

**Spektrum**  
der Wissenschaft

**KOMPAKT**

# QUANTEN- TECHNOLOGIEN

Auf dem Weg zur Anwendung

**Quantencomputer**

Zeitalter der  
Superrechner?

**EU-Projekt**

Das Quantum-  
Flaggschiff

**Maschinelles Lernen**

Neuronale Netze als  
Quantensimulator



Mike Beckers  
E-Mail: [beckers@spektrum.de](mailto:beckers@spektrum.de)

## Liebe Leserin, lieber Leser,

glaubt man den Wissenschaftlern in den Quantenlaboren der Welt, steht uns eine technologische Revolution bevor. Die letzten Jahrzehnte haben sie daran gearbeitet, die kontraintuitiven Effekte von Objekten in der Zwischenwelt von Welle und Teilchen, in der alles mit allem verknüpft ist, zu steuern. Inzwischen halten sie die normalerweise höchst mimosenhaften Verschränkungen über atemberaubende Abstände und Zeitskalen aufrecht und übertragen mit ihnen Informationen oder verwenden sie für Berechnungen.

Nun sollen diese Erfolge das Stadium in der Fachwelt gefeierter Einzelleistungen verlassen und nützliche Arbeit in industriellem Maßstab tun. Angesichts der herrschenden Euphorie könnte man meinen, das Hochskalieren der Erkenntnisse sei jetzt nur noch eine Frage für Ingenieure. Aber wenn uns die Quantenwelt eines gelehrt hat, dann: Der Teufel steckt im Detail.

Vorsichtig optimistisch, Ihr

Erscheinungsdatum dieser Ausgabe: 23.04.2018

Folgen Sie uns:

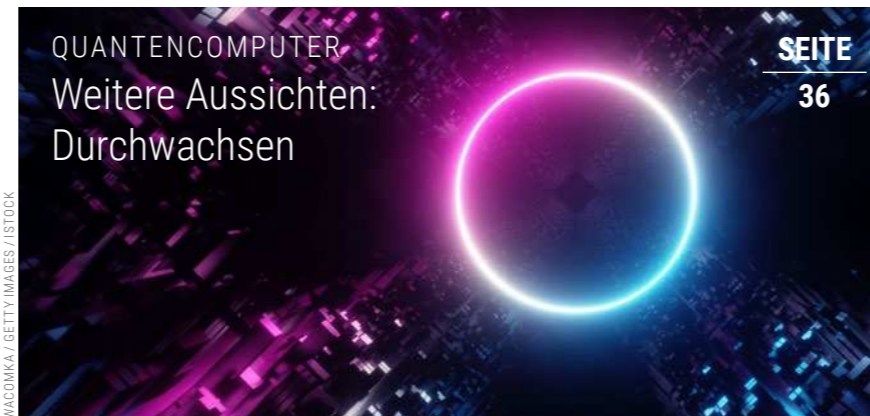
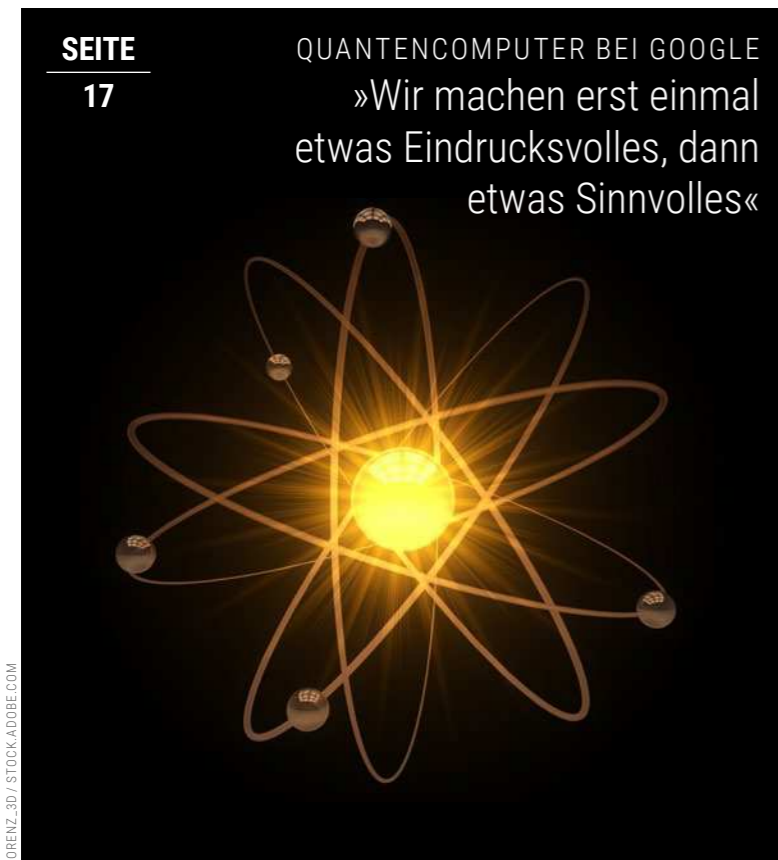
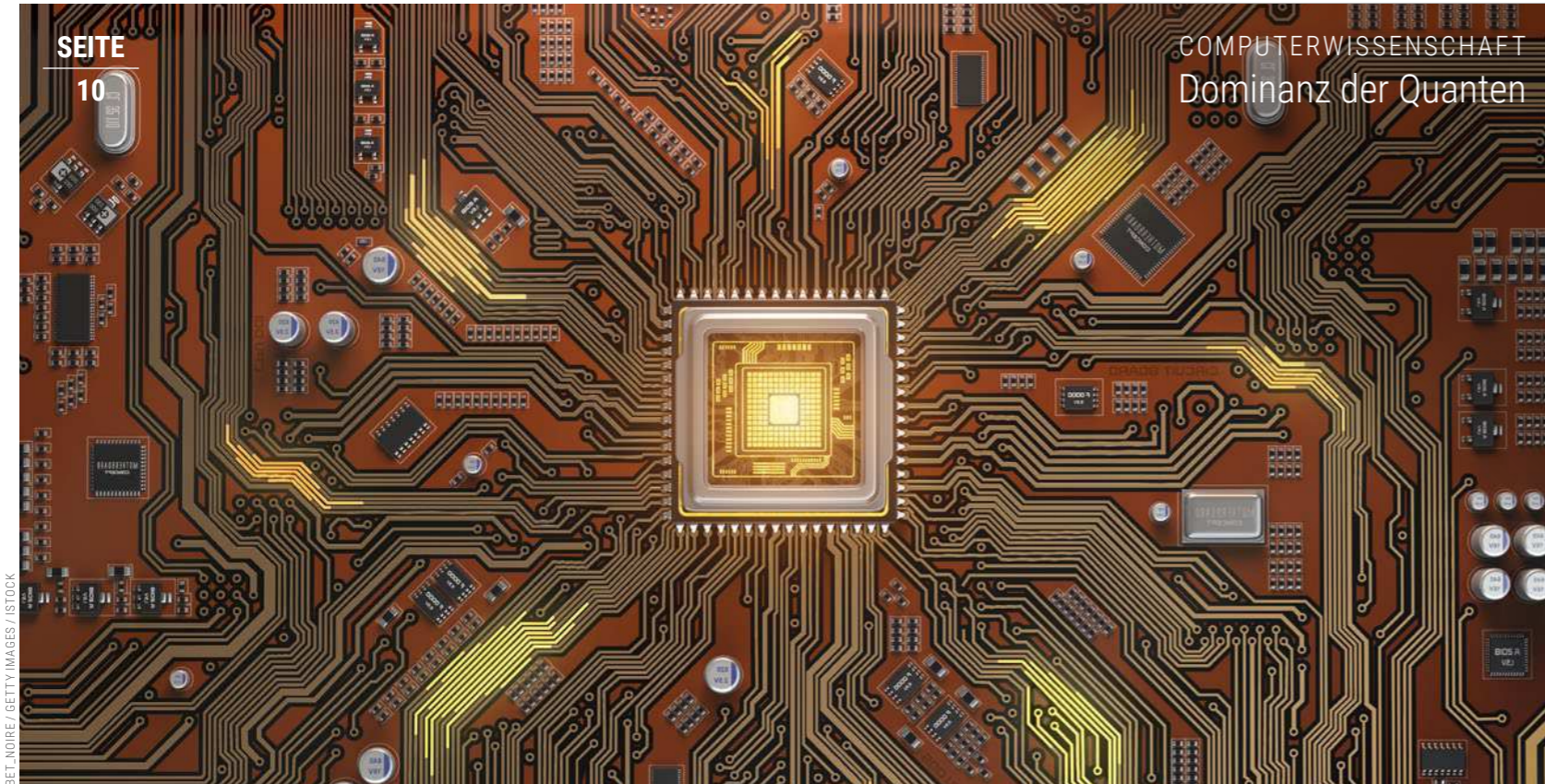


**CHEFREDAKTEURE:** Prof. Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.), Dr. Uwe Reichert  
**REDAKTIONSLEITER:** Dr. Hartwig Hanser, Dr. Daniel Lingenhöhl  
**ART DIRECTOR DIGITAL:** Marc Grove  
**LAYOUT:** Oliver Gabriel, Marina Männle  
**SCHLUSSREDAKTION:** Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle  
**BILDREDAKTION:** Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe  
**PRODUKTMANAGEMENT DIGITAL:** Antje Findeklee, Dr. Michaela Maya-Mrschik  
**VERLAG:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Tiergartenstr. 15–17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114, UStd-Id-Nr. DE229038528  
**GESCHÄFTSLEITUNG:** Markus Bossle, Thomas Bleck  
**MARKETING UND VERTRIEB:** Annette Baumbusch (Ltg.)  
**LESER- UND BESTELLSERVICE:** Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ilona Keith, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: [service@spektrum.de](mailto:service@spektrum.de)

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner der Nationales Institut für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik).

**BEZUGSPREIS:** Einzelausgabe € 4,99 inkl. Umsatzsteuer  
**ANZEIGEN:** Wenn Sie an Anzeigen in unseren Digitalpublikationen interessiert sind, schreiben Sie bitte eine E-Mail an [service@spektrum.de](mailto:service@spektrum.de).

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2018 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bildnachweise: Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechteinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.



- 04 QUANTEN-FLAGGSCHIFF  
Ein Quantensprung in der Technik
- 10 COMPUTERWISSENSCHAFT  
Dominanz der Quanten
- 17 QUANTENCOMPUTER BEI GOOGLE  
»Wir machen erst einmal etwas  
Eindrucksvolles, dann etwas Sinnvolles«
- 26 BRISTLECONE  
Google enthüllt bisher größten  
Quantencomputer
- 28 QUANTENKOMMUNIKATION  
»Ich bin froh über meine  
Rückkehr nach China«
- 36 QUANTENCOMPUTER  
Weitere Aussichten: Durchwachsen
- 47 TOPOLOGIE  
Die Physik-Revolution?
- 56 ALTERNATIVE ZUM SUPERCOMPUTER  
Quantensimulatoren auf  
der Überholspur
- 62 MASCHINELLES LERNEN  
Neuronale Netze als  
Quantensimulator
- 64 MESSTECHNIK  
Präzision jenseits des  
Quantenlimits

QUANTEN-FLAGGSCHIFF

# Ein Quantensprung in der Technik

von Manon Bischoff

Die europäische Kommission hat Mitte 2017 zum dritten Mal ein »Flaggschiff-Projekt« bewilligt: Sie unterstützt die Erforschung von Quantentechnologien mit einer Milliarde Euro. Wir fragen einen Initiator des Quantum-Flaggschiffs, Professor Tommaso Calarco von der Universität Ulm, wofür die EU diese Summe ausgibt und was er sich durch die Förderung erhofft.

**H**err Professor Calarco, schon seit einigen Jahren laufen zwei EU-Flaggschiffe: das Human Brain Project und das für Graphen. Beide haben sich in einem mehrstufigen, öffentlichen Auswahlverfahren gegen zahlreiche andere Ideen durchgesetzt. Das Quantum-Flaggschiff hingegen musste diesen Wettbewerb nicht durchlaufen, sondern tauchte aus Sicht der Öffentlichkeit gewissermaßen aus dem Nichts auf. Wie kam es zu diesem eher ungewöhnlichen Bewilligungsprozess?

Dieses Bild täuscht, die Vorbereitungen begannen nämlich eigentlich schon vor 15 Jahren. Damals initiierten wir zahlreiche nationale Förderprogramme, die unsere Forschung mit mehreren hundert Millionen Euro unterstützten. Insgesamt dauerte der gesamte Bewilligungsprozess also viel länger als bei den anderen Flaggschiffen.

**Welche Rolle haben Sie persönlich dabei gespielt, das Quantum-Flaggschiff zu realisieren?**

Ich habe EU-Kommissar Günther Oettinger unser Vorhaben vorgestellt, was ihn später von unserem Projekt überzeugte.

**War das schwer?**

Es war nicht ganz einfach. Natürlich war es nicht mit einem einzigen Gespräch getan. Nachdem ich ihn über unser Forschungsgebiet und unsere Ziele informiert hatte, musste er sich von zwei wichtigen Punkten überzeugen: Er wollte wissen, ob sich die Industrie und auch forschungsschwächere EU-Mitgliedstaaten an den Projekten beteiligen würden. Das mussten wir beweisen, deshalb trafen wir uns mit einer Reihe von Vertretern der Industrie und unterschiedlicher Mitgliedstaaten. Nach einigen Jahren setzt die EU nun eigene Experten ein, um unser Projekt akribisch zu prüfen.

**Warum braucht Ihr Forschungsgebiet jetzt diese Art der Förderung?**

Weil wir momentan das Knowhow in Europa haben, es aber langsam abwandert. Kürzlich warb Microsoft drei der besten europäischen Forschungsgruppen ab, um einen Quantencomputer basierend auf topologischen Qubits zu realisieren. Und 2017 teleportierte Jian-Wei Pan mit seiner Arbeitsgruppe erstmals Photonen von der Erde zu einem chinesischen Satelliten im Orbit – Pan arbeitete zuvor in der Ar-



FRIEDERIKE HENTSCHEL

**TOMMASO CALARCO**  
**Professor Calarco in Heidelberg auf dem »International Science Festival«.**

beitsgruppe des österreichischen Physikers Anton Zeilinger, der 1997 erstmals Quanten teleportierte. Nachdem die ESA die Anfrage Zeilingers ignorierte, führte Pan das bahnbrechende Experiment in China durch.

**China und die USA investieren enorm hohe Summen in Quantentechnologien, dagegen wirkt eine Milliarde Euro überschaubar. Kann Europa da überhaupt mithalten?**

Europa kann nur mithalten, wenn die Industrie sich beteiligt. Es mag sich lächerlich anhören, aber wir betrachten die Milliarde als Anschubfinanzierung, damit größere Unternehmen auf uns aufmerksam werden.

**Vor ein paar Jahren erachtete der Bosch-Konzern von 20 denkbaren Quantentechnologien nur zwei als potenziell produkttauglich. Es scheint, als könnte die Suche nach Förderern schwierig werden.**

Vor drei Jahren hätte ich Ihnen zugestimmt. Doch die Lage hat sich geändert. In unserem aktuellen Konsortium zu Quantensimulatoren stellen wir uns momentan sogar die Frage, ob wir nicht zu viele Partner aus der Industrie haben.

