinzu kommt aber eine heikle Aussicht: Die Wundermaschine könnte den digitalen Sicherheitsschlüssel knacken, mit dem wir Bestellungen, Kreditkartenzahlungen und Banküberweisungen

per Internet abwickeln. Denn die RSA-Verschlüsselung, die das bequeme und sichere Erledigen derartiger Geschäfte ermöglicht, basiert auf der Zerlegung großer Zahlen in ihre Primfaktoren – eine Aufgabe, an der klassische Rechner scheitern, die ein Quantencomputer aber sekundenschnell lösen könnte.

## Wie verhalten sich Quantenteilchen?

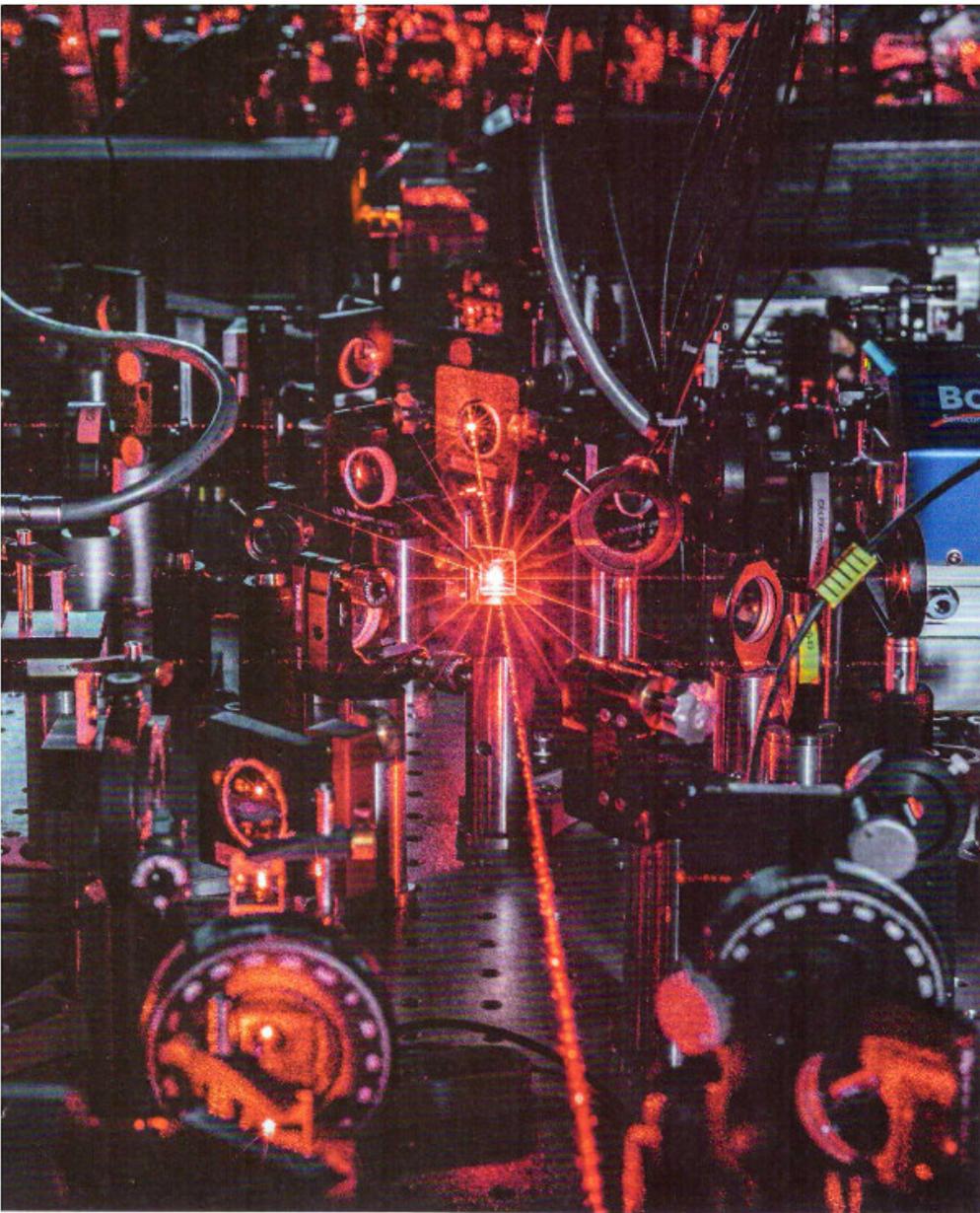
Das Forschungsfeld, aus dem der neuartige Rechner erwächst, betreten die Physiker erstmals vor über 100 Jahren.

**Der Ionenfänger:** Der Innsbrucker Physiker Rainer Blatt speichert und verarbeitet seit rund 25 Jahren Informationen mit Quanten. Er ist sich sicher, dass es prinzipiell möglich ist, mit ihnen einen superschnellen Rechner zu bauen. Es sei nur eine Frage der Zeit, die technischen Hürden zu überwinden

Damals erkannte Max Planck, dass Atome sich nur auf festen Energiestufen befinden können. Materie und Strahlung können daher Energie nur in bestimmten diskreten Portionen austauschen: den Quanten. Es ist, als ob an einem Verstärker die Lautstärke nicht stufenlos einstellbar wäre, sondern der Regler immer nur bei bestimmten Werten einrasten würde.

Immer tiefer sind Wissenschaftler in dieses merkwürdige Reich der Quanten vorgedrungen und haben an Elektronen und Lichtteilchen Phänomene entdeckt, die wie Zauberei wirken.





Werkzeuge aus Licht: Mit einem roten Laserstrahl können die Innsbrucker Physiker in einem elektrischen Feld gefangene Calcium-Ionen – aus ihnen besteht die Recheneinheit »Quantenbit« – ansteuern und manipulieren. Das Laserlicht wird mit einem Gewirr von Spiegeln und Linsen feinjustiert

Das eigentümliche Verhalten von Quantenobjekten ist für den gesunden Menschenverstand eine Herausforderung – und eine Zumutung. „Ich denke, ich kann mit Sicherheit sagen, niemand versteht die Quantenmechanik“, sagte einmal der amerikanische Nobelpreisträger Richard Feynman, einer der einflussreichsten Physiker. Feynman war zugleich ein mitreißender Visionär. Er trug 1981 als einer der Ersten die Idee vor, mit Quanten zu rechnen.

Wer sich aufmacht, das Herz dieser neuartigen Maschine zu erkunden, be-

gibt sich auf die Reise in ein exotisches Land und an die Grenze des Begreifbaren. Denn wem ist im Alltag schon einmal das Phänomen begegnet, dass ein Objekt, sagen wir ein Apfel, gleichzeitig an mehreren Orten sein kann? Erst beim Nachsehen, wenn wir mit unseren Augen das von der Frucht kommende Licht „messen“, materialisiert sie quasi – entweder in der Schultasche oder in der Obstschale oder im Kühlschrank. So ähnlich ist das bei Elektronen, die um einen Atomkern schwirren. Niemals lässt sich präzise bestimmen,

wo sich das Partikel gerade befindet. Alles, was sich angeben lässt, sind Aufenthaltswahrscheinlichkeiten.