**Bei Quantensimulatoren? Warum möchten sich Firmen an ihnen beteiligen?**

Quantensimulatoren können in der Zukunft komplexe Materialien simulieren –



darunter zum Beispiel Chemikalien und Supraleiter. Das interessiert auch Firmen abseits der Tech-Branche. 2017 hat Volkswagen beispielsweise eine Maschine von D-Wave gekauft, die mit Hilfe der Quantenmechanik Optimierungsprobleme schneller lösen können soll. Das motiviert andere deutsche Unternehmen, ebenfalls mehr in

diese Form der Forschung zu investieren – und das nicht nur im Bereich der Sensorik und Kommunikation, wie Bosch es bisher tut.

**Was sind denn die wichtigsten Technologien, die das Flaggschiff fördern werden?**

Im Wesentlichen gliedern sie sich in vier Bereiche: die bereits erwähnten Quantensimulationen und -computer, aber auch Quantenkommunikation und -sensorik.

**Inwiefern haben diese Bereiche einen Nutzen – etwa in unserem Alltag?**

Quantensysteme könnten den Kommunikationsbereich sicherer gestalten. Heute werden Daten als einzelne Bits übertragen, die jeweils durch mehrere Photonen kodiert sind. Dieser Übertragungsweg ist nicht ausnahmslos sicher: Wenn ein Dritter einige der Photonen stiehlt, fällt das nicht auf. Diese Schwachstelle nutzten Geheimdienste wie die NSA aus. Die Quantenkommunikation könnte dieses Problem lösen. Jedes Bit wird dann durch ein einzelnes Photon kodiert, das nicht weiter geteilt werden kann. Eine Messung des Bits würde das System stören: Man kann also sicherstellen, dass niemand die Nachricht unterwegs abgefangen hat.

**Das klingt viel versprechend. Kann man diese Art der Kommunikation schon umsetzen?**

Ja, sie wird bereits auf Kanälen von mehreren hundert Kilometern Länge einge-

setzt – beispielsweise in China. Und das zuvor erwähnte Experiment von Jian-Wei Pan hat 2017 eine sichere Satellitenübertragung ermöglicht.

**Welche Quantentechnologien werden sich darüber hinaus in den kommenden Jahren Ihrer Meinung nach durchsetzen?**

Gerade im Bereich der Sensorik können wir sehr kleine Felder immer präziser messen. Die Quantentechnologie wird es uns hoffentlich bald ermöglichen, einzelne Neurone in Echtzeit zu detektieren. Das wäre ein wichtiger Schritt für die Medizin. Viele deutsche Firmen, darunter Bosch, forschen aktuell in diesem Bereich.

**Ist es nicht immer noch extrem schwierig, Quantenphänomene wie Verschränkung in Alltagsprodukten anzuwenden?**

Ja, leider müssen die meisten Quantensysteme extrem gekühlt werden. Glücklicherweise aber nicht alle: Quantenkommunikation funktioniert beispielsweise bei Raumtemperatur. Doch auch einige Festkörper bergen ohne Kühlung Quanteneigenschaften, etwa Diamanten mit bestimmten Fehlstellen.

**Was wäre langfristig gesehen die größtmögliche Revolution, die eine Quantentechnologie hervorbringen könnte?**

Ich denke, dass Quantensimulation und Quantencomputer bedeutende Fortschritte einleiten werden. Durch sie könnten wir bisher unbekannte Chemikalien für die Medizin entwickeln und eine neue Generation künstlicher Intelligenz hervorbringen.

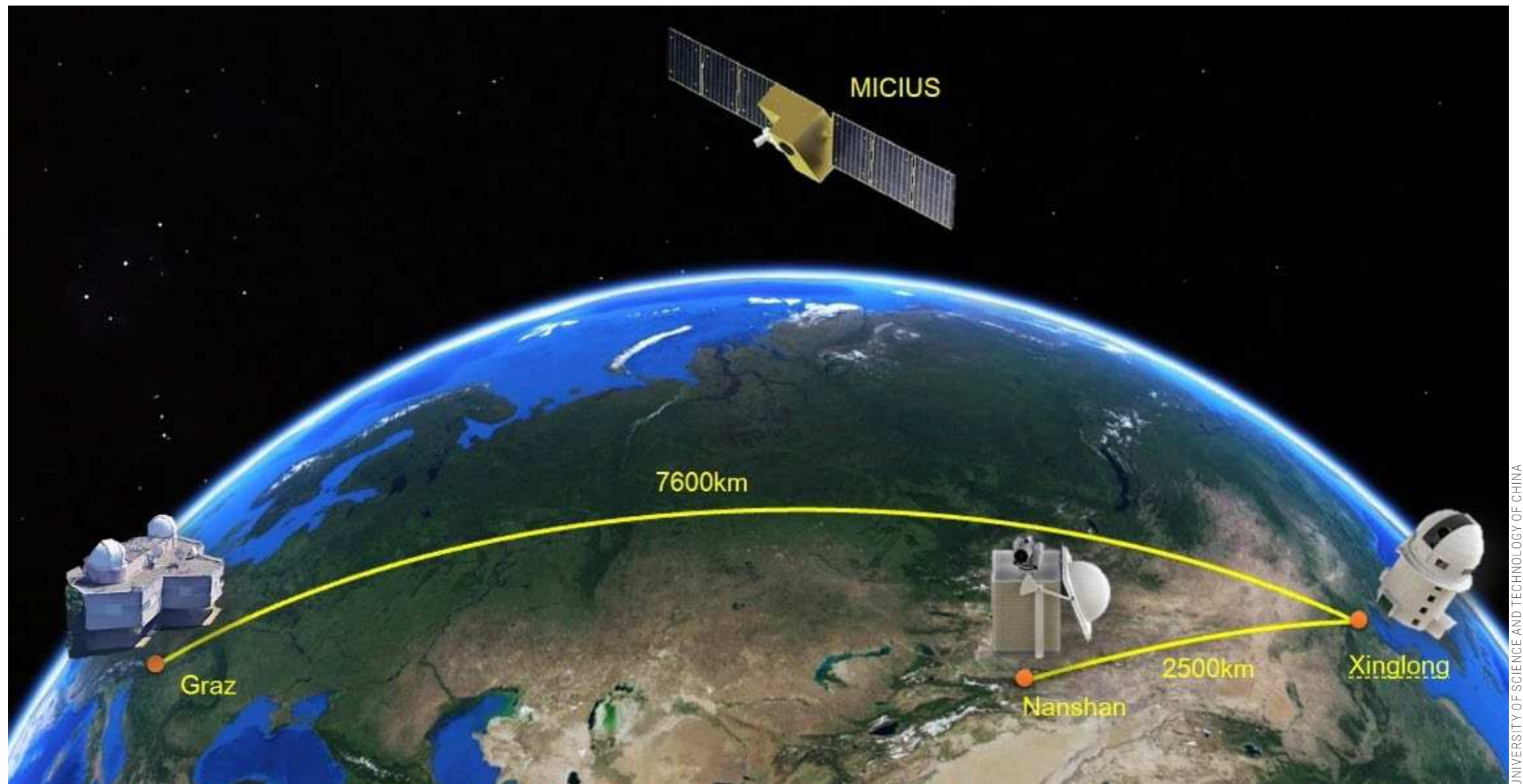
**In Ihrem Antrag behaupten Sie, dass universelle Quantencomputer in den nächsten 20 Jahren verfügbar sein werden. Das scheint optimistisch.**

In letzter Zeit werde ich häufiger gefragt, ob unsere Ziele nicht zu konservativ sind. Google hat für Anfang 2018 den Beweis der so genannten »Quantum Supremacy« angekündigt. Auch IBM plant, einen Quantencomputer mit 50 Qubits zu entwickeln. Wir haben etliche führende Wissenschaftler gebeten, unsere geplanten Ziele zu überprüfen – und sie stimmen mit unserer Einschätzung überein.

**Quantencomputer wurden schon Anfang der 2000er Jahre mit Vorschusslorbeeren überhäuft, doch dann ist die Forschung jahrelang nicht recht vorange-**

# Sichere Quantenkommunikation

Ende 2017 führten zwei wissenschaftliche Arbeitsgruppen eine Quanten-  
videoübertragung zwischen Österreich und China.



**kommen. Was hat sich da so plötzlich geändert?**

Aktuell gibt es nur noch ingenieurwissenschaftliche Hürden, die wir überwinden müssen. Die grundlegende Theorie ist weit genug entwickelt: Einzelne Qubits existieren schon, und man kann mit ihnen rechnen, was wir Anfang der 2000er Jahre noch nicht konnten. Jetzt müssen Ingenieure ihre Anzahl noch hochskalieren.

**Es gibt mehrere konkurrierende Konzepte, wie ein Quantencomputer realisiert werden könnte. Welches halten Sie für am zukunftsfähigsten?**

Ich denke, sie sind alle sehr wichtig. Selbst Experten wie John Martinis, der bei Google mit supraleitenden Qubits arbeitet und darum befangen sein könnte, betont, dass man sich nicht nur auf eine Möglichkeit versteifen soll. Darum versuchen wir zumindest in der ersten Phase alle Methoden zu fördern.

**Gilt das auch für topologische Quantencomputer, deren Qubits aus zweidimensionalen Quasiteilchen – so genannten Anyonen – bestehen?**

Zunächst müssen Physiker überhaupt ein

einzelnes topologisches Qubit erzeugen. Dieses Konzept ist sehr spannend und theoretisch viel versprechend. Ich finde es überaus mutig, dass Microsoft alles auf topologische Quantencomputer setzt. Denn das ist Grundlagenwissenschaft, vielleicht nobelpreiswürdig, aber noch nicht technologiefähig.

**Woran forschen Sie momentan – haben Sie überhaupt noch Zeit dafür?**

Glücklicherweise ja. Das Bundesministerium für Forschung finanziert mehrere Assistenten, die mich bei den administrativen Arbeiten unterstützen. So kann ich mich an der Universität Ulm der optimalen Kontrolle von Quantensystemen widmen: Wir versuchen Experimente geeignet einzustellen, so dass die Fehlerraten möglichst niedrig bleiben. Wir haben dazu eine neue Methode entwickelt, die wir künftig als eine Art Cloudservice anbieten möchten. ↩

**Vielen Dank für das Gespräch!**

Das Interview fand während des vom DAI organisierten »Geist Heidelberg – International Science Festival« statt. (Spektrum.de, 16.02.2018)

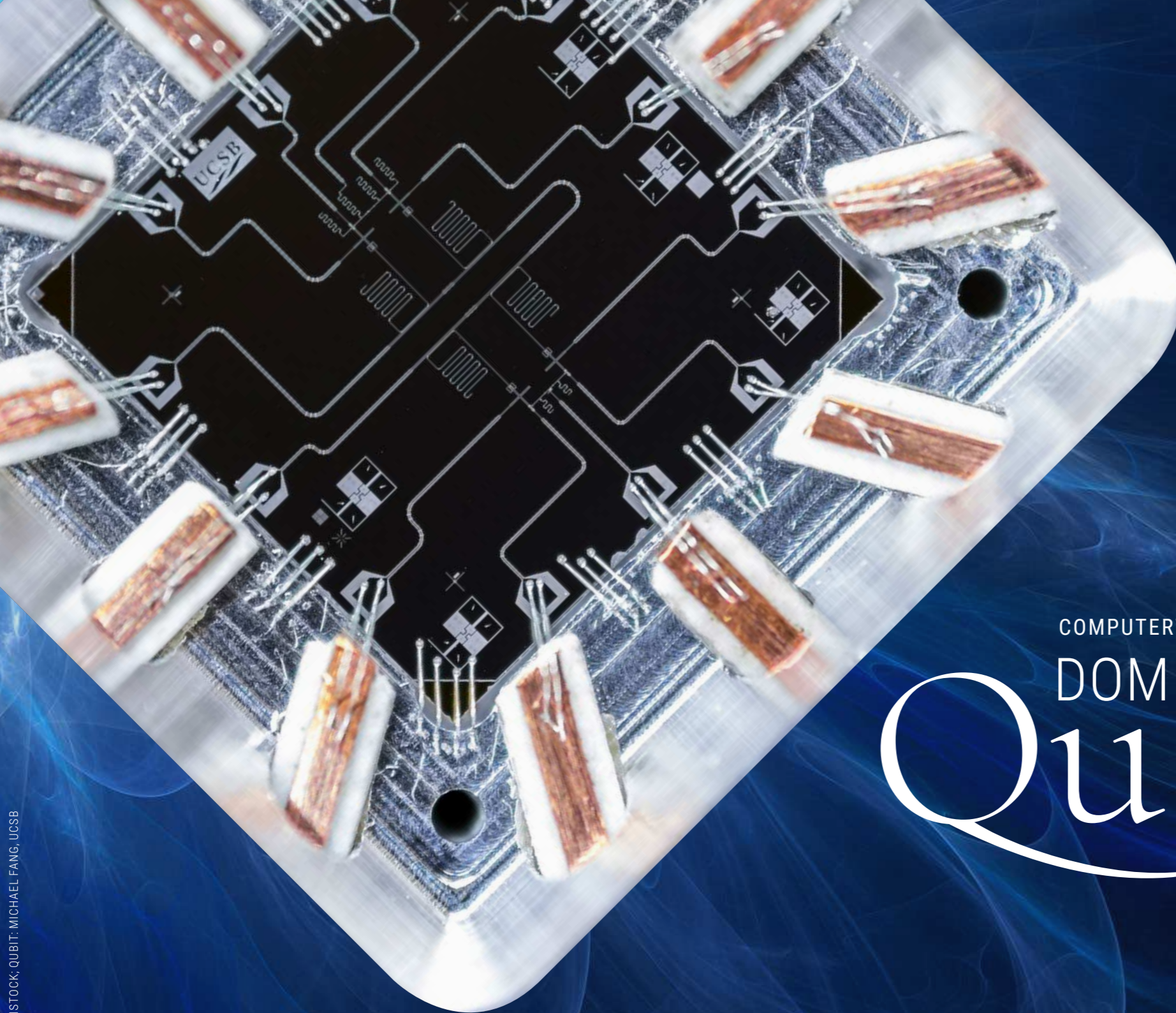
# Spektrum LIVE

VERANSTALTUNGSREIHE  
ZUM 40-JÄHRIGEN JUBILÄUM  
DES VERLAGES SPEKTRUM  
DER WISSENSCHAFT

In unserem Jubiläumsjahr laden wir Sie zu spannenden Vorträgen, lehrreichen Seminaren und Workshops ein. Lernen Sie Wissenschaft mit **Spektrum** in einem neuen Format kennen – live

Jetzt anmelden:

**Spektrum.de/live**



COMPUTERWISSENSCHAFT

# DOMINANZ DER Quanten

von Christopher Schrader

Seit Jahrzehnten arbeiten Physiker an Quantencomputern, die klassische Rechner überflügeln sollen. 2018 könnte das Zeitalter der Wunderrechner endlich anbrechen – auch weil Google und andere IT-Giganten in die Technologie investieren.

9, 22, 49 – nicht ausgeschlossen, dass diese Zahlen die Hälfte der »sechs Richtigen« bei der Ziehung der Lottozahlen am kommenden Samstag sind. Für John Martinis hingegen sind sie die Geschichte seines Erfolgs, und der hat viel mit harter Arbeit zu tun, weniger mit Glücksspiel. Obwohl: Der Zufall spielt schon eine wichtige Rolle, aber es ist der Zufall, wie ihn die Quantenmechanik versteht.