IN DIESER LAUNISCHEN Welt mussten Wissenschaftler Kandidaten für die grundlegende Informationseinheit ausfindig machen. Denn auch wenn der Quantencomputer ansonsten völlig anders tickt als ein herkömmlicher Rechner, in einem gleichen sich die beiden: Sie arbeiten mit dem Binärsystem, also den Grundzahlen 0 und 1. Eine Binärziffer – ein Bit (vom englischen Begriff *binary digit*) – wird im klassischen Computer durch „Strom aus“ oder „Strom an“ repräsentiert: 0 oder 1.

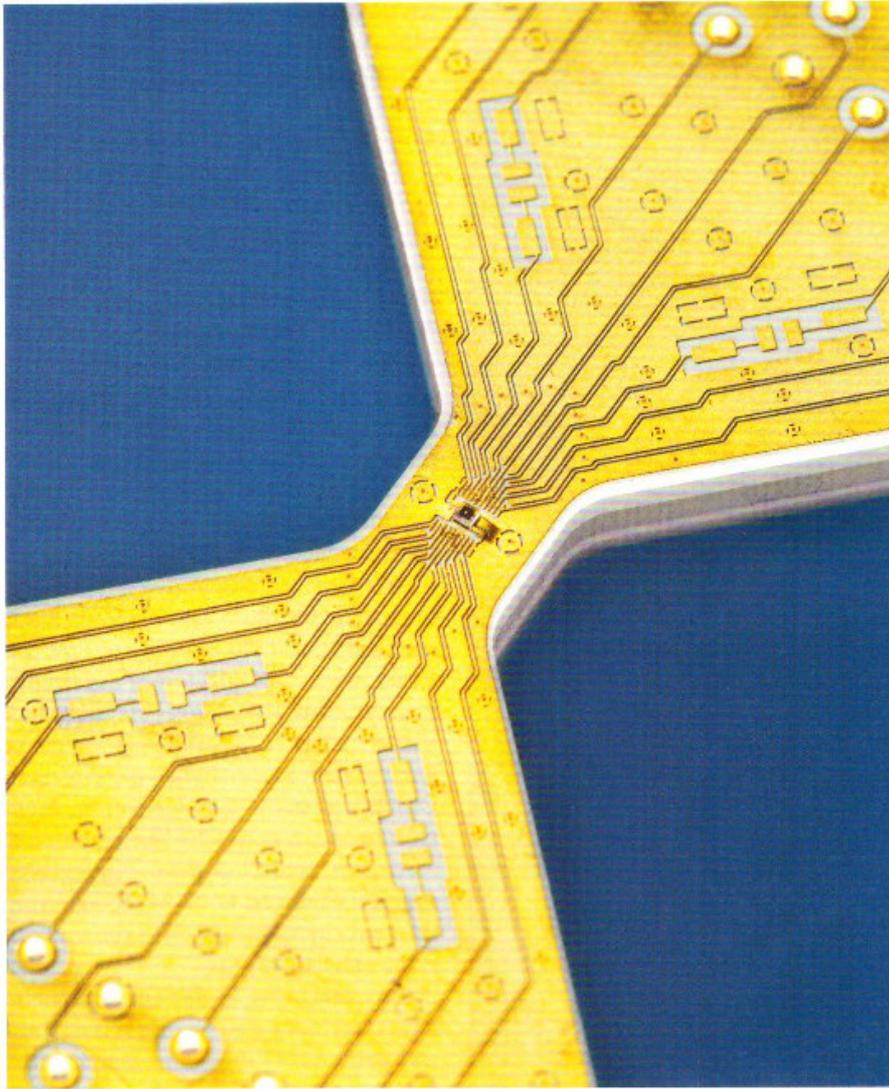
Mit dem Analogon des Bits in der Quantenwelt, dem Quantenbit, kurz Qubit, ist das nicht so einfach. Transistoren, wie sie zu Millionen auf fingernagelgroßen Mikrochips stecken und Bits verkörpern, eignen sich nicht als Qubits. Stattdessen haben die Physiker Objekte gewählt, die wie Ionen, Elektronen oder elektrische Schwingkreise zwischen zwei Energiezuständen hin- und herspringen können, als ob zum Beispiel ein Apfel zwischen reif und unreif wechseln könnte.

Das Verrückte in der Quantenwelt: Der Apfel kann gleichzeitig reif *und* unreif sein, ein Qubit kann gleichzeitig den Wert 0 *und* 1 annehmen. Die Physiker sprechen von einer Überlagerung. Erst wenn sie das Qubit fragen, also eine Messung vornehmen, antwortet es mit einem der beiden Werte: 0 *oder* 1.

### Wie sehen Quantenbits aus?

Im Keller des Innsbrucker Instituts für Quantenoptik und Quanteninformation (IQOQI) der Österreichischen Akademie der Wissenschaften haben der Physiker Rainer Blatt und sein Team in einem fensterlosen Labor ein Gewirr von Spiegeln, Linsen und Kabeln aufgebaut, zur Dämpfung von Erschütterungen auf Luftpolstern und einem 32 Tonnen schweren Betonklotz.

Die vielen optischen Elemente lenken, spreizen und bündeln rotes und blaues Laserlicht, das durch dicke Fenster in



Rechenknechte im Mikro-Gefängnis: Auf dem kleinen dunklen Quadrat im Zentrum der Platine lassen sich 16 Calcium-Ionen – 16 Qubits – einsperren. Die anderen Strukturen dienen der Steuerung. Benannt haben die Forscher ihren Chip nach der Innsbrucker Justizanstalt, sie heißt im Volksmund »Ziegelstadt«

eine handballgroße Vakuumkammer aus Edelstahl strömt. Darin sind die Nullen und Einsen des Quantencomputers gefangen. Als materielle Grundlage der Qubits hat Rainer Blatt Calcium-Ionen gewählt: Calcium-Atome, denen Elektronen fehlen. Festgehalten von elektrischen Wechselfeldern, schweben die Teilchen einen Hauch über einem Siliziumchip, aneinandergereiht wie die Perlen einer Kette.

Laserlicht kann das Calcium in zwei unterschiedliche Energiezustände versetzen, es sozusagen vom Erdgeschoss in den ersten Stock hinauf, aber auch

wieder hinunter befördern. Der eine Zustand wird dann als 1 definiert, der andere als 0.

Richtet Rainer Blatt auf seine Qubits einen Laserstrahl, der genau der Energiedifferenz zwischen dem 0- und dem 1-Niveau entspricht, wird ein Elektron von der niedrigeren auf die höhere Ebene gehoben. Dauert der Laserimpuls zehn Mikrosekunden lang, springt das Elektron zuverlässig von dem einen Stockwerk in das andere.