John Martinis ist ein kalifornischer Physiker, der an der University of California in Santa Barbara und am dortigen Google-Forschungszentrum einen Quantencomputer entwickelt. Dieser mystischen Maschine traut man es seit etwa 30 Jahren zu, eines Tages bei bestimmten Aufgaben sämtliche Supercomputer herkömmlicher Bauart in den Schatten zu stellen. Lange wirkte es so, als bliebe das eine ewige Ankündigung wie beim Kernfusionskraftwerk oder dem Berliner Flughafen. Doch mittlerweile sieht es so aus, als könnte dieses Versprechen bald eingelöst werden.

### Google will es wissen

Martinis hat vor einer Weile verkündet, ein Rechenwerk mit neun so genannten Qu-

bits, der kleinsten Einheit eines Quantencomputers, zum Laufen gebracht zu haben: Sie waren in einer Reihe nebeneinander angeordnet. Beim Heidelberg Laureate Forum 2017 in Heidelberg, das fünf der führenden amerikanischen Forscher an den Neckar geholt hatte, stellte der Kalifornier einen Prototyp mit 22 Qubits vor. Sie sind in zwei Reihen von je elf Einheiten angeordnet. Zum Ende des Jahres will Martinis' Team sogar einen Chip in Betrieb nehmen, der 49 Qubits enthält, angeordnet im 7x7-Format.

Diese zweistellige Zahl klingt im Vergleich zu konventionellen Supercomputern, in denen Milliarden einzelner Halbleitertransistoren werkeln, geradezu jämmerlich. Doch der Eindruck täuscht. Nachdem die Quantenrechner lange Zeit bei etwa einem Dutzend Qubits stagnierten, nähern sie sich nun mit großen Schritten dem Punkt, an dem sie zumindest eine Spezialaufgabe schneller als jeder klassische Computer durchführen können: Bei dem von Google geplanten Quantum-Supremacy-Experiment liest ein Quantenrechner eine zufällige Zusammenschaltung seiner Qubits aus und führt darauf einige logische Operationen aus.



JOHN MARTINIS

**John Martinis auf dem Heidelberg Laureate Forum 2017.**

## Quantencomputer gegen Supercomputer

Bei einer kleinen Zahl von Qubits kann ein herkömmlicher Supercomputer das Ergebnis blitzschnell berechnen. Besteht das System aus 50 oder mehr gekoppelten Qubits, geht das nicht mehr. Dann steigt der Rechenaufwand enorm an. Und ein Quantencomputer vom Format der Google-Maschine, die geschickt die sonderbaren Gesetze der Quantenphysik ausnutzt, kann heutige Supercomputer ausstechen. Martinis ist sicher: »Das wird das letzte Mal sein, dass herkömmliche Rechner egal welcher Größe überhaupt noch mithalten können. Sie werden Tage brauchen, um zu überprüfen, was der Quantencomputer in ein paar Sekunden berechnet.« Auch Skeptiker finden, dass sich das Forschungsgebiet einer symbolträchtigen Schwelle nähert: »Wenn das Experiment mit knapp 50 Qubits klappt, haben wir etwas Fundamentales bewiesen: Wir können in der Natur eine Kapazität für Berechnung anzapfen, die weit über klassische Supercomputer hinausgeht«, bemerkt Scott Aaronson von der University of Texas in Austin. Der theoretische Informatiker hat in der Vergangenheit immer wieder vor allzu großen Erwartungen an den Quantencomputer gewarnt. Heute blickt er mit Ehr-

furcht auf das Supremacy-Experiment: »Allein der Gedanke ist schon überwältigend – und wir haben noch gar nichts über die möglichen Anwendungen gesagt.«

Der Begriff der »Quantum Supremacy«, der Vormacht der Quanten, macht seit 2012 unter Forschern die Runden. Aaronson fand ihn immer schon unglücklich, sagt er, allenfalls gut für ein paar schale Witze. Aber seit November 2016 sei ihm in dieser Hinsicht der Humor vergangen. Schließlich verbreiten seit Donald Trumps Wahlsieg die Neonazis in den USA ungeniert ihren Slogan von der »White Supremacy«, der Vormacht der Weißen.

## Der Zauber überlagerter Zustände

Die theoretische Überlegenheit eines Quantencomputers, die Googles Supremacy-Experiment belegen soll, zeigt sich schon auf seiner untersten Ebene, beim einzelnen Qubit. Während das Bit eines herkömmlichen Computers die Zustände null oder eins einnimmt, vermag das Qubit beide gleichzeitig zu speichern. Physiker sprechen von einer Superposition der Zustände null und eins, bei der die Natur auch alle denkbaren Mischungen der beiden Zustände berücksichtigt. Außerdem

»Das wird das letzte Mal sein, dass herkömmliche Rechner egal welcher Größe überhaupt noch mithalten können«

[John Martinis, University of California, Santa Barbara]

vermögen mehrere der Qubits in eine innige Kopplung zu gehen, die Physiker Verschränkung nennen. Diese erschließt ihnen weitere Zustände, die sich klassisch überhaupt nicht mehr nachbilden lassen.

Der Grund dafür ist die Quantenmechanik, die Bewegungen und Zustände von Partikeln wie Atome, Elektronen oder Lichtteilchen als Wellen beschreibt; mehrere von ihnen können sich eine solche Wellenfunktion auch teilen. Sie alle haben damit in jedem Moment die Möglichkeit, jeden denkbaren Zustand einzunehmen: So kann zum Beispiel ein Elektron gleichzeitig durch beide Öffnungen eines Doppelspalts gehen und dahinter quasi mit sich selbst ein Interferenzmuster erzeugen.

Diese Vielfalt endet allerdings, wenn eine Messung stattfindet. Wenn Physiker partout feststellen wollen, welchen Spalt das Elektron durchquert, dann muss es sich sozusagen entscheiden. Seine Möglichkeiten schnurren dann auf eine einzige, zufällig ausgewählte zusammen, das Interferenzmuster verschwindet, die Wellenfunktion – so sagen die Forscher – kollabiert.

Übertragen auf Qubits bedeutet das alles, dass sie, solange sie in Ruhe gelassen

werden, viele Operationen gleichzeitig an der Superposition aller möglichen Lösungen ausführen und dabei die für die jeweilige Aufgabe richtige erkennen können. Das und die Möglichkeit zur Verschränkung lässt ihre Rechenkraft bei bestimmten mathematischen Problemen stark ansteigen. Oberflächlich betrachtet wirkt es, als rechneten die Qubits in einem Quantencomputer parallel – eine Wahrnehmung, die Scott Aaronson zufolge die Sache allerdings stark vereinfacht.

### **Das Geheimnis von Shors Algorithmus**

Tatsächlich kennen Wissenschaftler bisher nur wenige Rechenaufgaben, die von Quantencomputern schneller gelöst werden würden. Das bekannteste ist, jene Primzahlen zu finden, die eine große Zahl restlos teilen. 1994 entwickelte der US-Mathematiker Peter Shor einen nach ihm benannten Quantencomputer-Algorithmus, der die Lösung für dieses Faktorisierung genannte Problem schneller finden kann als konventionelle Rechenprogramme, da er geschickt die besondere mathematische Struktur der Aufgabe ausnutzt.

Auch beim Sortieren von Datenbanken hätten vollwertige Quantencomputer die

Nase vorn, wie der indisch-amerikanische Informatiker Lov Grover 1996 erkannte. Optimierungsprobleme sind ein weiteres Beispiel für das Potenzial von Quantencomputern. Tatsächlich bietet die kanadische Firma D-Wave bereits eine Maschine an, die dieses Problem dank Quanteneffekten schneller lösen soll als bisherige Supercomputer (ob sie das wirklich tut, ist aber nach wie vor umstritten).

Martinis und die meisten anderen Quantenphysiker hingegen arbeiten an einem Allzweck-Quantencomputer, der auch die Algorithmen von Shor und Grover ausführt sowie weitere, die noch erdacht werden müssen. Ein großes Hindernis bei der Entwicklung war lange Zeit, überhaupt Qubits herzustellen und zu kontrollieren. Frühe Versuche packten eine Hand voll Ionen, also Atome, denen eines ihrer Elektronen fehlte, in eine Falle, die aus magnetischen und elektrischen Feldern aufgespannt wird. Schon seit Mitte der 2000er Jahre schafft es etwa die Arbeitsgruppe um Rainer Blatt an der Universität Innsbruck, acht Kalziumionen als Qubits zu manipulieren und zu verschränken. Inzwischen sollte eine abgewandelte Technologie dem Physiker zufolge auch 50 Qubits erlauben.



## SCOTT AARONSON

**Scott Aaronson von der University of Texas auf dem Heidelberg Laureate Forum 2017.**

nem schmalen Spalt festgehalten werden. »Das ist ein standardisiertes Bauteil und es kann bei Raumtemperatur betrieben werden. Das erleichtert die Arbeit ungemein. Es reicht, die Ionen selbst mit Laserstrahlen zu kühlen – also ihre Bewegung zu bremsen.« Monroe sprach in Heidelberg bereits von Plänen, einen Quantencomputer mit 32 Qubits basierend auf einer Ionenfalle zu bauen. Laut seiner Schätzung könnte es 2019 so weit sein – danach wäre es auch für ihn nicht mehr weit zur Supremacy-Schwelle, ab der klassische Computer nicht mehr mitkommen.

### Supraleiter als Qubits

John Martinis hat mit dem Team bei Google sein Supremacy-Experiment bereits Anfang 2018 durchgeführt. Die Qubits der Westküstenforscher haben einen ganz anderen Aufbau als im Ostküstenstaat Maryland, sie sind riesig verglichen mit den einzelnen gefangenen Ionen. Jedes besteht aus einem kleinen Metallkreuz von etwa

Mit einer ähnlichen Technik arbeitet das Team von Christopher Monroe an der University of Maryland in College Park. Er erklärte auf der Tagung in Heidelberg, in seine Ionenfalle passten inzwischen 96 Atome, die sich allerdings in dieser Ballung nur unzureichend kontrollieren ließen. Monroe hat aber vor einem Jahr Versuche

veröffentlicht, in denen er fünf Ytterbiumionen als Qubits per Laserstrahl einzeln programmieren und in beliebigen Konstellationen paarweise verschränken konnte – ein Kommentar im Fachmagazin »Nature« wertete das als Meilenstein.

Monroes Ionenfalle ist inzwischen ein Halbleiterchip, in dem die Ionen über ei-

einem halben Millimeter Länge, das aus einer dünnen Folie herausgeschnitten ist. An einem Endpunkt befindet sich ein supraleitender Josephson-Kontakt aus zwei supraleitenden Schichten mit einem dünnen Isolator dazwischen.

Wird dieses Sandwich auf Bruchteile von einem Grad über dem absoluten Nullpunkt gekühlt, lässt sich sein Verhalten nur noch durch die Quantenmechanik erklären: Elektronenpaare fangen an, von einem Supraleiter zum anderen durch die nichtleitende Trennschicht »hindurchzutunneln«. Sie durchqueren den Isolator also allen klassischen Gesetzen der Physik zum Trotz. »Das macht das ganze Gebilde zu einem Qubit«, sagt Martinis, »obwohl es Milliarden von Elektronen enthält und wirklich groß ist. Aber der Strom kann nun in beide Richtungen zugleich fließen.« Es entsteht also wiederum eine Superposition. Gesteuert und ausgelesen wird das Qubit mit Mikrowellen, weil der Stromfluss Schwingungen im Bereich von fünf bis sechs Gigahertz auslöst; diese Strahlung dient auch dazu, Qubits miteinander zu verschränken.

Das Supremacy-Experiment selbst, warnen Martinis und Aaronson, wird al-

lerdings in erster Linie symbolische Bedeutung haben – und mitnichten den Punkt markieren, an dem Quantencomputer ihre klassischen Pendants hinter sich lassen. Denn letztlich führt Martinis Quantenrechner in dem Google-Experiment eine irrelevante Aufgabe aus. Die zufällige Zusammenschaltung der Qubits und die Vorhersage des Outputs geht schnell, weil der Apparat genau dafür gemacht ist.

»Die Rechenpower dabei steigt mit zwei hoch die Zahl der Qubits an«, sagt Martinis. »Und wenn es dann eben 2 hoch 49 ist, also ungefähr eine Billion mögliche Zustände, fordert das vor allem die Speicherkapazität eines Supercomputers heraus.« Der konventionellen Maschine fehlt es also nicht so sehr an Prozessorleistung, um in dem Wettbewerb zu bestehen – sie hat vor allem damit zu tun, alle möglichen Kombinationen von Qubits aus dem Gedächtnis abzurufen.

### **Bessere Solarzellen, wirksamere Medikamente**

»Dieses Experiment hat überhaupt keinen realen Nutzen«, meint Scott Aaronson mit Blick auf das Supremacy-Experi-

ment. Es sei eben Grundlagenforschung: »Beim Higgs-Boson hat auch niemand gefragt, welche Anwendung das nun haben kann.« Doch es gibt einen großen Unterschied zur Hochenergiephysik mit ihren Beschleunigern und Detektoren: Den Quantencomputer-Entwicklern brennen einige wichtige Anwendungsfälle geradezu auf den Nägeln. »Das Erste, was sie machen, werden wahrscheinlich Berechnungen in der Quantenchemie sein«, erläutert Aaronson.

»Energieniveaus und Reaktionsraten von Molekülen nehmen jetzt schon gewaltige Mengen von Rechenzeit auf Supercomputern ein und führen doch oft zu unbefriedigenden Ergebnissen.« Vermutlich lässt sich aber ein Quantensystem, nämlich ein Molekül, gut durch ein anderes, nämlich einen Quantencomputer, nachstellen und berechnen. Der legendäre Physiker und Nobelpreisträger Richard Feynman hatte genau diesen Ansatz in den 1980er Jahren vorgeschlagen. »Auf Dauer bekommen wir so bessere Medikamente, die sich präziser an Rezeptoren im Körper binden, bessere Materialien für Solarzellen oder die Nanotechnik«, erwartet Aaronson.

Was jedoch nach Aussagen der Physiker noch in weiter Ferne liegt, ist die Anwendung, wegen der Quantencomputer gefürchtet werden: das Brechen des im Internet gängigen RSA-Verschlüsselungsstandards. Das erfordert die erwähnte Zerlegung großer Zahlen in Primzahlfaktoren. Herkömmliche Computer können sie praktisch nicht schaffen, Quantenrechner sollten sie jedoch mit Shors Algorithmus in überschaubarer Zeit bewältigen. »Um die heutigen Schlüssel mit 2048 Bit zu brechen, bräuchten wir vermutlich einen Quantencomputer mit einer Million Qubits«, betont John Martinis – und eine solche Maschine ist noch lange nicht in Sicht.

### **Kryptografen können vorerst gelassen bleiben**

Die Aufteilung der Million Einheiten ist dabei kurios, denn während für die eigentliche Rechnung wohl 100 Qubits ausreichen, so Martinis, brauche man den Rest zur Korrektur von Fehlern. Auch das ist eine Folge der Quantenmechanik: Die Benutzer eines Quantencomputers dürfen ja während der Berechnung nicht überprüfen, ob die beteiligten Qubits noch gut funktionie-

ren, also ob zum Beispiel die Verschränkung noch andauert – das würde die Superposition der Zustände sofort zerstören. Möglich sind lediglich Messungen an größeren Gruppen um die fraglichen Einheiten herum, um deren Funktion indirekt zu testen. Und je genauer das Ergebnis sein soll, desto mehr Zusatz-Qubits werden dafür gebraucht.

Womöglich unterliegen erste Quantencomputer für Berechnungen in der Quantenchemie aber nicht derart stringenten Anforderungen. »Mit 100 Qubits kann man da vielleicht schon gute Resultate erzielen«, führt Scott Aaronson weiter aus. Die Recheneinheiten müssten allerdings möglichst stabil sein, und einige der benutzten Algorithmen enthielten ohnehin bereits einige Schritte zur Fehlerkorrektur. Sobald sich das einspielt und wenn die Integration weiterer Einheiten gelingt, soll das Wachstum schnell über 100 hinausgehen. John Martinis sagt, nur halb scherzend, er ziele mittelfristig auf einen Quantencomputer mit 333 Qubits. Der erlaube dann  $10^{100}$  Kombinationsmöglichkeiten – diese Zahl trägt die Bezeichnung Googol, Martinis' Arbeitgeber leitet davon seinen Namen ab.

### **Quantencomputer in der Cloud**

Erste Erfahrungen mit den neuartigen Rechnern können Forscher in aller Welt vermutlich bald selbst sammeln: Google plant, wie IBM es bereits mit seinen Quantencomputer-Prototypen macht, den neuartigen Rechner mit dem Internet zu verbinden. Man kann dann bei den beiden Konzernen Rechenzeit beantragen, um Algorithmen und Schaltpläne auszuprobieren.

»So wird es auch in Zukunft sein«, vermutet Scott Aaronson: »Man erreicht Quantencomputer über die Cloud, wenn man sie wirklich benötigt. Für die meisten Dinge allerdings werden wir sie überhaupt nicht brauchen; E-Mails schreiben, Texte bearbeiten und ›Angry Birds‹ spielen geht auch so.« Und wenn doch eines Tages die RSA-Verschlüsselung geknackt werde – immerhin hatte Edward Snowden 2014 enthüllt, dass der Geheimdienst NSA daran arbeite –, dann steige man eben auf eine andere Methode um: Quantenkryptografie lässt sich auch von einem Quantencomputer nicht brechen. ↩

(Spektrum – Die Woche, 41/2017)



QUANTENCOMPUTER BEI GOOGLE

»Wir machen  
erst einmal etwas  
Eindrucksvolles,  
dann etwas  
Sinnvolles«

von Christopher Schrader

Schon in den nächsten Monaten könnten Quantencomputer klassische Rechner überholen, zumindest bei einer maßgeschneiderten Aufgabe. Im Interview verrät der Physiker John Martinis, worauf es dabei ankommt – und worum es seinem Arbeitgeber Google wirklich geht.

SPAINTER\_VFX / GETTY IMAGES / ISTOCK

**Spektrum der Wissenschaft: Herr Professor Martinis, lange war der Quantencomputer eine Art mystische Maschine, die immer, wenn man nachfragte, etwa zehn Jahre in der Zukunft lag – ungefähr so wie der Fusionsreaktor. Aber plötzlich kündigt Ihr Team, das seit einigen Jahren für den Internetkonzern Google arbeitet, einen Prototyp mit 49 Quantenbits (Qubits) für das Frühjahr 2018 an. Wie zuversichtlich sind Sie, dass Sie die Maschine zum Laufen bringen?**

John Martinis: Wir kommen gut voran. Vor Kurzem haben wir einen Apparat mit 22 Qubits getestet, und nun haben wir mit der Arbeit an dem größeren Gerät begonnen. Aber wichtiger als der Zeitplan ist natürlich, einen Quantencomputer sorgfältig aufzubauen und einzustellen. Einige Probleme haben wir schon beseitigt, aber ein paar müssen wir noch lösen.

**Die 49 Qubits sind in einem Raster von sieben mal sieben angeordnet. Wie sieht der 22er aus?**

Er hat zwei Reihen von elf Qubits. Wir haben dieses Layout gewählt, weil wir es aus einem früheren Prototyp weiterentwickeln

konnten. Das war recht einfach herzustellen, ließ sich schnell verkabeln und passte gut in den Kryostaten (die Kühlvorrichtung, in der sich der Quantencomputer befindet, *Anm. d. Red.*). Und 22 Qubits waren ungefähr die Hälfte auf dem Weg zum Ziel.

**Wird die zweite Hälfte des Wegs einfacher oder schwieriger als die erste?**

Damit ein Computer mit 49 Qubits funktioniert, muss man lernen, die einzelnen Einheiten automatisch zu kalibrieren und hochzufahren. Dafür braucht man viel Software und ausgeklügelte Produktionsverfahren. Diese Prozeduren haben wir intensiv am 22er-Chip getestet. Das hat etwas Zeit gekostet, aber nun fällt uns das Hochskalieren hoffentlich umso leichter.

**Woraus besteht bei Ihnen ein einzelnes Qubit?**

Im Kern ist es ein Mikrowellen-Oszillator, ein kleines Kreuz aus Metall, das sozusagen einen Kondensator und eine Spule enthält. Zwischen den beiden fließen die ganze Zeit Ströme hin und her, mit einer Frequenz von fünf bis sechs Gigahertz. Dazu kommt ein supraleitender Josephson-Kontakt. Darunter verstehen Physiker einen hauchdün-

**Statt auf Halbleiter-Transistoren, die in gewöhnlichen Computern jeweils ein Bit repräsentieren** (das je nach anliegender Spannung entweder den Wert 0 oder 1 hat), basieren Quantencomputer auf so genannten Quantenbits (Qubits). Dank dem quantenphysikalischen Prinzip der Superposition können diese im Vorfeld einer Messung zwei Werte gleichzeitig repräsentieren: 0 und 1. Bei bestimmten Rechenproblemen bringt das Vorteile – zumindest auf dem Papier. Tatsächlich gibt es bislang keinen vollwertigen Quantencomputer. Allerdings arbeiten viele Wissenschaftler daran und setzen dabei zum Teil auf unterschiedliche Qubit-Typen. Dieser Tage nähern sich mehrere Teams einer symbolträchtigen Schwelle, der so genannten Quantum Supremacy: dem Punkt, an dem ein Quantenrechner erstmals eine klassische Maschine übertrumpft.

**John Martinis könnte diesen Meilenstein** als Erster erreichen. Der kalifornische Physiker entwickelt an der University of California in Santa Barbara und am dortigen Google-Forschungszentrum einen Quantencomputer auf Basis von supraleitenden Schaltkreisen. Er und sein Team wollen bereits Anfang 2018 die Überlegenheit der Quanten demonstrieren. »Spektrum der Wissenschaft« sprach mit Martinis im November 2017.



**John Martinis studierte an der University of California in Berkeley Physik und promovierte 1987 mit einer Arbeit über Qubit-Zustände in Supraleitern. Anschließend forschte er am Kommissariat für Atomenergie in Frankreich und am National Institute of Standards and Technology im US-Bundesstaat Colorado. 2004 kehrte Martinis nach Kalifornien zurück und ist heute Professor an der University of California in Santa Barbara. Seit 2014 arbeitet er für Google an der Verwirklichung eines Quantencomputers.**

nen Isolator, der zwei Supraleiter trennt. Durch diese Schnittstelle können gekoppelte Elektronen hindurchtunneln.

### **Was ist an diesem Aufbau quantisiert?**

Da muss ich ein wenig ausholen. Normalerweise gilt Quantenmechanik als die Wissenschaft von Atomen. Elektronen umkreisen Kerne und können definierte, voneinander getrennte stabile Energieniveaus einnehmen. Und aus einzelnen Atomen kann man auch Qubits konstruieren, in denen die Elektronen in einer Überlagerung mehrerer möglicher Zustände sein können. Das machen Leute wie Christopher Monroe von der University of Maryland oder Rainer Blatt an der Universität Innsbruck mit ihren Ionenfallen. Darin verschränken die Forscher mehrere der Quantenobjekte miteinander und wollen so ebenfalls einen Quantencomputer bauen. Unsere Qubits enthalten hingegen Milliarden von Atomen, aber wegen der Supraleitung entscheidet die Quantenmechanik über die kollektive Bewegung der Elektronen. Der Isolator im Josephson-Kontakt ermöglicht es uns, genau zwei unterschiedliche Übergänge anzusprechen, die sich dann überlagern können.

### **Milliarden von Atomen: Ihre Qubits sind also makroskopische Objekte? Dann kann man sie mit bloßem Auge sehen?**

Da brauchen Sie schon gute Augen. Unsere Qubits sind weniger als einen halben Millimeter groß, was aber natürlich riesig ist für die üblichen Dimensionen der Quantenphysik. Normalerweise würde man auf so einen elektrischen Schaltkreis auch klassische Physik anwenden, so dass es dort *einen* Strom und *eine* Spannung gibt. Aber hier sind die Spannungen und Ströme quantenmechanische Größen, die von einer Wellenfunktion beschrieben werden. Das bedeutet, dass die Ströme in unseren Qubits zugleich in die eine und die andere Richtung fließen. Genau wie es beim Atom mit der Bewegung des Elektrons um den Kern ist. Es ist ein ungewöhnlicher Blick auf die Quantenmechanik.

### **Können Sie die Qubits trotz ihrer Größe auch miteinander verschränken, also quantenmechanisch koppeln?**

Dazu müssen wir die Frequenz verstellen, mit der die Ladungen hin und her schwingen, indem wir ein Magnetfeld ändern. So führen wir mehrere Qubits in eine Reso-

nanz. In diesem Zustand gibt es eine Koppelung zwischen den Ladungen verschiedener Einheiten, und diese Interaktion führt zur Verschränkung. Auf diese Weise bauen wir auch die logischen Gatter zwischen den Qubits auf.

**Mit diesen Bauteilen lassen sich einfache Rechenoperationen durchführen. Beispielsweise gibt ein UND-Gatter Auskunft, ob zwei Bits beide den Binärwert 1 haben. Welche logischen Operationen können Sie auf Ihrem Quantencomputer bereits implementieren?**

Ein einzelnes Qubit ist bereits eine Art Nicht-Gatter. Genauer gesagt ist es etwas, das ich Wurzel-aus-Nicht-Gatter nenne, weil man zwei Qubits hintereinander braucht, um ein Nicht (NOT) zu erzeugen. Und verschränkte Gatter bilden eine Art exklusives Oder (XOR).

**In den vergangenen Jahren haben Sie die Qubit-Zahl immer wieder ungefähr verdoppelt. Von 4 auf 9, 22 und jetzt 49 Qubits. Bei 50 liegt aus Sicht vieler Quantenphysiker eine symbolische Schwelle. Was ist an dieser Zahl so besonders?**

Wir erwarten, dass wir mit dem Quantencomputer dann seine prinzipielle Überlegenheit beweisen können, die so genannte Quantum Supremacy. Den Begriff hat John Preskill vom California Institute of Technology geprägt. Wir meinen damit eine Aufgabe, die ein Quantencomputer sehr schnell absolviert, also in Sekunden, während der beste Supercomputer der Welt Stunden oder Tage braucht. Bei ungefähr 50 Qubits ist vermutlich der Punkt erreicht, an dem der klassische Rechner die Aufgabe gerade noch ausführen kann. Das ist wichtig, denn wir müssen das Ergebnis des Quantencomputers ja überprüfen können.

**Ihr Kollege Scott Aaronson von der University of Texas in Austin hat die Aufgabe so beschrieben: Quantencomputer müssen so hoch wie möglich auf einen Berg steigen, aber vom Tal aus – für gewöhnliche Rechner – noch zu sehen sein. Mit was für einer Aufgabe versuchen Sie das?**

Der Computer baut und benutzt einen zufällig aufgebauten logischen Kreislauf. Das erfüllt keinen Zweck in der realen Welt, außer dass es ein gewaltiger Systemtest für den Quantencomputer ist und für eine

Feineinstellung genutzt werden kann. Die Frage ist: Funktioniert alles so wie geplant? Auch für den Quantenrechner ist der Test kompliziert und es kann viel schiefgehen.

**Was bedeutet das, einen zufälligen logischen Schaltkreis aufzubauen?**

Der Computer schaltet zufällig ausgewählte logische Gatter aus NOT und XOR zusammen und berechnet das Ergebnis.

**Klingt nicht sonderlich kompliziert.**

Zunächst einmal hat dieser Schaltkreis eine Struktur, wie sie sich später bei jedem Algorithmus ergäbe, es ist also ein allgemeiner Test. Und dabei spielen Quantencomputer ihre ganzen Vorteile aus. Ein klassischer Computer muss alle möglichen Gatter-Variationen nacheinander prüfen. Je mehr Qubits zur Verfügung stehen, desto aufwändiger wird das. In einem Quantencomputer wird die Aufgabe hingegen von allen Qubits gleichzeitig gelöst und so steigt die Rechenkraft exponentiell an, also wie  $2^{49}$ .

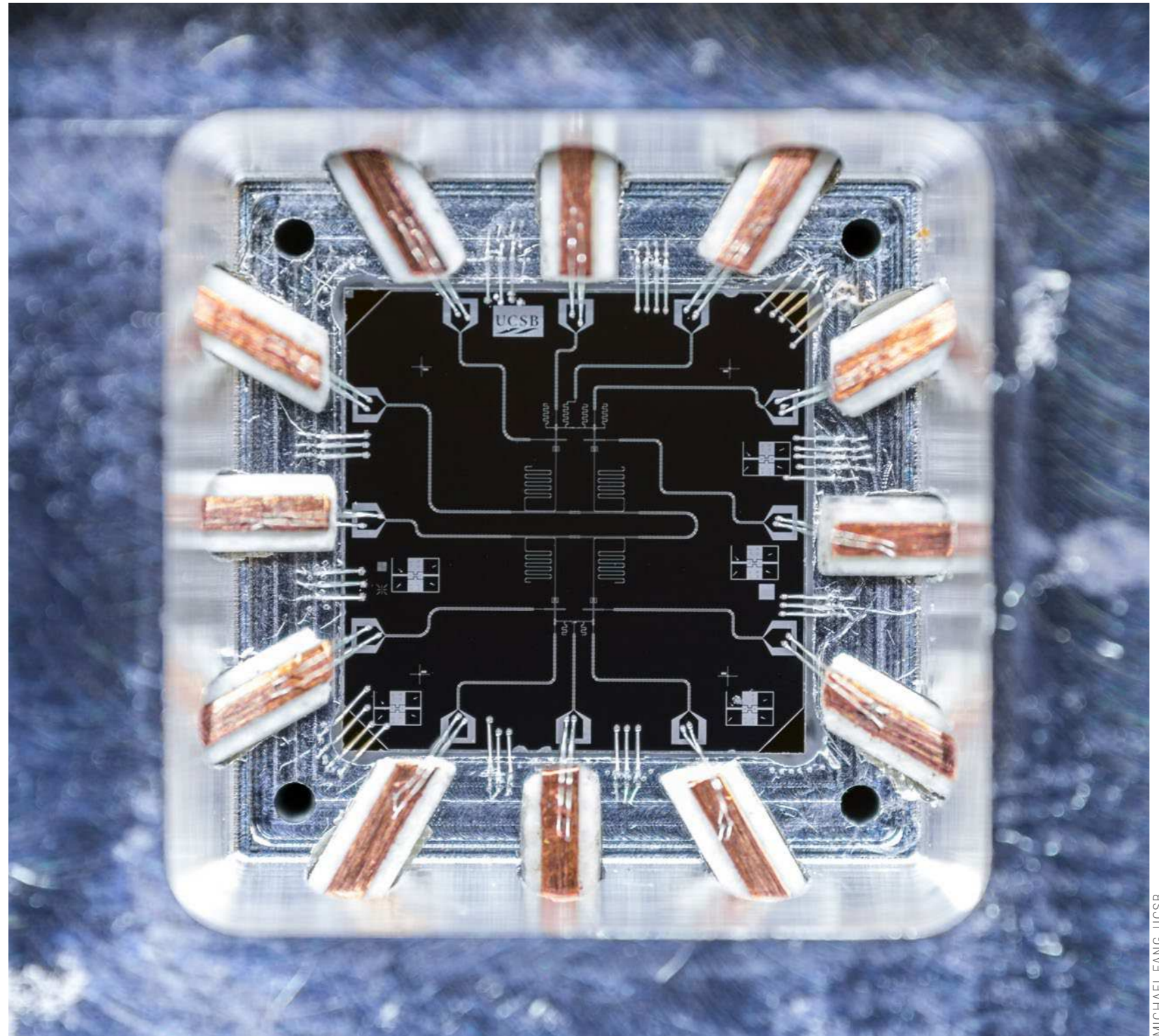
**Wenn Sie nur ein weiteres Qubit dazugeben, haben Sie doppelt so viel und mit zehn Qubits mehr ungefähr 1000-mal so viel Power? Was den Supercomputer bei**

## 50 Qubits Tage kostet, sind bei 60 schon Jahre?

Ja, aber es ist nicht unbedingt die Rechengeschwindigkeit, bei der der Supercomputer zurückbleibt, sondern vor allem die Speicherkapazität. All diese Daten in der Arbeitsspeicher zu behalten und schnell genug hin- und herzuschieben, das bereitet einer klassischen Maschine große Probleme.