Blatt und seine Kollegen schalten das Licht aber nur fünf Mikrosekunden lang an. Wer nicht mit den Regeln der

Quantenmechanik vertraut ist, würde wohl sagen, dass das Elektron dann nur den halben Sprung schafft. Anders im Quantenreich: „Tatsächlich entsteht eine Überlagerung, das heißt, das Elektron befindet sich gleichzeitig in den beiden möglichen Zuständen“, erklärt Rainer Blatt. Das Qubit stellt 0 und 1 gleichzeitig dar.

**H**S IST DIESE BIZARRE Eigenart der Quanten, die das Potenzial eines Quantencomputers ins Unvorstellbare anwachsen lässt. Mit zwei Qubits lassen sich im Binärsystem vier Zahlen gleichzeitig darstellen: null (00), eins (01), zwei (10) und drei (11). In einem klassischen Computerspeicher können zwei Bits zu einem Zeitpunkt lediglich eine der vier Zahlen repräsentieren, zum Beispiel die Eins (01).

Mit jedem Qubit mehr verdoppelt sich der Zahlenraum. Bei drei Qubits könnte der Computer mit acht Zahlen ( $2^3$ ) auf einmal rechnen, bei 300 Qubits wären es  $2^{300}$ . Eine schwindelerregende Zahl – die größer ist als die Zahl der Atome im sichtbaren Universum.

Die wundersamen Fähigkeiten des Quantencomputers beruhen noch auf einer zweiten abstrusen Eigenart der submikroskopischen Welt: Verschränkung, wie Physiker sagen. Verschränkte Teilchen scheinen miteinander verbunden zu sein, selbst wenn sie weit voneinander entfernt sind. Es ist, als ob sie Botschaften austauschten – was aber nicht sein kann, da selbst Licht, das mit der kosmischen Höchstgeschwindigkeit reist, die Entfernung nicht schnell genug zurücklegt. Wird bei einem verschränkten Elektronenpaar der Drehimpuls des einen Partikels – rechts herum oder links herum – gemessen, ist augenblicklich auch der Spin des Zwillingpartners festgelegt, der sich zum Beispiel am anderen Ende der Milchstraße – 100 000 Lichtjahre entfernt – befindet. Man möchte annehmen, das habe sich ein esoterisches Gehirn ausgedacht. Es ist aber die Realität, die Quantenrealität.

Auch Albert Einstein mochte sich mit dieser „spukhaften Fernwirkung“,

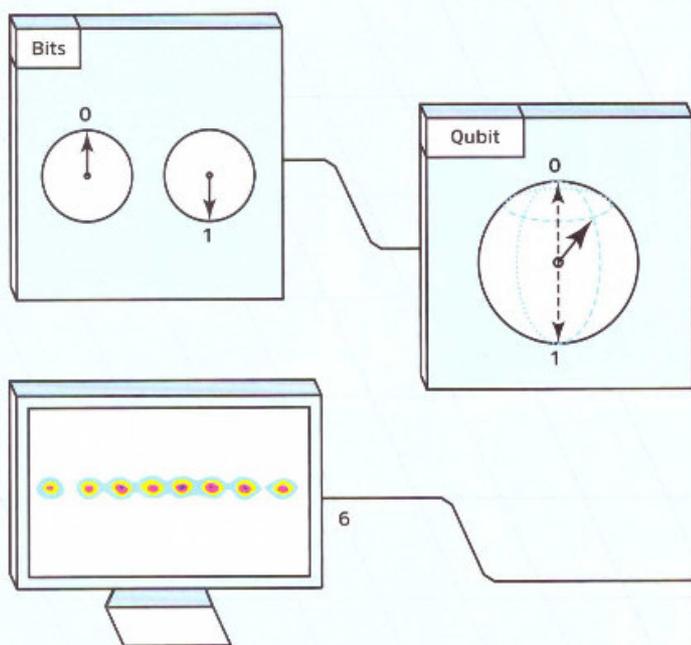


Wettkampf  
der  
Techniken:  
Neben Ionen  
testen Innsbrucker  
Forscher auch  
supraleitende  
Schaltkreise  
als Qubits. Für  
die bauen sie  
einen Kryostaten,  
einen Kühl-  
schrank, in dem  
extrem tiefe  
Temperaturen  
herrschen

## Wie sich mit Quanten rechnen lässt

Präzise beschreiben lässt sich die Funktion eines Quantencomputers nur mit Mathematik. Aber einige Grundprinzipien der neuartigen Rechenmaschine sind durchaus nachvollziehbar – und höchst bemerkenswert