**Ihre Konkurrenten bei IBM schreiben allerdings, so groß seien die Probleme bei 49 Qubits gar nicht, wenn man diese auf einem klassischen Rechner mit dem richtigen Algorithmus simuliert. Dauert es also doch noch etwas länger, bis der Quantencomputer klassischen Maschinen wirklich davoneilt?**

Die Physik besagt, dass man andere Berechnungsalgorithmen verwenden kann, wenn die Tiefe des Schaltkreises – die Zahl der Operationen, die nacheinander ausgeführt werden können – gering ist. Über diese Möglichkeit haben wir auch schon in einem unserer Fachaufsätze berichtet. Was IBM da erklärt, wussten wir und die ganze Forschungsszene also bereits. Wir haben die Ergebnisse für einen Algorithmus angegeben, der eine ausreichend große Tiefe



MICHAEL FANG, UCSB

## QUBIT

**Ein Prototyp des von Martinis verwendeten Xmon-Qubits aus dem Jahr 2014: Die Schaltkreise des Chips sind besonders gut gegen elektromagnetische Störsignale abgeschirmt.**

hat, um unsere Behauptungen zu rechtfertigen. Ich denke, die Kollegen sollten unser Paper sorgfältig lesen.

**Die Forscher bei IBM sagen übrigens auch, sie seien Ihnen mit einem 50-Qubit-Quantencomputer zugekommen, allerdings ohne viele Einzelheiten zu verraten.**

Die Qualität der Qubits ist mindestens so wichtig wie die Quantität. Unsere haben eine Fehlerrate von etwa 0,5 Prozent. Wir können im Prinzip 200 logische Operationen hintereinander ausführen, bevor die Qubits ihre Kohärenz verlieren, also den Zustand nicht mehr halten können und man neu anfangen muss. IBM hat bei einem früheren Chip eine Fehlerrate von fünf Prozent angegeben, sie müssen also nach 20 Operationen jeweils neu anfangen. Mal sehen, ob sie sich jetzt verbessert haben. Ich sehe jedenfalls den Zeitplan zu unserem Supremacy-Experiment nicht gefährdet.

**Dieser Versuch mit den zufälligen Schaltkreisen mag ja ein notwendiger Test sein, aber es klingt trotzdem ein wenig enttäuschend. Mit Quantencom-**

**putern assoziiert man doch eigentlich Algorithmen wie den von Peter Shor, mit dem sich große Zahlen enorm schnell in ihre Primfaktoren zerlegen lassen. Ist der anstehende Test nicht vor allem L'art pour l'art?**

Es ist Grundlagenforschung, die sich langfristig als sinnvoll erweisen wird. Wir müssen doch nachweisen, dass die Rechenleistung exponentiell ansteigt. Und wir zeigen damit auch, dass Quantencomputer nicht mehr nur diese abstrakte Idee von Physikern sind, sondern dass sie ihre Kraft machtvoll beweisen können. Es wird gerade in der Informatik viele Menschen dazu bringen, ihre Energie in dieses Feld zu investieren. Wir machen erst einmal etwas Eindrucksvolles, dann etwas Sinnvolles.

**Was schwebt Ihnen konkret vor?**

Wir machen unsere Experimente bei Google im so genannten Quantenlabor für künstliche Intelligenz. Da schauen sich meine Kollegen schon an, was der Quantencomputer für maschinelles Lernen bedeutet. Dabei handelt es sich letztlich um eine Art Optimierungsproblem, und das können Quantenrechner vermutlich gut bewältigen.

**Was noch?**

Die Quantenchemie sieht viel versprechend aus. Es geht darum, die Energieniveaus und Reaktionsraten von Molekülen zu berechnen. Das hatte schon Richard Feynman in den 1980er Jahren angeregt. Von ihm habe ich damals das erste Mal etwas über Quantencomputer gehört.

**Was hatte Feynman damals im Sinn?**

Man benutzt ein Quantensystem, also den Rechner, um ein anderes, nämlich das Molekül, zu simulieren und zu berechnen. Heute werden Supercomputer dafür eingesetzt, solche Ergebnisse zu bestimmen. 20 bis 30 Prozent ihrer Zeit werden dafür verbraucht. Und es ist gerade der exponentiell anwachsende Speicherplatz, der solche Kalkulationen so schwierig macht. Quantencomputer könnten das Problem viel effizienter lösen.

**Die Faltung und das Bindungsverhalten großer Biomoleküle machen den Spezialisten heute in der Tat viele Schwierigkeiten.**

Ja, das fängt schon bei Molekülen aus 20 Atomen an. Der Quantencomputer könnte sich also einem Problem zuwenden, das

bereits viele Menschen beschäftigt. Es haben sich auch schon etliche Spezialisten daran gemacht, entsprechende Algorithmen für den Quantencomputer zu entwickeln. Die letzten paar Probleme haben wir bei Google in den vergangenen Jahren beseitigt. Darum denken wir, dass wir das nö-

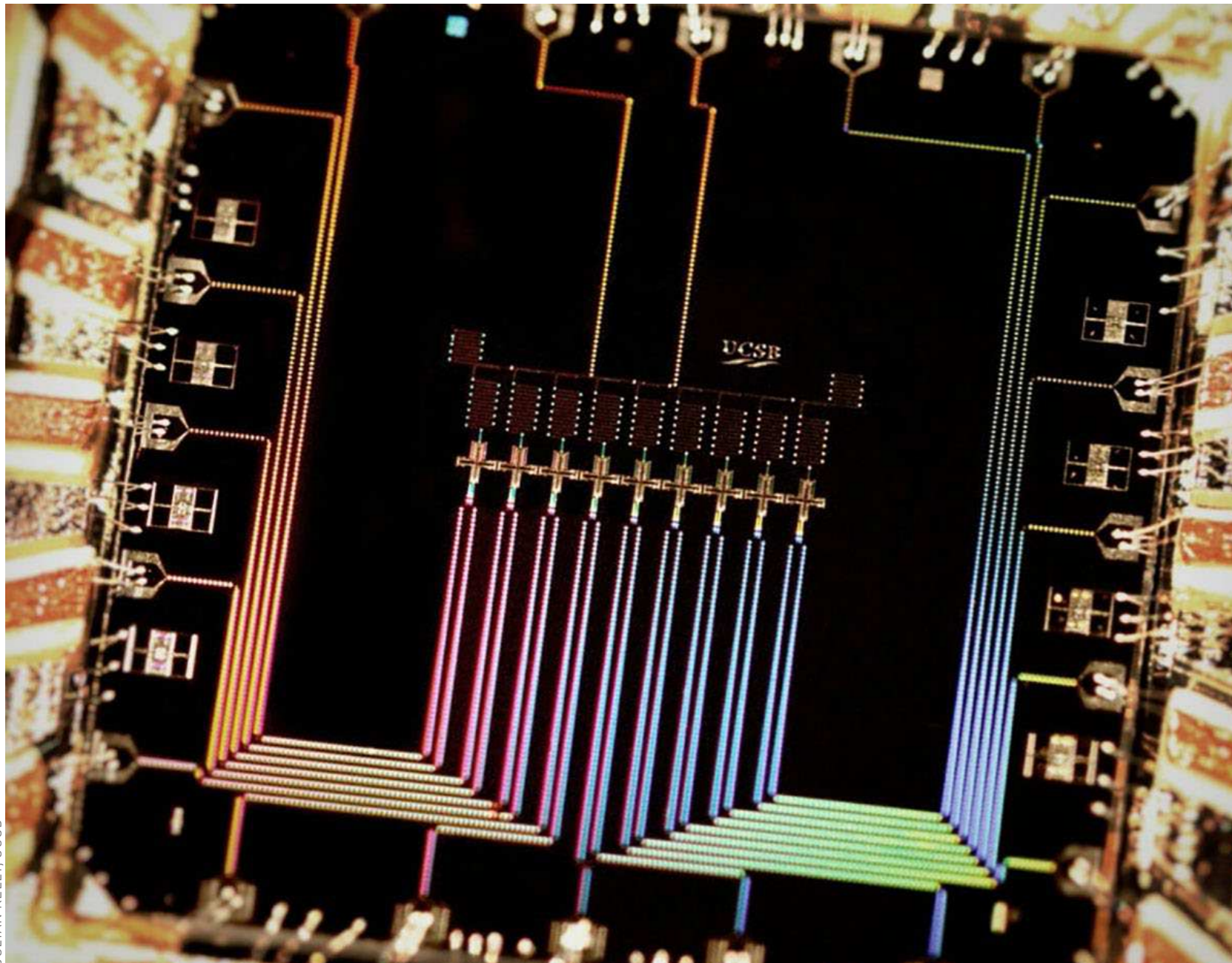
tige Rüstzeug haben, um die Hardware richtig benutzen zu können.

**Womit man Quantencomputer sonst immer verbindet, sind die Warnungen, sie könnten die Verschlüsselung im Internet knacken.**

Ach, daran sind wir gar nicht interessiert. Wie Sie schon sagten, geht es dabei im Kern darum, mit Hilfe des Shor-Algorithmus die Primzahlteiler von großen Zahlen zu finden, also um eine Faktorisierung. Das ist für herkömmliche Rechner ziemlich schwierig oder genauer gesagt bisher unmöglich, weshalb das im Internet weit verbreitete RSA-Verschlüsselungssystem darauf basiert. Aber Informatiker haben auch schon andere Verschlüsselungstechnik entwickelt, die resistent gegen Angriffe von Quantencomputern ist.

#### LINEAR 9 QUBITS

**Eine neuere Variante des Quantencomputers von John Martinis besteht aus neun nebeneinander angeordneten, supraleitenden Qubits: In den 0,5 Millimeter großen, auf 20 Millikelvin abgekühlten Kreuzen bewegen sich Elektronen, deren kollektive Bewegungsrichtung den Werten 0 beziehungsweise 1 entspricht. Leitungen unterhalb der Kreuze dienen dazu, die Qubits mit Mikrowellenpulsen anzusteuern. Oben sind sie mit Resonatoren verbunden, über welche die Zustände ausgelesen werden.**



**Das alles müssten Sie aber auch sagen, wenn Sie die Primzahlzerlegung schon hinbekommen hätten, Ihren Vorteil aber noch lange geheim halten wollen. Interessiert Sie das mit der Verschlüsselung wirklich nicht?**

Ich arbeite lieber an Fragestellungen, die eine wichtige Bedeutung für die Gesellschaft haben.

**Wie groß müsste ein Quantencomputer denn sein, um die für die RSA-Entschlüsselung nötige Faktorisierung zu bewältigen?**

Er bräuchte vermutlich 300 Millionen Qubits. Vor allem für die Korrektur von Fehlern. Sehen Sie, mit 100 Qubits könnte man in der Quantenchemie schon etwas anfangen. Aber auch da braucht man eine Million Qubits, wenn man alle Fehler ausbügeln will.

**100 Qubits machen die Arbeit und der Rest kontrolliert alles?**

So ist es. Darum ist es ja so ein großes Problem. Wir sind in dieser Hinsicht von klassischen Computern verwöhnt. Im Quantencomputer macht jedes einzelne Qubit zwar nur wenige Fehler, aber es macht

eben welche. Und wenn man die Fehlerrate auf eins zu einer Billion oder Billiarde drücken will, braucht man viele zusätzliche Qubits.

**Die Kraft des Quantencomputers besteht darin, Superpositionen von möglichen Zuständen zu bewahren und zu verarbeiten. Aber wenn Sie am Ende des Prozesses das Ergebnis haben möchten, müssen Sie die Qubits zwingen, sich zu entscheiden. Im Jargon der Physiker: Die Wellenfunktion kollabiert. Um Fehler festzustellen, die Sie dann korrigieren wollen, müssen Sie das aber auch tun. Stört das nicht die Rechnung?**

Deswegen brauchen wir so viele Qubits für die Fehlerkorrektur. Diese liegen sozusagen am Rand, und wir können sie auslesen und daraus darauf schließen, was im Kern passiert, ohne dort direkt einzugreifen und so die Rechnung zu stören. Aber wir arbeiten auch an Ideen, wie wir eine Million Qubits zusammenbauen sollten. Zunächst überlegen wir uns, wie wir Algorithmen entwickeln, die gegenüber Fehlern tolerant sind und was wir schon mit Geräten anfangen können, in denen Fehler nicht vollständig korrigiert werden.

**Was nützt eine Berechnung, von der Sie annehmen müssen, dass sie Fehler enthält, aber Sie wissen nicht, wo sie sind?**

Lassen Sie mich dazu ein Beispiel nennen. Wir haben vor zwei Jahren den einfachen Versuch gemacht, die Energieniveaus des Wasserstoffmoleküls zu berechnen; es war eine Kalkulation mit Fehlern. Das Verfahren zur Auswertung aber, ein so genannter Variational Quantum Eigensolver, war nicht besonders anfällig für Fehler, und so konnten wir die Energieniveaus bis zu jener chemischen Präzision berechnen, die man braucht, um realistische Vorhersagen über die Reaktionsraten zu machen.

**Soll also in Zukunft die Software die Fehlerkorrektur übernehmen, nicht die Hardware?**

Ich denke, es wird eine Kombination aus beidem sein. Das ist ein offenes Feld für die Forschung, aber es wäre wichtig, in Zukunft auch die Fehlerrate der Qubits selbst senken und die Fehlerkorrektur auf dieser Ebene verbessern zu können.

**Ihr Arbeitgeber Google will demnächst einen Zugriff auf den Quantencomputer über die Cloud anbieten. Heißt das, dass**

### **ich dann meine Berechnungen auf Ihrem Gerät machen lassen kann?**

Das ist der Plan. Sie können sich um Rechenzeit bewerben und Qubit-Algorithmen ablaufen lassen. Wir bereiten die Schaltkreise und die Kompilierung vor, also die Übersetzung der Instruktionen bis auf die Maschinenebene. Nutzer aus der Industrie müssen vermutlich für den Zugriff etwas bezahlen. Die Firmen D-Wave und IBM machen das ja schon sehr erfolgreich, aber bei uns soll der Supremacy-Chip über die Cloud erreichbar sein. Es geht schließlich um einen Quantencomputer, den Sie nicht auf Ihrem Laptop simulieren könnten.