Illustration: Martin Künsting

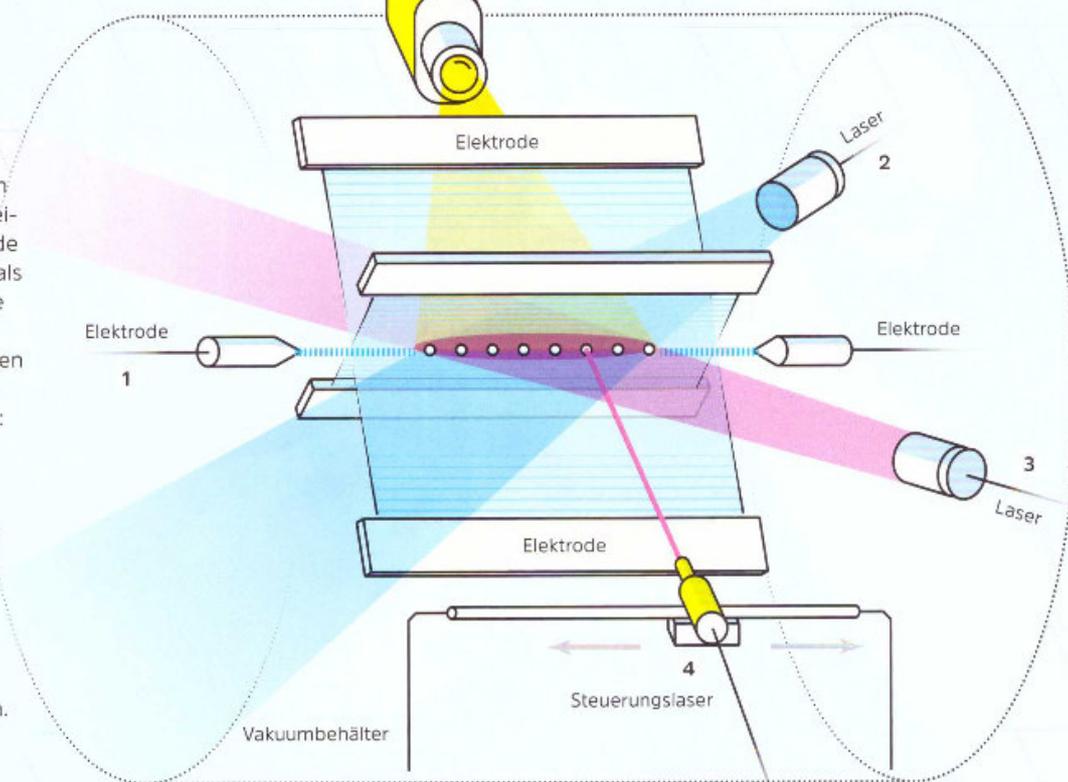


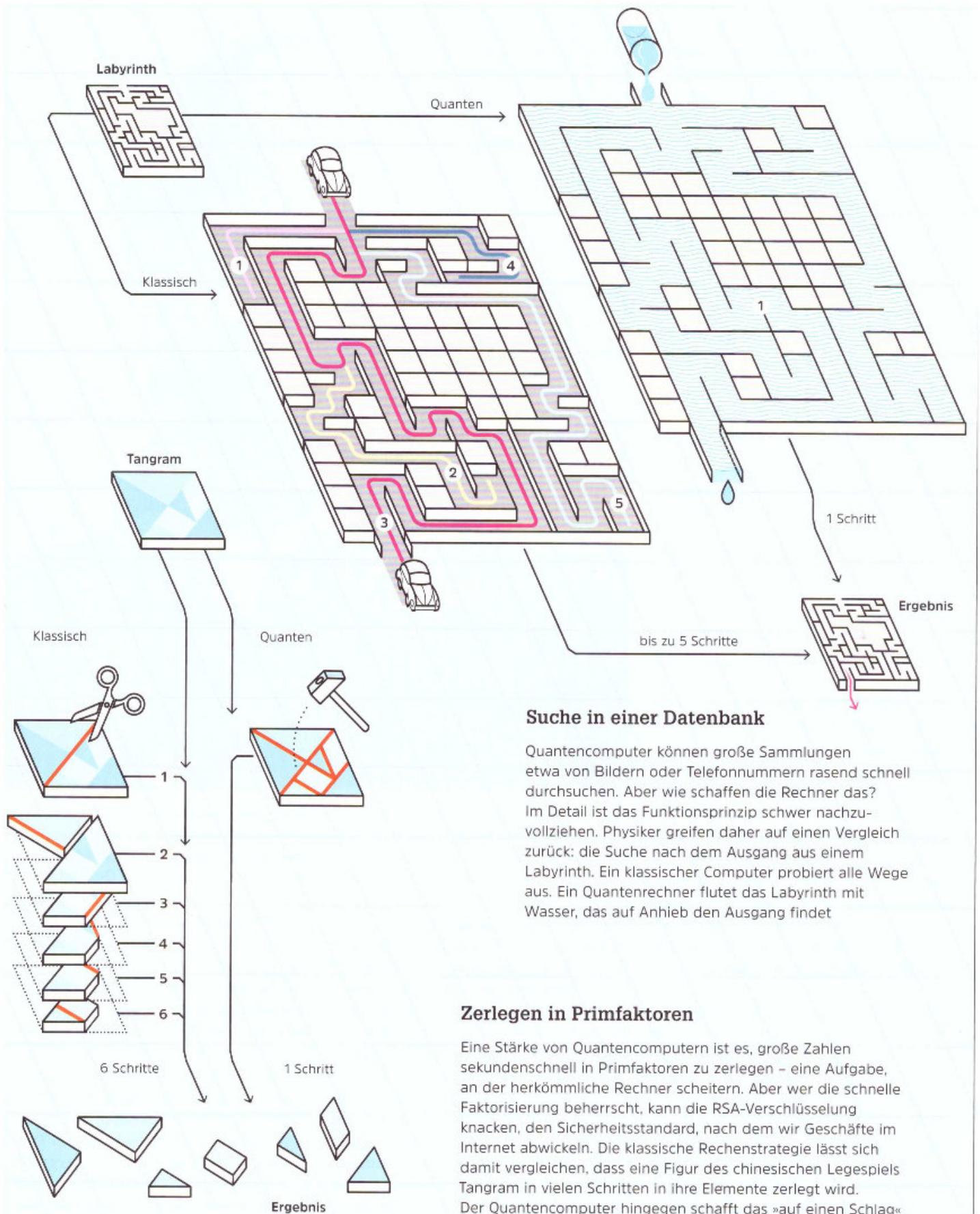
### Bits und Qubits

Klassische Computer und Quantencomputer arbeiten mit dem Binärsystem, also Nullen und Einsen. Im klassischen Computer bedeutet zum Beispiel »Strom an« eine 1, »Strom aus« eine 0. Beim Quantenbit (Qubit) können sich die beiden Zustände überlagern. Physiker stellen das als Pfeil in der sogenannten Bloch-Kugel dar: Das Qubit ist eine Mischung aus 0 und 1, mit unterschiedlichen Anteilen. Erst wenn Forscher fragen »Welchen Wert hast du?«, antwortet es eindeutig mit 0 oder 1

### Ein Gefängnis für Ionen

So könnte das Herz eines Quantencomputers aussehen: Als Qubits eignen sich Teilchen oder Schaltkreise, die gleichzeitig zwei verschiedene Zustände annehmen können, die dann als 0 und 1 definiert werden. Eine Qubit-Variante sind Calcium-Ionen, Atome, denen Elektronen entrissen wurden. Sie lassen sich in einer »Falle« festhalten: Elektroden (1) bauen ein elektrisches Feld auf, das die Partikel in der Schwebe hält. Blaues Laserlicht (2) kühlt die Ionen und dient dazu, ihren Zustand auszulesen. Mit dem roten Laser (3) können die Physiker alle Ionen, mit dem feinen Steuerungslaser (4) individuelle Ionen ansprechen. Per Kamera (5) nehmen sie ein Bild der Teilchen auf (6)





### Suche in einer Datenbank

Quantencomputer können große Sammlungen etwa von Bildern oder Telefonnummern rasend schnell durchsuchen. Aber wie schaffen die Rechner das? Im Detail ist das Funktionsprinzip schwer nachzuvollziehen. Physiker greifen daher auf einen Vergleich zurück: die Suche nach dem Ausgang aus einem Labyrinth. Ein klassischer Computer probiert alle Wege aus. Ein Quantenrechner flutet das Labyrinth mit Wasser, das auf Antrieb den Ausgang findet

### Zerlegen in Primfaktoren

Eine Stärke von Quantencomputern ist es, große Zahlen sekundenschnell in Primfaktoren zu zerlegen – eine Aufgabe, an der herkömmliche Rechner scheitern. Aber wer die schnelle Faktorisierung beherrscht, kann die RSA-Verschlüsselung knacken, den Sicherheitsstandard, nach dem wir Geschäfte im Internet abwickeln. Die klassische Rechenstrategie lässt sich damit vergleichen, dass eine Figur des chinesischen Legespiels Tangram in vielen Schritten in ihre Elemente zerlegt wird. Der Quantencomputer hingegen schafft das »auf einen Schlag«

wie er es nannte, nicht abfinden. Sein Leben lang suchte er nach einer anderen Erklärung für das bizarre Phänomen.

Wie ein Turbolader steigert die Verschränkung die Effizienz des Quantencomputers: Unterziehen Forscher ein Qubit einer logischen Operation, schalten sie etwa seinen Wert um, wirkt sich das automatisch und augenblicklich auf alle anderen mit ihm verschränkten Qubits aus. In Kombination mit der Überlagerung vermag die Quantenmaschine somit viele Operationen gleichzeitig auszuführen, die ein klassischer Rechner nacheinander erledigen muss.

### Wie dirigiert man ein Quanten-Orchester?

Mit Qubits zu jonglieren ist äußerst anspruchsvoll. Denn Qubits sind „Sensibelchen“. Sie müssen von der Umwelt isoliert werden. Die Forscher stecken sie daher in ein Vakuum. Und sie kühlen sie auf Werte nahe dem absoluten Nullpunkt bei minus 273 Grad Celsius. „Ganz wichtig“, sagt Rainer Blatt, „ist die Zeitspanne, in der die Überlagerungs- und Verschränkungszustände erhalten bleiben.“ Das gelingt mitunter nur für Millisekunden. Jegliche Störung von außen wirkt wie eine Messung. „Dann fallen die Zustände wie ein Soufflé in sich zusammen.“ Das war’s dann mit der Rechnung.

Überlagerung und Verschränkung sind die merkwürdigen Prinzipien, die der neuen Maschine ihre Superkräfte verleihen. Doch wie wird daraus ein Rechner? Schon 30 Qubits können eine Milliarde Zahlenwerte gleichzeitig darstellen und damit rechnen. Und irgendwo in diesem Wust steckt das Ergebnis. Wie lässt sich dieses herausfiltern?

FÜR LAIEN bleibt das im Detail ein Rätsel. Die Lösung verbirgt sich hinter einem höchst abstrakten Formalismus, hinter Wellenfunktionen von Quantenzuständen und Wahrscheinlichkeiten. Komplexe Mathematik ist die einzige Sprache, mit der die quantenmechanischen Vorgänge genau zu beschreiben sind.

Um eine Vorstellung zu vermitteln, was da passiert, nutzen Fachleute gern



Der Schaltkreisbändiger: Leo DiCarlo, Physiker, stammt aus Argentinien. Er setzt auf supraleitende Schaltkreise als Bausteine eines Quantencomputers. Für seine Forschung in Delft hat er sich mit dem Digitalriesen Intel verbündet. Der präsentierte vor Kurzem einen Prototyp mit 49 Quantenbits

das Bild eines Orchesters. Dieser Vergleich greift zurück auf eine weitere Verrücktheit der Quantenwelt: Licht, Elektronen und also auch Qubits verhalten sich nicht nur wie Partikel, sondern zeigen auch Eigenschaften von Wellen und lassen sich so beschreiben. Elektronen etwa treten in Kathodenstrahlröhren, wie sie in Röhrenfernsehgeräten stecken, als freie Teilchen auf. Durchfliegen sie aber einen Doppelspalt – eine Blende mit zwei schmalen Schlitzen –, zeichnet sich auf einem Detektor ein Muster ab, das typisch ist für die Überlagerung von Wellen.

Mittels Wellen – Schallwellen – breitet sich auch der Klang eines Orchesters aus. Die Schallwellen von Geigen, Pauken, Posaunen überlagern sich. Treffen Wellenberge aufeinander, verstärken sie sich. Trifft Wellenberg auf Wellental, eliminieren sie einander. Es entstehen sogenannte Interferenzmuster (wer ein solches erzeugen will, werfe einfach zwei Steine in einen Teich).

Wenn alle Orchestermusiker im Takt spielen, keiner sich im Ton vergreift, kein Instrument lautstark nach vorn drängt, kommt beim Zuhörer ein harmonisches Ganzes an. „Die Kunst beim

Quantencomputer ist es“, sagt Rainer Blatt, „die Überlagerungen der Qubits so zu beeinflussen, zu manipulieren, dass Interferenzmuster entstehen, deren Aussehen das Resultat enthält.“

Um das Ergebnis heraushören zu können, also für die Messung der Quantenzustände, bedarf es dann wieder eines herkömmlichen Computers. Ein Quantenhirn braucht also stets einen klassischen Assistenten an seiner Seite.

Das Quantenorchester zu dirigieren ist deshalb so schwierig, weil es so empfindlich gegen Umwelteinwirkungen ist, als seien die Musiker allesamt zickige

Diven. Ein Riesenerfolg war es daher, als Rainer Blatts Team 2015 mit sieben Qubits die Zahl 15 in die Primfaktoren 3 und 5 zerlegen konnte. Eine Aufgabe, die auch Grundschüler bewältigen.

Inzwischen gelingt den Innsbrucker Forschern die Kontrolle von 20 Ionen – das ist Weltrekord.

### Wer gewinnt den Wettlauf zur Wundermaschine?

Für die Zukunft ist Rainer Blatt optimistisch. Die Ergebnisse der vergangenen Jahre zeigten, „dass es wohl keinen

physikalischen Grund gibt, der die Realisierung eines großen quantenmechanischen Rechners unmöglich macht“. Es seien lediglich technische Hürden, die dem im Weg stünden, und es sei nur eine Frage der Zeit, dass auch die überwunden würden.

Gegenwärtig sieht Blatt die neue Technik allerdings „auf dem Niveau eines Röhrencomputers aus den 1940er Jahren. Wir brauchen noch die Entwicklung von Technologien vergleichbar dem Transistor und dem integrierten Schaltkreis.“