**War es gut, dass sich Firmen wie Google so auf dieses Feld gestürzt haben? Ein bisschen erinnert mich die Lage an die Situation im Jahr 2000, als das menschliche Genom entziffert wurde. Daran hatten öffentlich finanzierte Forscher lange gearbeitet. Dann kamen Craig Venter und seine Firma Celera Genomics – und plötzlich ging es ganz schnell.**

Ich arbeite ja seit drei Jahren neben meiner Forschungsgruppe an der University of California für Google. Zum Glück sind die

Labore in Santa Barbara. Mein Team ist jetzt nicht viel größer, aber wir können fokussierter arbeiten und uns schneller bewegen. Wir haben zum Beispiel zwei Jahre damit verbracht, die Technologie so auszulegen, dass wir schnell die Zahl der Qubits erhöhen können. Das ist in der Industrie einfacher. Aber wir müssen natürlich immer noch beweisen, dass unsere Ideen funktionieren.

**Kann Europa in Sachen Quantenkommunikation noch mithalten? Hier gibt es keinen Internetgiganten wie Google, der massiv in die Technologie investiert.**

Es gibt da interessante kulturelle Unterschiede. Die Ideen und Konzepte der europäischen Forschung haben viel mit Einstein zu tun, seiner »spukhaften Fernwirkung«, also der Verschränkung, und mit solchen Forschern wie John Bell und Anton Zeilinger. Die Amerikaner sind viel mehr von Richard Feynmann inspiriert, der gesagt hat: Lasst uns einen Quantencomputer bauen, um damit Probleme zu lösen. ↪

Die Fragen stellte Christopher Schrader, Physiker und Wissenschaftsjournalist in Hamburg.

(Spektrum der Wissenschaft, Februar 2018)

Spektrum  
der Wissenschaft

# KOMPAKT

## THERMO-DYNAMIK

Von Ordnung und Unordnung

Zweiter Hauptsatz | Wie aus Chaos Ordnung entsteht  
Stabile Verbindungen | Heute kochen wir Elemente-Suppe!  
Zeitkristalle | Bizarre Materie in endloser Schwingung

HIER DOWNLOADEN

FÜR NUR  
€ 4,99



BRISTLECONE

# Google enthüllt bisher größten **Quantencomputer**

von Lars Fischer

72 Qubits interagieren im supraleitenden Quantenrechner Bristlecone. Damit könnte das Gerät klassische Computer überflügeln – aber noch macht es wohl zu viele Fehler.

**72** Quantenbit besitzt der neue weltgrößte Quantencomputer Bristlecone, den Google-Ingenieur Julian Kelly am 5. März auf dem März-Meeting der American Physical Society vorstellte. Mit dem Gerät nähert sich Google weiter der angestrebten »Quanten-Überlegenheit« an – jenem Punkt, an dem Quantencomputer Berechnungen ausführen, die jenseits der Möglichkeiten selbst der besten Supercomputer liegen. Das Gerät basiert auf einem älteren Gerät mit neun Qubits, das ein Google-Team 2016 konstruierte, um zu zeigen, dass so ein Gerät mit relativ geringer Fehlerrate Berechnungen durchführen kann. Allerdings hat die neue 72-Qubit-Maschine bisher noch nicht gezeigt, was sie kann – und es wird wohl eine Weile dauern, bis ihre tatsächliche Leistungsfähigkeit bekannt ist. Bristlecone besteht aus einem

supraleitenden Array von Qubits. Das größte Problem dabei ist nicht so sehr, ein Quantensystem mit vielen Qubits zu konstruieren, sondern die Fehlerrate, die die Ergebnisse potenziell unzuverlässig macht. Der Neun-Qubit-Vorgänger von Bristlecone hatte eine Fehlerrate von etwa 0,6 Prozent bei logischen Operationen mit zwei Qubits, den Quantengattern – dieses Rauschen in den Ergebnissen muss noch geringer werden, bevor ein Quantencomputer wirklich leistungsfähiger ist als klassische Rechner. Hier ist eines der Probleme das Ziel, das man erreichen möchte: Bisher überprüft man die Zuverlässigkeit der Quantenrechnungen anhand von Simulationen auf einem klassischen Supercomputer. Das allerdings geht bei Erreichen der »Quanten-Überlegenheit« per Definition nicht mehr. ↩

(Spektrum.de, 06.03.2018)

Spektrum  
der Wissenschaft

KOMPAKT

## THEMEN AUF DEN PUNKT GEBRACHT



UND ÜBER 160 WEITERE AUSGABEN

ZUR ÜBERSICHT

WHICH ARE  
THE NEXT  
WALLS  
TO FALL?

FALLING  
WALLS

WHICH ARE  
THE NEXT  
WALLS  
TO FALL?

FALLING  
WALLS

FALLING  
WALLS

FALLING  
WALLS

FALLING  
WALLS

FALLING  
WALLS

QUANTENKOMMUNIKATION

# »Ich bin froh über meine Rückkehr nach China«

von Christopher Schrader

Jian-Wei Pan ist das Mastermind hinter Chinas Quantensatelliten »Micius«. Ein Gespräch über Physikexperimente zwischen Mond und Erde, die Verschlüsselungstechnik der Zukunft und eine folgenreiche europäisch-chinesische Abmachung.



**D**er Chinese Jian-Wei Pan zählt weltweit zu den führenden Quantenphysikern, die Wissenschaftszeitschrift »Nature« kürte ihn jüngst zu einem der zehn wichtigsten Forscher des Jahres 2017. Pan hat lange in Deutschland geforscht, ist jedoch schließlich an die University of Science and Technology of China zurückgekehrt. Dort realisierte der 47-Jährige den Quantensatelliten »Micius«, der 2017 wiederholt Schlagzeilen machte, denn unter anderem konnte Pans Team damit Lichtteilchen über eine Rekordreichweite von 1200 Kilometern verschränken. Langfristig soll die auf dem Satelliten getestete Technik unser Informationswesen revolutionieren – außerdem könnte sie wichtige Tests der Grundlagenphysik ermöglichen. »Spektrum.de« sprach mit Pan am Rande der Falling-Walls-Konferenz im November in Berlin.

**Spektrum.de:** Herr Professor Pan, als Sie vor einigen Jahren nach China zurückkehrten, blieben Ihre Frau und Ihre beiden kleinen Kinder zunächst noch in Deutschland. Stimmt es, dass Sie Ihren Kindern damals per Skype Märchen er-

**zählt haben, in denen es um Ihre Arbeit ging?**

Jian-Wei Pan: Meine Kinder sind beide in Deutschland geboren. Ich habe die Geschichten beim Erzählen erfunden und jeden Tag weitergesponnen. Meine ganze Familie hatte Hauptrollen. Wir konnten auf verschiedene Planeten im und außerhalb des Sonnensystems reisen und so das Universum erkunden.

**Konnten Sie sich überallhin teleportieren oder »beamen«, wie es in den Fernsehserien um das Raumschiff Enterprise heißt?**

Nein, in meinen Geschichten funktionierte es besser als im Fernsehen. Auf der Enterprise muss die Besatzung dafür ja in eine große Kammer gehen, den Transporterraum. Wir hatten einen Beutel mit magischem Werkzeug. So konnten wir einfach einen magischen Stein nehmen und werfen – und dann kamen wir sofort dort an, wo wir hinwollten.

**In der Realität können das allenfalls so genannte Photonen, mit denen Sie sich seit Jahrzehnten intensiv beschäftigen. Zuletzt haben Sie an Ihrem Institut in China mit diesen Lichtteilchen beein-**



**JIAN-WEI PAN**

Der 47-Jährige gilt als führender Quantenphysiker Chinas. Seinen Master machte er 1995 an der University of Science and Technology of China (USTC), 1999 promovierte er an der Universität Wien. Von 2003 an forschte Pan an der Universität Heidelberg. Parallel dazu arbeitete er als Professor an der USTC, wohin er letztlich zurückkehrte und von wo aus er das chinesische Quantensatellitenprojekt Micius umsetzte.

MIT FÖDL, GEN. VON JIAN-WEI PAN

**druckende Sachen angestellt und veröffentlichten nun fast monatlich Arbeiten in prestigeträchtigen Fachzeitschriften. War es also die richtige Entscheidung, nach China zurückzukehren?**

Ja, ich bin sehr froh über meine Rückkehr. Einerseits bin ich Wissenschaftler und möchte Forschung auf dem höchsten Niveau betreiben. Andererseits liebe ich mein Land. Wenn ich beides verbinden kann, ist das die beste Lösung. In der Tat unterstützen die Chinesische Akademie der Wissenschaften und die Regierung meine Forschung und meine Gruppe sehr gut. So konnten wir auch den Micius-Satelliten starten, der Experimente zur Quantenverschlüsselung, Quantenverschränkung und Quantenteleportation erlaubt. Der chinesische Staat legt zunehmend Wert auf wissenschaftliche Forschung.

**Was ist an dieser Arbeit so wichtig?**

**Warum investiert China so viel Geld?**

Wenn man mit Quantensystemen Codes für die Verschlüsselung austauscht, dann kann das niemand mehr unbemerkt abhören. Die Information steckt in der Polarisation (*Anm. d. Red.:* der Schwingungsrichtung) eines Stroms von Lichtteilchen. Jeder,

der versucht, den Code abzufangen, fällt sofort auf. Wir können damit also die Privatsphäre schützen, denn nur dann haben die Menschen die Freiheit zu denken und zu sprechen, zu schreiben und zu lesen.

»Die Wissenschaft gehört allen Ländern, nicht nur einem«

**Die Regierung in China steht nicht gerade im Ruf, dass sie ihren Bürgern eine uneingeschränkte Privatsphäre und geschützte Kommunikation ermöglichen möchte.**

Als chinesische Wissenschaftler versuchen wir, die nationale Sicherheit zu garantieren. Die Geräte bei den Banken oder in der Flugkontrolle stammen alle von amerikanischen Unternehmen. Wir wissen nicht, ob sie stets richtig arbeiten. Da ist es doch gut, wenn wir eine zusätzliche Methode benutzen, um uns zu schützen. Das wird in der Zukunft auch deswegen besonders wichtig sein, weil wir uns mit allem verbinden, zum Beispiel beim Autofahren oder bei Bankgeschäften.

**Sieht China die Quanteninformationstechnik als Zukunftsmarkt, auf dem es dann die technologische Führung hat?**

Für mich ist erst einmal wichtig zu zeigen, dass das Verfahren funktioniert. Unser Satellit steht auch Kollegen in Deutschland, Italien, Österreich, Russland und Singapur offen. Wir wollen demonstrieren, dass die Technologie universell verwendbar ist und ebenfalls in anderen Bodenstationen genutzt werden kann. So bewegen wir uns in Richtung eines globalen Netzwerks für Quantenkommunikation.

**Sind die Physiker in Europa, insbesondere die Gruppe um Ihren Doktorvater Anton Zeilinger in Wien, nicht vor allem wissenschaftliche Konkurrenten?**

Nein, wir arbeiten eng zusammen. Wir haben vor zehn Jahren verabredet: Wenn wir schneller vorankommen, öffnen wir unsere Experimentierplattform für die Österreicher, und umgekehrt. Wir haben Glück gehabt, aber die Europäer haben auch viele Ressourcen, zum Beispiel eine Bodenstation auf den Kanarischen Inseln. Sehen Sie, die Wissenschaft gehört doch allen Ländern, nicht nur einem.

**QUANTENSATELLIT MICIUS ÜBER ÖSTERREICH**  
Die Bodenstation am Observatorium Lustbühel in Graz tauschte 2017 mit dem chinesischen Satelliten Micius Lichtteilchen aus.

JOHANNES HANDSTEINER / ÖSTERREICHISCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN (ÖAW)

**Es bleiben aber große Investitionen, die nötig sind.**

Ja, der Start des Micius-Satelliten hat 400 Millionen chinesische Yuan gekostet, das sind ungefähr 50 Millionen Euro. Wir hoffen, die Kosten demnächst mindestens um einen Faktor zehn zu senken. Dann können wir in den kommenden fünf Jahren noch fünf, sechs oder sieben weitere Quantensatelliten in die Erdumlaufbahn schicken, wo sie dann in einer Konstellation zusammenarbeiten. Wenn das klappt, können wir möglichen Benutzern schon einen wirklichen Service anbieten.

**Warum brauchen Sie überhaupt Satelliten für Ihre Experimente?**

Die Photonen, die wir nutzen, können zwar auch durch optische Fasern laufen, aber sie werden sehr stark abgeschwächt. Mehr als einige hundert Kilometer lang kann die Verbindung dann nicht sein. Wollte man die Signale 1000 Kilometer weit schicken, und man würde auf der einen Seite mit einer Frequenz von zehn Gigahertz Photonen einspeisen, also zehn Milliarden Lichtteilchen pro Sekunde, dann käme alle 300 Jahre eines intakt auf der anderen Seite an.

**Aber Telefongespräche und Internetdaten dringen doch auch problemlos durch Ozeankabel, die sogar viele tausend Kilometer lang sind.**

Diese klassischen Signale sind digitalisiert und können unterwegs immer wieder verstärkt werden. Das geht aber bisher nicht, wenn es sich um Quanteninformationen handelt oder der Code eine Abfolge von polarisierten Lichtteilchen in überlagerten Zuständen ist. Obwohl da viel Arbeit investiert wird, ist es immer noch eine große Herausforderung, einen entsprechenden Repeater zu bauen. Aber es ist eine viel versprechende Abkürzung, wenn ich die Signale zu einem Satelliten im Orbit schicke. Dann laufen die Photonen den größten Teil des Wegs durch das Vakuum des Weltraums, wo es praktisch keine Abschwächung und keine Turbulenzen gibt. So können wir Quanteninformation zwischen Punkten auf der Erde verschicken, die einige tausend, nicht nur einige hundert Kilometer voneinander entfernt sind.

**Was war bisher die längste Verbindung?**

In China können zwei Bodenstationen in 1200 Kilometern Entfernung gleichzeitig Signale des Satelliten empfangen, also

auch einen gemeinsamen Quantencode. Außerdem haben wir im September 2017 eine Videokonferenz mit unseren Kollegen von der Österreichischen Akademie der Wissenschaften in Wien gemacht. Sie war mit einem Code verschlüsselt, den wir mit Hilfe des Micius-Satelliten ausgetauscht haben. Letztlich haben wir so über eine Entfernung von 7600 Kilometern quantenverschlüsselt kommuniziert.

**Wie genau funktioniert die Übertragung durch den Satelliten?**

Der Satellit fliegt jeden Tag ungefähr um Mitternacht in 500 Kilometern Höhe über die eine oder andere Stadt, oder genauer gesagt über die jeweilige Bodenstation irgendwo in den Bergen. Er ist dann 300 Sekunden in Reichweite und erzeugt per Photonenübertragung mit beiden Teams jeweils einzeln einen Code. Die Codes der beiden Teams werden dann mit einer so genannten XOR-Operation kombiniert, um die Videokonferenz zu verschlüsseln. Der Kontakt mit dem Satelliten hat zunächst nur nachts geklappt, weil tagsüber das Sonnenlicht die Signale überstrahlt hat. Ein Test am Boden in Qinghai hat uns aber gezeigt, dass wir Infrarotwellen mit ei-

»Vor 25 oder 30 Jahren wogen Mobiltelefone noch ungefähr ein Kilogramm – da sind wir jetzt ungefähr«

[Jian-Wei Pan]

ner Wellenlänge von 1550 statt 800 Nanometern benutzen können, um auch am Tag Experimente zur Quantenkommunikation zu machen.

### **Wie lang muss der Schlüssel sein, um wirklich sicher zu sein?**

Das kommt darauf an, welches Niveau der Sicherheit Sie haben wollen. Wenn es abso-

lut unknackbar sein soll, dann benutzt man für jedes Bit an Information einen eigenen Schlüssel; das heißt dann »one-time pad«. Das bedeutet, der Schlüssel muss mit einer Frequenz von mehreren Kilohertz erzeugt werden, mehreren tausend Bits pro Sekunde, um ein Telefongespräch abzusichern. Das schafft der Micius-Satellit schon. Aber bisher eben nur fünf Minuten lang,

solange er in Reichweite einer Bodenstation ist. Wenn man die Quantenverschlüsselung aber mit klassischen Methoden verknüpft, der AES-Kodierung, dann reichen 128-Bit-Schlüssel für ganze Datenpakete einer Videokonferenz. Das ist im Moment noch sicher genug.

### **Wenn Sie den momentanen Stand der Quantenkommunikation mit der Entwicklung des Telefons vergleichen, wo stehen wir zurzeit?**

Vor 25 oder 30 Jahren wogen Mobiltelefone noch ungefähr ein Kilogramm und waren so teuer, dass kaum jemand sie sich leisten konnte. Da sind wir jetzt ungefähr. Aber es geht schnell voran. In einigen Jahren könnte die Quantenverschlüsselung

### **QUANTENVERSCHLÜSSELTE VIDEOKONFERENZ**

**Der Quantenphysiker Anton Zeilinger, Präsident der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, bei einer »quantenverschlüsselten« Videokonferenz zwischen Wien und Peking im September 2017. In der Hand hält Zeilinger (Mitte) ein Modell des Micius-Satelliten.**



schon von Banken, Regierungen oder Bot-schaften benutzt werden. Und in 15 Jahren haben vielleicht auch normale Leute wie Sie und ich einen Chip im Smartphone, der die Technik nutzt.

### **Bekommen wir dann auch ein Quanteninternet?**

Das ist etwas anderes. Der Chip im Smart-phone würde es erlauben, dass wir klassi-sche Informationen absolut vertraulich austauschen, weil die Verschlüsselung zwischen Sender und Empfänger mit Me-thoden der Quantenphysik etabliert wird. Im Quanteninternet geht es hingegen da-rum, quantenmechanische Informatio-nen auszutauschen und zu verarbeiten. Ich würde Ihnen also den Quantenzu-stand eines Teilchens mit seinen mögli-chen Superpositionen schicken, Sie könn-ten ihn weiterverarbeiten und das Ergeb-nis zurücksenden. Dafür braucht man die Teleportation und die quantenmechani-sche Verschränkung von Teilchen. Das ist das, was Einstein »spukhafte Fernwir-kung« nannte.

### **Können Sie uns erklären, was genau damit gemeint ist?**

Stellen Sie sich ein paar Würfel vor, die so gekoppelt sind, dass sie immer die glei-che Augenzahl zeigen, auch wenn sie sehr weit voneinander entfernt sind. Werfe ich den einen, springt der andere auf den glei-chen Wert, und zwar schneller, als ein Sig-nal mit Lichtgeschwindigkeit vom einen zum anderen Ort bräuchte.

### **Das haben Sie mit dem Micius-Satelliten auch schon erprobt, oder?**

Ja, wir haben vom Satelliten aus ein Paar verschränkter Photonen zu zwei verschie-den Bodenstationen geschickt, die 1200 Kilometer von einander entfernt lagen. Sie waren noch immer verschränkt. Und dann haben wir in der Bodenstation Ngari in Ti-bet Paare von verschränkten Photonen er-zeugt, jeweils eines der beiden zum Satelli-ten geschickt, und dann damit den Quan-tenzustand eines dritten Teilchens vom Boden nach oben übertragen. Das ist aber noch Grundlagenforschung.

### **Was wollen Sie damit herausbekommen?**

Letztlich wollen wir Satelliten nicht nur da-für nutzen, um weltweit sichere Quanten-kommunikation bereitzustellen. Wir wol-len im Weltall auch Experimente durch-

führen, bei denen es um die Grundlagen der Physik geht. Es gibt beispielsweise noch mögliche Schlupflöcher in der berühmten Debatte zwischen Einstein und Bohr, bei der es um die richtige Interpretation der Quantenphysik ging.

### **Einstein wollte unter anderem nicht an den Zufallscharakter der Quantenme-chanik glauben und verspottete die heu-te weit verbreitete Interpretation der Verschränkung zweier Teilchen mit sei-nem Begriff der »spukhaften Fernwir-kung«. Was können Sie mit Ihren Expe-riimenten zu dieser Debatte beitragen?**

Da ist zum Beispiel das so genannte »free-dom-of-choice«-Schlupfloch. Der Gedanke dahinter ist, dass Geräte, die zufällig pola-risierte Photonen für Quantenschlüssel er-zeugen, rein theoretisch eine gemeinsame Vergangenheit haben könnten.

**In der Vergangenheit könnte also etwas geschehen sein, das das scheinbar korre-lierte Verhalten zweier verschränkter Photonen erklärt. Dadurch müsste man keine »spukhafte Fernwirkung« mehr bemühen, und Einstein wäre rehabili-tiert. Erst Anfang 2017 haben Ihre Wie-**

**ner Kollegen dazu ein spektakuläres Experiment präsentiert. Gibt es denn noch andere Schlupflöcher?**

Ja, das »collapse locality loophole«, bei dem es darum geht, dass der Ausgang einer Messung erst dann feststeht, wenn es vom menschlichen Bewusstsein registriert wird. Um diesen Fragen auf den Grund zu gehen, könnte ein Quantensatellit wie Micius im geostationären Orbit operieren und von dort miteinander verschränkte Photonen zum Mond und zur Erde senden.

**Gibt es sonst noch Experimente, von denen Sie träumen?**

Ein spannendes Gebiet ist das der Quantengravitation, also die Interaktion zwischen der Quantenphysik als Domäne des Allerkleinsten und der allgemeinen Relativitätstheorie als Reich des Allergrößten. Es gibt die Vermutung, dass die Schwerkraft der Quantenkommunikation ein Limit auferlegen könnte. Mit einer experimentellen Plattform im Weltall können wir dieser Frage vielleicht nachgehen. ↩

**Vielen Dank für das Gespräch.**

(Spektrum – Die Woche, 51/2017)



**Spektrum**  
der Wissenschaft

# KOMPAKT

# DUNKLE MATERIE

## Die Suche nach dem Unsichtbaren

Spurensuche | Auf der Jagd nach Mr. Axion  
Quantenzustand | Dunkle Materie – eine Supraflüssigkeit?  
Antimaterie | Neue Hoffnung für Materiejäger

HIER DOWNLOADEN

FÜR NUR  
€ 4,99

LUKASKUBO / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

QUANTENCOMPUTER

# Weitere Aussichten: **Durchwachsen**

von Philip Ball



Erwarten Sie die »Quantenüberlegenheit« noch 2018: Dann wird erstmals ein Quantencomputer schneller sein als ein Supercomputer.

Doch was bedeutet dieser Meilenstein wirklich?

Nach Jahrzehnten schwerer Schinderei ohne Aussicht auf Erfolg brummt die Forschung an Quantencomputern vor fiebriger Erregung und Aktivität. Vor knapp zwei Jahren machte IBM der Welt einen Quantencomputer zugänglich: den inzwischen IBM Q Experience genannten 5-Qubit-Rechner. Qubit steht für Quantenbit, die Informationseinheit der Quantencomputer. Er schien zunächst eher ein Spielzeug für Forscher zu sein als für ernsthafte Rechenaufgaben geeignet. Doch 70 000 Nutzer haben sich weltweit angemeldet, und die Zahl der Qubits des Quantencomputers wurde inzwischen vervierfacht. In den vergangenen Monaten haben IBM und Intel angekündigt, dass sie Quantencomputer mit 50 und mit 49 Qubits gebaut hätten. Und vermutlich hat auch Google einen ähnlichen Quantencomputer in Arbeit. »Es gibt eine Menge Energie in diesem Forschungsbe-

reich, und der jüngste Fortschritt ist immens«, sagt Jens Eisert, Physiker an der FU Berlin.

Und inzwischen spricht man über eine »Quantenüberlegenheit«, über den Augenblick, in dem ein Quantencomputer bei der Ausführung einer Aufgabe die besten klassischen Supercomputer übertrifft. Bei einem Blick auf die Zahlen erscheint das absurd: 50 Qubits gegenüber Milliarden von klassischen Bits in jedem Laptop. Doch das Entscheidende bei einem Quantencomputer ist eben, dass ein Quantenbit viel, viel mehr zählt als ein klassisches Bit. 50 Qubits galten lange als die Mindestgröße, ab der Quantencomputer Berechnungen durchführen könnten, die auf klassischen Computern eine undurchführbar lange Zeit benötigen würden. Mitte 2017 verkündeten Forscher von Google, sie hofften, bis Ende des Jahres die Quantenüberlegenheit zu erreichen. Jüngst um eine Aktualisierung gebeten, kommentierte ein Goo-



Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und redigierte Fassung des Artikels »The Era of Quantum Computing Is Here. Outlook: Cloudy« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.

gle-Sprecher: »Wir hoffen, so schnell wie möglich Ergebnisse zu verkünden, aber wir überprüfen die Arbeit noch einmal in allen Einzelheiten, um sicherzugehen, dass wir ein solides Ergebnis haben, bevor wir es bekannt geben.«

Es liegt nahe, daraus den Schluss zu ziehen, die grundlegenden Probleme seien im Prinzip gelöst und der Weg zu allgegenwärtigen Quantencomputern sei jetzt nur noch eine Angelegenheit der Ingenieure. Doch das wäre ein Fehler. Die fundamentale Physik der Quantencomputer ist weit von einer Lösung entfernt und lässt sich nicht von den Anwendungen trennen. Selbst wenn wir in Kürze den Meilenstein Quantenüberlegenheit erreichen und sogar hinter uns lassen sollten, wird sich erst in den kommenden ein, zwei Jahren zeigen, ob Quantencomputer tatsächlich die Computertechnik revolutionieren. Es ist immer noch alles offen, und es gibt keine Garantie dafür, dass das große Ziel in greifbare Nähe kommt.

### **Mund halten und rechnen**

Sowohl die Vorteile als auch die Herausforderungen der Quantencomputer haben ihre Ursache in eben der Physik, welche die

Quantencomputer überhaupt möglich macht. Die grundlegende Geschichte wurde oft genug erzählt, aber nicht immer mit den Feinheiten, welche die Quantenmechanik erfordert. Klassische Computer kodieren und manipulieren Informationen als Folge binärer Ziffern, also Nullen und Einsen. Quantencomputer machen dasselbe, nur dass ihre Informationseinheiten, die Qubits, sich in einer Superposition der Zustände 0 und 1 befinden können. Das bedeutet: Eine Messung des Zustands eines Qubits liefert mit einer wohldefinierten Wahrscheinlichkeit entweder 0 oder 1.

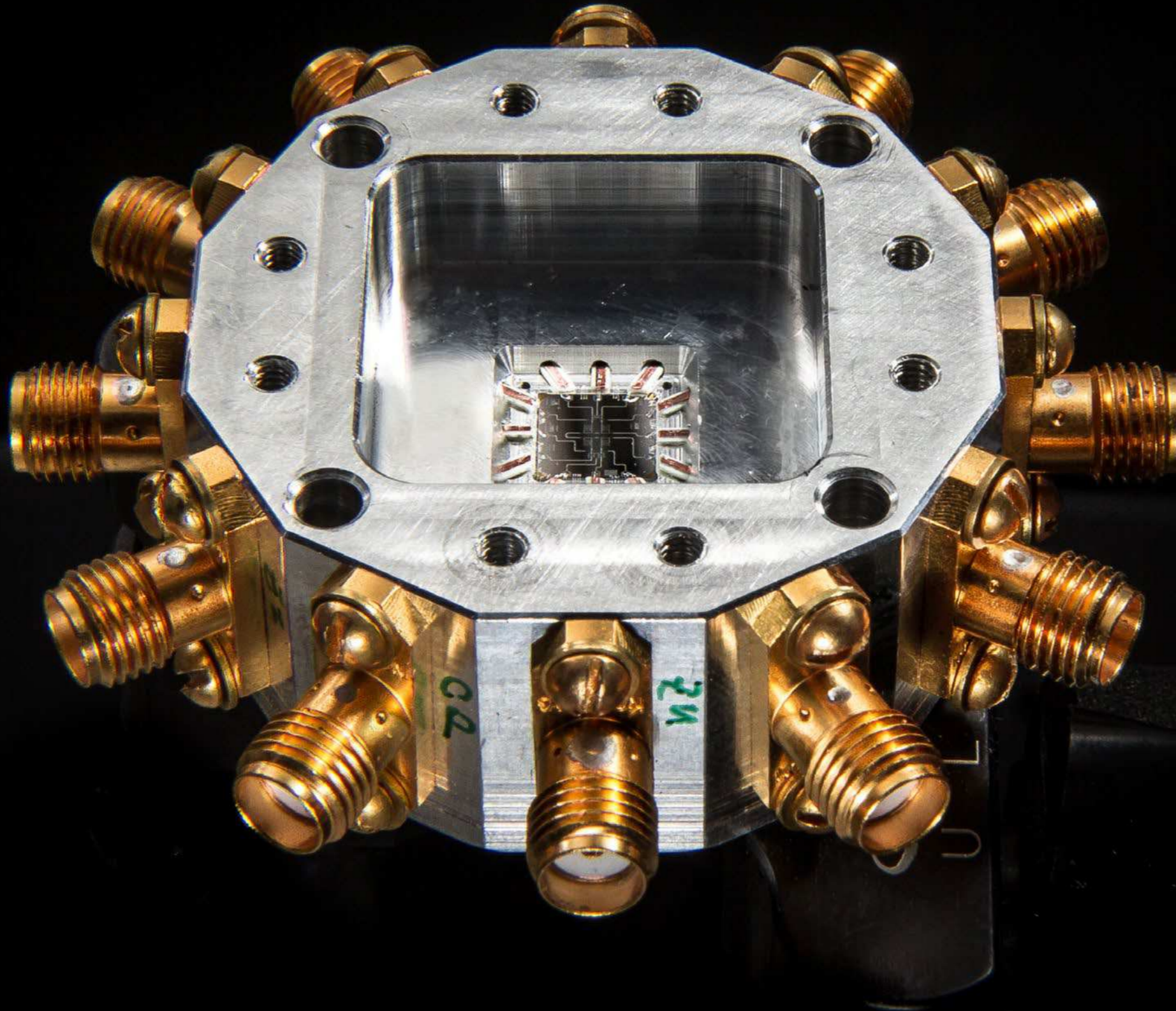
Um eine Berechnung mit vielen Qubits durchzuführen, müssen sich diese ununterbrochen in voneinander abhängigen Superpositionen von Zuständen befinden – einem »quantenkohärenten« Zustand, in dem die Qubits miteinander verschränkt sind. Dann nämlich beeinflusst die Änderung eines Qubits zugleich alle anderen. Das bedeutet, Rechenoperationen mit Qubits zählen mehr als solche mit klassischen Bits. Bei klassischen Computern wächst die Rechenleistung einfach proportional mit der Anzahl der Bits. Doch bei Quantencomputern verdoppelt sich die Rechenleistung mit jedem zusätzlichen Qubit. Deshalb ist

»Wenn genug Quantenmechanik zur Verfügung steht, in einem bestimmten Sinn, dann gehen die Berechnungen schneller. Sonst eben nicht«

[Daniel Gottesman]

## SUPRALEITENDES QUBIT

Ein supraleitender Quantencomputerchip  
der Google-Forscher um John Martinis.



der Unterschied zwischen einer Maschine mit 5 und einer mit 50 Qubits so gewaltig.