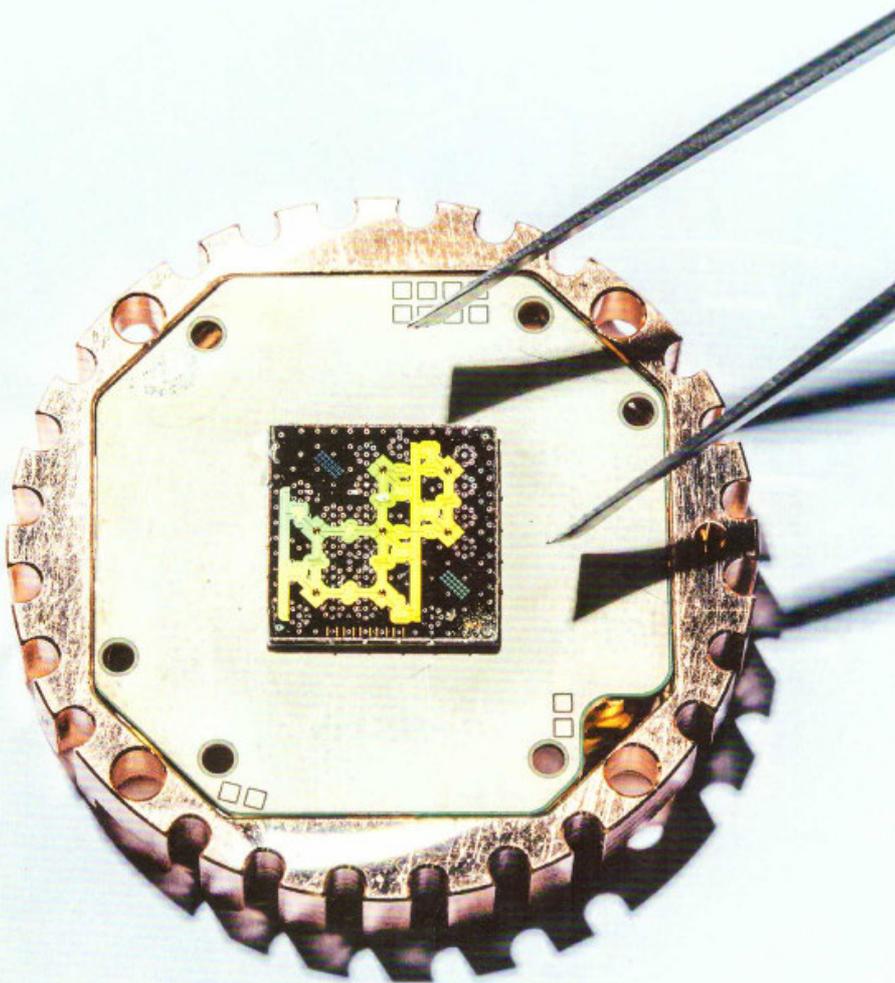
Ein früher Prototyp: Bei diesem Chip mit sieben Qubits war es am QuTech Institute in Delft gelungen, die Ein- und Ausgänge für elektrische Signale vertikal anzulegen. Das sparte Platz und ermöglichte es, mehr Qubits unterzubringen. Möglichst viele Qubits sind die Voraussetzung für einen ausgewachsenen Quantencomputer

**A**BER ES GEHT mit großen Schritten voran, angetrieben durch die Ambitionen der Mitspieler auf dem Digitalfeld. Google, IBM, Intel, Microsoft, sie alle haben Mannschaften in das Rennen geschickt, investieren viele Millionen Dollar. Sie konkurrieren mit Universitäten und Start-ups. Allein der kalifornische Newcomer Rigetti trieb 70 Millionen US-Dollar an Kapital auf. Die Europäische Kommission hat Mittel in Höhe von einer Milliarde Euro ab 2018 für die Erforschung der Quantentechnologie bewilligt. Wer den Wettlauf gewinnen wird, ist offen.

Offen ist auch, welche Quantenbits sich durchsetzen werden. Ob es die Ionen sind, auf die Rainer Blatt, ein Grandseigneur der Quanteninformatik, setzt, oder die Schaltkreise, an denen Wissenschaftler am QuTech Institute im niederländischen Delft arbeiten.

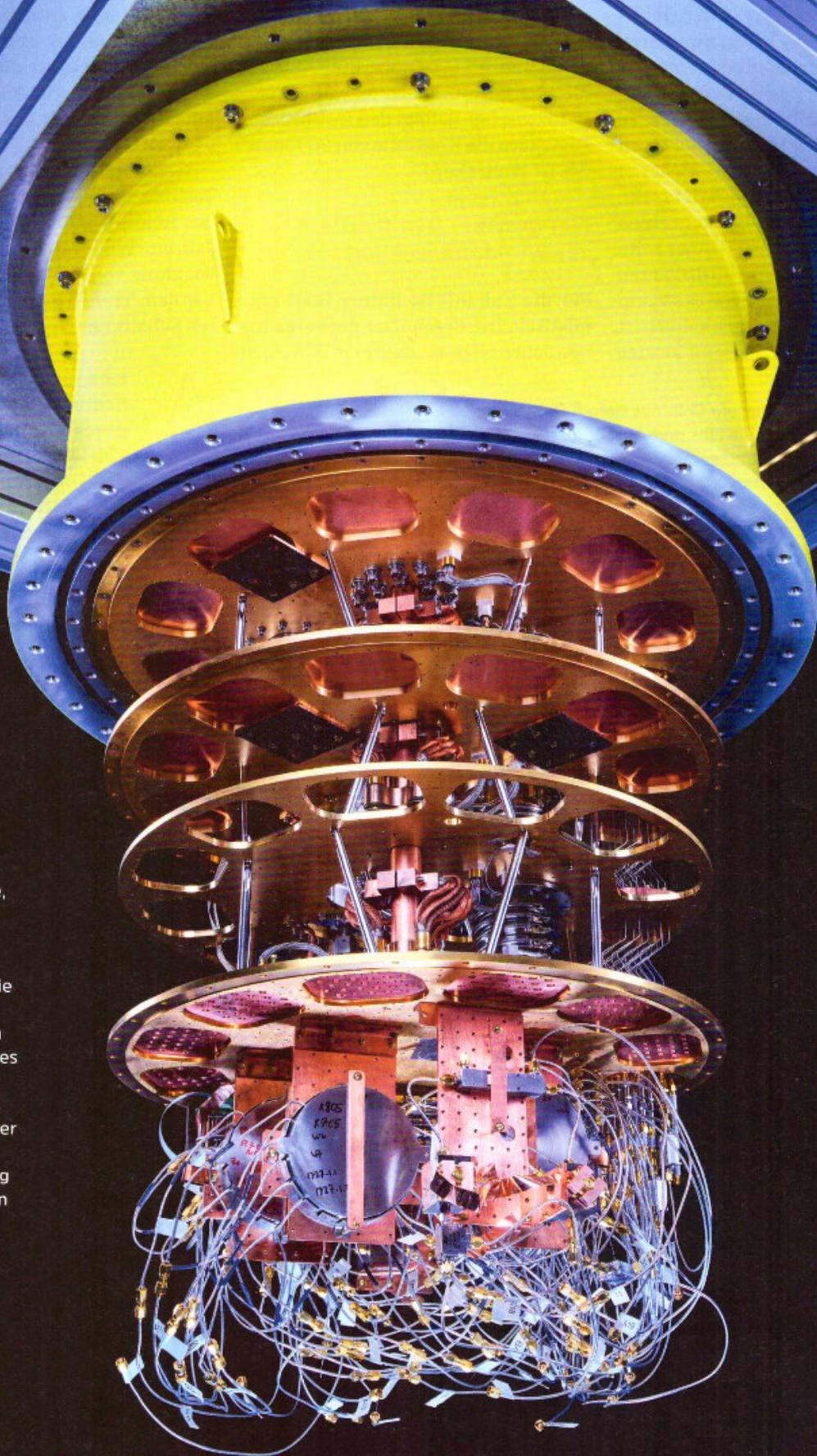
Leo DiCarlo, geboren in Argentinien und über die USA in die Niederlande gelangt, nennt die Schaltkreise, in denen sich elektromagnetische Schwingungen anregen lassen, gern „künstliche Atome“. „Ihr Vorteil ist“, sagt er, „dass wir sie nach unseren Wünschen verändern können.“ Wie die Calcium-Ionen Rainer Blatts können DiCarlos „Atome“ verschiedene Energieniveaus einnehmen, die als 0 und 1 fungieren. Gesteuert und ausgelesen werden die Schaltkreise mithilfe von Mikrowellen.

Vor gerade vier Jahren gegründet, hat sich das Delfter Zentrum eine aussichtsreiche Position im Rennen hin zum Quantencomputer erkämpft. Den



Rückgriff  
auf  
Bewährtes:

Die Schaltkreise, die Google als Qubits nutzt, entstehen auf Siliziumchips (sie stecken in dem Kabelgewirr am unteren Ende des Apparats). Das hat den Vorteil, dass die Forscher die Technik zu ihrer Herstellung gut beherrschen



Wissenschaftlern ist es gelungen, eine Forschungsk Kooperation mit gleich zwei Weltkonzernen einzugehen: mit Intel und mit Microsoft.

Im Großraumbüro von Leo DiCarlo, 41, reiht sich ein Regal voller Elektronik an das andere. Die mit Punktstrahlern effektiv ausgeleuchtete Fläche wird von Glaswänden unterteilt, die Wissenschaftler von oben bis unten mit Formeln gefüllt haben. An einer Trennwand hängt die Konstruktionszeichnung von DiCarlos 17-Qubit-Schaltkreis. Mit ihrem Konzept stehen DiCarlo und Kollegen mächtig unter Druck.

**P**OTENTE KONKURRENTEN setzen auf das gleiche Prinzip. John Martinis, einer der Großen im Feld – Google hat ihn von der University of California zu sich gelockt –, testet gerade einen Prototyp mit 72 Qubits dieser Art.

Eigentlich wollte das Unternehmen bis Ende 2017 als Erstes die Schwelle von 49 Qubits erreichen. Daraus wurde nichts. Diesen Erfolg schrieb sich IBM gut. Im November 2017 verkündete die Firma den erfolgreichen Test eines Prototyps mit 50 Qubits. Seit Dezember 2017 stellt IBM einem Netzwerk aus Unternehmen wie Daimler und Samsung und Forschungslaboratorien etwa an der Universität Oxford einen Rechner mit 20 supraleitenden Schleifen zur Verfügung. Sie sollen die Entwicklung kommerzieller Anwendungen der neuen Technik vorantreiben.

### Wie lässt sich die Rechenschwäche des Quantencomputers beheben?

Alle Konkurrenten kämpfen derzeit vor allem mit einer Schwäche des Quantencomputers: seiner Fehleranfälligkeit. Nimmt nämlich die Anzahl der Qubits zu, wird es immer schwieriger, sie in dem heiklen Verschränkungszustand zu halten. Die Quanteninformatiker setzen dabei auf eine Lösung, die erst einmal paradox erscheint: Sie verwenden noch mehr Qubits.

In einem klassischen Computer werden die Bits kontinuierlich kopiert und

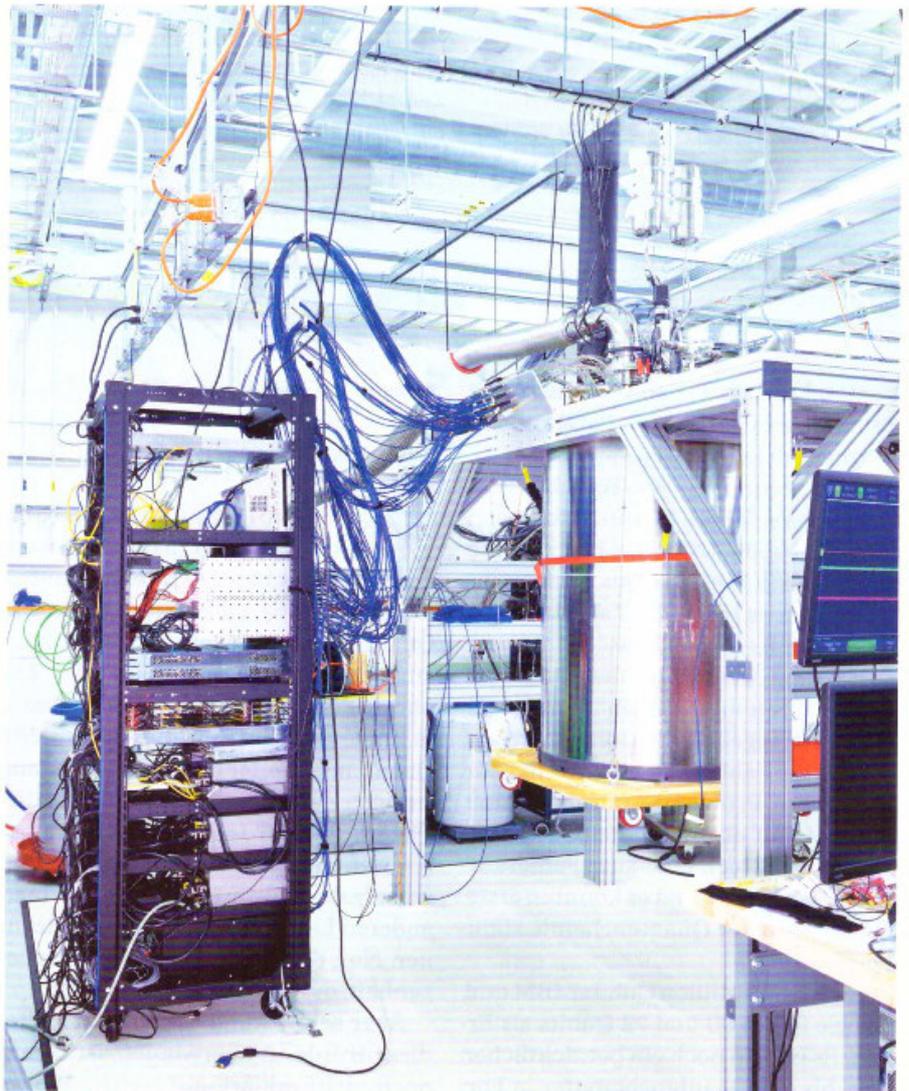
Rechenschritte zur Sicherheit mehrmals durchgeführt. Das Ergebnis, das in der Mehrzahl der Fälle entsteht, wird dann als richtig angenommen. Diese Art der Fehlerkontrolle ist in einem Quantencomputer nicht möglich. Denn jeder Kopierer misst erst einmal das, was er dann reproduziert. Eine Messung bedeutet aber einen Eingriff und zerstört die Überlagerung der Qubits. Der Quantenvorteil wäre verloren.

Die Forscher haben sich daher eine andere Strategie überlegt. „Wir können eine Gruppe Qubits nach einer gemeinsamen Eigenschaft fragen, zum Beispiel

ob sich eine gerade Anzahl von ihnen im Zustand 0 befindet“, sagt DiCarlo. Das funktioniert, ohne ihren Überlagerungszustand zu zerstören. Die Wissenschaftler präparieren mehrere Qubits so, dass ihre Überlagerungszustände alle gleich sind und sie eine Einheit, ein „logisches Qubit“ bilden. Jede Manipulation durch den Algorithmus sollte sich nun auf jedes einzelne Teil-Qubit identisch auswirken.

Nach einigen Rechenschritten fragen die Physiker erneut: Seid ihr alle noch gleich? Wenn sich die elementaren Qubits nicht mehr im gleichen

Glänzende Tonnen statt grauer Kästen: Quantencomputer sehen derzeit in fast allen Labors so aus wie bei Google – sie sind rund und hängen in Metallgestellen. Google hegt große Ambitionen; das Unternehmen will noch 2018 die Überlegenheit der neuen Maschinen gegenüber klassischen Rechnern beweisen



## Der Streit um den D-Wave-Rechner

Ein Teilnehmer sieht sich im Wettlauf zum Computer der Zukunft bereits am Ziel: Das kanadische Unternehmen D-Wave Systems behauptet, „weltweit erster kommerzieller Anbieter eines Quantencomputers“ zu sein. Die Firma brüstet sich damit, ihr Apparat bewältige mit 2000 Qubits Aufgaben, die für klassische Rechner zu komplex seien.

„Da werden Erwartungen geweckt, die sich nicht erfüllen lassen. Das ist kontraproduktiv“, warnt der Innsbrucker Physiker Rainer Blatt. Kritiker stellen infrage, ob es sich beim D-Wave-Computer überhaupt um einen „echten“ Quantenrechner handelt.

Als **Qubits** fungieren beim D-Wave **supraleitende Ringe**, in denen der Strom in einer Überlagerung links- und rechtsherum fließt. Die Ringe sind so verknüpft, dass sie sich besonders für Optimierungsaufgaben eignen: Finde den kürzesten Weg, der 50 Adressen verbindet; bestimme die optimale Mischung eines Anlageportfolios.

D-Wave Systems nutzt das natürliche Bestreben physikalischer Systeme, den **Zustand geringster Energie** einzunehmen. Kugeln rollen den Berg hinunter ins Tal, ein Pendel kommt am tiefsten Punkt zum Halt.

Experten vergleichen das Verfahren des Rechners mit dem Tempern von Metallen. Dabei wird ein Stück Metall erhitzt und dann langsam abgekühlt. Die Atome finden dadurch Zeit, sich zu einer Struktur mit geringer innerer Energie zu ordnen. Beim **Quanten-Tempern** gelangen die Qubits durch behutsames Manipulieren in das Energieminimum. In den Einsen und Nullen der Qubits steckt dann die Lösung des Problems.

Trotz der Debatte fand D-Wave Systems Kunden, die für Millionen Dollar Rechner kauften, um damit zu experimentieren – darunter Google, die NASA und das Rüstungsunternehmen Lockheed Martin.

Zustand befinden, dann bedeutet das: Fehler. Dann gilt es, den Patzer, wenn möglich, zu korrigieren.

Auch wenn mehrere Forschungslabors das Verfahren bereits erfolgreich getestet haben, trübt das Problem die Erfolgsaussichten des Quantencomputers. Denn es treibt die Zahl der benötigten Qubits in die Höhe.

Hartmut Neven, Chef des „Quantum Artificial Intelligence Lab“ von Google und Auftraggeber von John Martinis, schätzt die Zahl der Qubits, die man für eine echte Problemlösungsmaschine braucht, auf etwa eine halbe Million: „Damit ließe sich eine gute Fehlerkorrektur betreiben, und es könnten erste Vorgänge in der Quantenchemie simuliert werden.“

Eine halbe Million Qubits? IBM und Google feiern 50 und 72 Qubits als Erfolg. Es ist also noch ein beträchtlicher Weg, bis uns Quantencomputer in For-

schung und Entwicklung, bei Künstlicher Intelligenz und dem Bändigen großer Datenmengen helfen werden.

**Z**UMINDEST FÜR den Erkenntnisfortschritt in der Physik sei ein echter Quantencomputer wichtig, meint Scott Aaronson, Quanteninformatiker von der Universität Texas in Austin. Denn aller Euphorie zum Trotz ist eine fundamentale Frage noch immer offen: Kann der Quantencomputer tatsächlich mit dem riesigen Zahlenraum rechnen, wie die Theorie besagt? In der Tat spricht vieles, wenn nicht alles dafür, dass er diese Aufgabe meistern kann und in einer anderen Liga spielt als klassische Rechner. Nur, der Nachweis dieser Überlegenheit, er fehlt bislang.

Aber selbst wenn es gelingen sollte, diese Hürde zu überwinden, ist damit noch nicht erklärt, auf welche Weise

genau die Überlegenheit eines Quantencomputers zustande käme. David Deutsch von der Universität Oxford, einer der Väter der Idee vom Quantenrechnen, stellt die ketzerische Frage, wie ein Quantencomputer zum Beispiel mit 1000 Qubits und dementsprechend  $2^{1000}$  verschiedenen Zuständen arbeiten kann, wenn doch die Zahl der Atome im Universum weniger als  $2^{300}$  beträgt.

### Braucht der Rechner Hilfe aus Nachbaruniversen?

David Deutsch zufolge gibt es für dieses Problem nur eine Lösung: das Viele-Welten-Modell. Der amerikanische Physiker Hugh Everett schlug es in den 1950er Jahren vor, als Erklärung für die Absonderlichkeiten der Quantenphysik. Nach dieser Theorie verzweigt sich das Universum jedes Mal, wenn ein quantenmechanischer Überlagerungszustand abgefragt wird. Wenn zum Beispiel bei einer Messung ein Elektron sich für einen seiner Spin-Zustände entscheiden muss. In dem einen Universum hat es dann einen rechten, im anderen einen linken Drehimpuls. So entstehen unendlich viele Welten, in denen alles real wird, was möglich ist.

Ein Quantencomputer gelange zu seiner magischen Rechenkraft, so behauptet David Deutsch, indem er Rechnungen in andere Universen auslagere. Es ist wenig verwunderlich, dass sich die meisten Computerexperten bislang mit dieser Idee nicht so recht anfreunden können. Auch die Teilnehmer des Wettlaufs halten sich nicht mit solch spekulativen Debatten auf. Ihr Ziel: ein Quantenrechner, der funktioniert – egal, in welchem Universum. 🌐



Für den Autor **WOLFGANG RICHTER**, obwohl Physiker, war das komplexe Thema dennoch eine Herausforderung. Der italienische Fotograf **MATTIA BALSAMINI** hat sich spezialisiert auf die Themen Porträt und Technik.