Oft liest man, der Vorteil der Quantencomputer liege darin, dass die Verfügbarkeit von Superpositionen die Anzahl der kodierbaren Zustände im Vergleich zu klassischen Bits gewaltig vergrößere. Oder dass die Verschränkung es erlaube, viele Berechnungen parallel durchzuführen. Beide Aussagen enthalten – manchmal – ein Körnchen Wahrheit. Aber beide treffen nicht die Essenz der Quantencomputer. So ist ein hoher Grad von Verschränkung keineswegs entscheidend für Quantencomputer. Es ist nicht einfach, qualitativ auszudrücken, warum Quantencomputer so mächtig sind – und zwar aus demselben Grund, aus dem es so schwer ist, auszudrücken, was die Quantenmechanik überhaupt bedeutet. Die Gleichungen der Quantentheorie zeigen zwar, dass es funktioniert: Zumindest bestimmte Arten von Berechnungen wie beispielsweise die Faktorisierung oder das Durchsuchen von Datenbanken kann ein Quantencomputer erheblich schneller durchführen als ein klassischer Rechner. Aber was ist nun wirklich der Grund dafür?

Die vielleicht sicherste Beschreibung der Arbeit eines Quantencomputers ist die

Aussage, dass die Quantenmechanik auf irgendeine Art und Weise eine Ressource für Berechnungen zugänglich macht, die klassischen Geräten nicht zur Verfügung steht. Der Quantentheoretiker Daniel Gottesman vom Perimeter Institute im kanadischen Waterloo drückt es so aus: »Wenn genug Quantenmechanik zur Verfügung steht, in einem bestimmten Sinn, dann gehen die Berechnungen schneller. Sonst eben nicht.«

Doch ein paar Dinge sind immerhin klar. Um Quantenberechnungen durchzuführen, müssen alle Qubits kohärent sein. Und das ist nicht einfach. Die Wechselwirkung eines Systems quantenkohärenter Objekte mit seiner Umgebung schafft Pfade, über welche die Kohärenz gewissermaßen ausläuft, ein als Dekohärenz bezeichneter Prozess. Will man einen Quantencomputer bauen, so muss man die Dekohärenz verhindern – und das schaffen die Forscher derzeit nur für Bruchteile von Sekunden. Diese Herausforderung wächst zudem mit der Anzahl der Qubits. Das ist der Hauptgrund dafür, warum Quantencomputer, obwohl bereits 1982 von Richard Feynman vorgeschlagen und obwohl es bereits in den 1990er Jahren eine Theorie der Quantencomputer gab, erst jetzt in der

Lage sind, ernsthafte Berechnungen durchzuführen.

## **Schwer berechenbare Quantenfehler**

Es gibt noch einen zweiten fundamentalen Grund dafür, warum Quantencomputer schwer zu realisieren sind. Wie nahezu jeder Vorgang in der Natur rauschen Quantencomputer. Zufällige Fluktuationen durch die Wärme in den Qubits oder durch fundamentale quantenmechanische Prozesse führen dann und wann dazu, dass der Zustand eines Qubits umklappt oder völlig randomisiert wird – und das kann zu einem Fehler bei der Berechnung führen. Auch bei klassischen Computern gibt es dieses Problem, aber es lässt sich leicht lösen: Man hat einfach zwei oder mehr Kopien jedes Bits, so dass ein zufällig verändertes Bit auffällt und korrigiert werden kann.

Quantencomputer-Forscher haben sich eine Reihe von Strategien für den Umgang mit dem Rauschen ausgedacht. Doch all diese Strategien bringen eine hohe Last an zusätzlich nötigen Berechnungen mit sich – die gesamte Rechenleistung wird dann für die Korrektur der Fehler eingesetzt und nicht für die eigentliche Berech-

»Maschinen ohne Fehlerkorrektur sind sehr primitive Computer, und mit solchen primitiven Maschinen ist keine Überlegenheit möglich«

[Gil Kalai]

nung. »Die derzeitige Häufigkeit von Fehlern begrenzt die Länge von Berechnungen, die sich durchführen lassen«, sagt Andrew Childs, einer der Direktoren des Joint Center for Quantum Information and Computer Science der University of Maryland. »Wir müssen es erheblich besser machen, wenn wir etwas Interessantes berechnen wollen.«

Ein großer Teil der Forschung auf dem Gebiet der Quantencomputer wurde daher der Korrektur von Fehlern gewidmet. Ein Teil der Schwierigkeiten hat ihre Ursache dabei in einer anderen wichtigen Eigenschaft von Quantensystemen: Superpositionen lassen sich nur aufrechterhalten, bis man den Wert eines Qubits misst. Führt man eine Messung durch, so kollabiert die Superposition zu einem definierten Wert – entweder 1 oder 0. Wie soll man aber herausfinden, ob ein Qubit fehlerhaft ist, wenn man seinen Zustand nicht kennt?

Eine raffinierte Methode basiert darauf, das zu prüfende Qubit an ein weiteres »Hilfs-Qubit« zu koppeln. Dieses nimmt an den folgenden Berechnungen nicht teil und kann deshalb untersucht werden, ohne dass der Zustand des ursprünglichen Qubits auch kollabiert. Doch das lässt sich

nur schwer realisieren. Bei diesem Verfahren muss man, um ein echtes Qubit zu erzeugen, mit dem sich eine Berechnung samt Fehlerkorrektur durchführen lässt, viele physikalische Qubits einsetzen.

Wie viele? Etwa 10 000 der heutigen physikalischen Qubits wären nötig, um ein einziges logisches Qubit zu erhalten, schätzt der Quantentheoretiker Alán Aspuru-Guzik von der Harvard University – eine für die Praxis unmögliche Anzahl. Wenn die Qubits sich erheblich verbessern lassen, so der Forscher, reichen vielleicht ein paar tausend oder sogar einige hundert. Eisersert ist weniger pessimistisch. Seiner Ansicht nach könnten bereits heute etwa 800 physikalische Qubits ausreichen, aber selbst das sei »eine erhebliche Last«. Deshalb müsse man momentan Wege finden, mit fehleranfälligen Qubits zurechtzukommen.

Eine Alternative zur Fehlerkorrektur ist, solche Fehler entweder zu vermeiden oder ihren Einfluss auszuschalten. So entwickeln beispielsweise Forscher von IBM Verfahren, mit denen sich mathematisch herausfinden lässt, wie viele Fehler wahrscheinlich bei einer Berechnung aufgetreten sind. Dann lässt sich das Ergebnis ei-

ner Berechnung auf den theoretischen Grenzfall eines Quantencomputers ohne Rauschen extrapolieren.

Einige Forscher halten das Problem der Fehlerkorrektur für unlösbar – und denken deshalb, dass Quantencomputer niemals die hochgesteckten Erwartungen erfüllen werden. »Die Erschaffung fehlerkorrigierender Quantenkodes ist schwieriger, als Quantenüberlegenheit zu demonstrieren«, gibt der Mathematiker Gil Kalai von der Hebräischen Universität Jerusalem in Israel zu bedenken. »Aber Maschinen ohne Fehlerkorrektur sind sehr primitive Computer«, ergänzt er, »und mit solchen primitiven Maschinen ist keine Überlegenheit möglich.« Mit anderen Worten, solange Quantencomputer Fehler machen, werden sie niemals besser sein als klassische Computer.

Andere Forscher glauben jedoch, das Problem werde sich eines Tages lösen lassen. »Unsere jüngsten Experimente bei IBM zeigen die Basiselemente eines Quantenkorrektursystems für kleine Rechner«, erläutert der Quanteninformationsforscher Jay Gambetta vom Thomas J. Watson Research Center von IBM. »Das ebnet den Weg zu größeren Rechnern, in denen Qu-

bits trotz des vorhandenen Rauschens Quanteninformation zuverlässig und langfristig speichern können.« Trotzdem gibt er zu, dass »ein universeller fehlertoleranter Quantencomputer, der mit logischen Qubits arbeitet, noch in weiter Zukunft liegt«. Childs machen solche Entwicklungen vorsichtig optimistisch: »Ich bin sicher, dass wir verbesserte experimentelle Demonstrationen [von Fehlerkorrekturen] sehen werden. Aber ich denke, es wird eine Weile dauern, bis diese in wirklichen Berechnungen Verwendung finden.«

### Ein Leben mit Fehlern

In absehbarer Zeit bleiben Quantencomputer anfällig für Fehler – die Frage ist also, wie man mit diesen Fehlern leben kann. Bei IBM sprechen die Forscher von »approximiertem Quantencomputing« für die nahe Zukunft. Es geht darum, Methoden zu finden, um mit dem Rauschen umzugehen. Es sind fehlertolerante Algorithmen nötig, die trotz der auftretenden Fehler ein korrektes Ergebnis liefern. Die Aufgabe ähnelt ein wenig der Stimmenauszählung bei einer Wahl. Das Ergebnis soll stimmen, auch wenn einige wenige Stimmzettel falsch gezählt werden. »Eine genügend um-

fangreiche, sehr genaue Berechnung mit einem Quantencomputer sollte auch dann Vorteile [gegenüber einer Berechnung mit einem klassischen Computer] bieten, wenn sie nicht vollständig fehlertolerant ist«, sagt Gambetta.

Eine der ersten fehlertoleranten Anwendungen ist von größerem Wert für Wissenschaftler als für die Allgemeinheit: Es geht um Simulationen im atomaren Bereich. Genau diese mögliche Anwendung war es auch, die Feynman auf die Idee der Quantencomputer brachte. Die Gleichungen der Quantenmechanik bieten zwar einen Weg, die Eigenschaften eines Moleküls, also etwa eines neuen Medikaments zu beschreiben, also seine Stabilität und sein chemisches Reaktionsvermögen. Doch diese Gleichungen lassen sich klassisch nur mit einer Vielzahl von Vereinfachungen lösen.

Im Gegensatz dazu liegt das Quantenverhalten von Elektronen und Atomen »relativ nahe beim angeborenen Verhalten von Quantencomputern«, konstatiert Childs. Deshalb könne man ein exaktes ComputermodeLL eines Moleküls erstellen. Und Aspuru-Guzik ergänzt: »Viele Forscher auf diesem Gebiet, darunter auch ich, glauben, dass Quantenchemie und Material-

## KÜHLE RECHNER

Maschinenraum des Quantum Computing Center von IBM am Thomas J. Watson Research Center in Yorktown Heights. Die Quantencomputer befinden sich in großen Kühltanks (ganz rechts), wo sie auf eine Temperatur von knapp über dem absoluten Nullpunkt gekühlt werden.



wissenschaften zu den ersten Anwendungen solcher Geräte zählen werden.« Aspuru-Guzik versucht an vorderster Front, die Forschung über Quantencomputer in diese Richtung zu lenken.

Bereits auf den derzeit verfügbaren, sehr kleinen Quantencomputern beweisen Quantensimulationen ihren Wert. Ein Forscherteam, an dem Aspuru-Guzik beteiligt ist, hat einen Algorithmus entwickelt, den »variational quantum eigensolver« VQE (auf Deutsch etwa: Variationsmethode zur Berechnung von Eigenwerten mit Hilfe eines Quantencomputers), der effizient die niedrigsten Energiezustände von Molekülen finden kann – selbst mit verrauschten Qubits. Bislang lassen sich damit zwar nur sehr kleine Moleküle mit wenigen Elektronen behandeln, die auch klassische Computer akkurat simulieren können. Aber die Leistungsfähigkeit der Quantencomputer wächst, wie Gambetta und seine Mitarbeiter im vergangenen September zeigten, als sie mit einer 6-Qubit-Maschine von IBM die elektronischen Strukturen von Molekülen wie Lithiumhydrid und Berylliumhydrid berechneten. Diese Arbeit war »ein signifikanter Sprung vorwärts«, so der Physikochemiker Markus Reiher von der ETH

Zürich. »Die Verwendung von VQE für Simulationen kleiner Moleküle ist ein großartiges Beispiel dafür, was kurzfristig mit heuristischen Algorithmen möglich ist«, betont Gambetta.

Aspuru-Guzik gibt jedoch zu, dass selbst für diese Anwendung vermutlich logische Qubits mit Fehlerkorrektur nötig sind, damit Quantencomputer klassische Rechner übertreffen können. »Ich wäre wirklich begeistert, wenn Quantencomputer mit Fehlerkorrektur verwirklicht werden«, sagt er. »Wenn wir mehr als 200 logische Qubits hätten, könnten wir in der Quantenchemie Dinge tun, die mit Standardmethoden nicht möglich sind«, ergänzt Reiher. »Und wenn wir etwa 5000 solcher Qubits hätten, dann würden Quantencomputer dieses Forschungsgebiet völlig transformieren.«

### **Schnelles Wachstum weckt Hoffnungen**

Trotz der Herausforderungen, die zum Erreichung dieser Ziele zu überwinden sind, hat das schnelle Wachstum von 5 auf 50 Qubits innerhalb von kaum mehr als einem Jahr Hoffnungen geweckt. Aber man sollte sich nicht zu sehr auf diese Zahlen fixieren, denn sie sind nur ein Teil der Geschichte. Es geht nicht nur darum, wie vie-

le Qubits man hat. Wichtiger noch ist, wie gut diese Qubits und wie effizient die verwendeten Algorithmen sind.

Jede Quantenberechnung muss vollständig abgeschlossen sein, bevor die Dekohärenz eintritt und die Qubits zerstört. Die bisher erstellten Gruppen von Qubits haben typische Dekohärenzzeiten von einigen wenigen Mikrosekunden. Die Anzahl der logischen Operationen, die sich in diesem kurzen Augenblick durchführen lassen, hängt davon ab, wie schnell sich die Quantengatter schalten lassen – wenn sie zu langsam sind, kommt es nicht mehr darauf an, wie viele Qubits man zur Verfügung hat. Die Anzahl der Gatteroperationen, die für eine Berechnung nötig sind, wird als Tiefe der Berechnung bezeichnet. Flache Algorithmen mit geringer Tiefe lassen sich leichter durchführen als Algorithmen mit großer Tiefe. Aber die entscheidende Frage ist natürlich, ob sich damit sinnvolle Berechnungen durchführen lassen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist, dass nicht alle Qubits gleich stark verrauscht sind. Theoretisch sollte es möglich sein, Qubits mit sehr geringem Rauschen aus sogenannten topologischen Zuständen bestimmter Materialien anzufertigen. Dabei

dient die »Form« der Zustände der für die Speicherung binärer Informationen genutzten Elektronen als eine Art Schutz gegen zufälliges Rauschen. Forscher von Microsoft und anderen Unternehmen suchen in exotischen Quantenmaterialien nach solchen topologischen Zuständen. Aber es gibt keine Garantie dafür, dass derartige Zustände gefunden werden oder dass sie kontrollierbar sind.

Forscher von IBM haben vorgeschlagen, die Leistung einer Berechnung auf einem Quantencomputer mit einer als »Quantenvolumen« bezeichneten Zahl auszudrücken. Darin sind alle relevanten Faktoren gebündelt: Anzahl und Konnektivität der Qubits, Tiefe des Algorithmus sowie die Qualität der Gatter, etwa ihr Rauschen. Das daraus berechnete Quantenvolumen beschreibt tatsächlich die Leistung einer Quantenberechnung. Der beste Weg nach vorn sei es, so Gambetta, Quantenhardware zu entwickeln, die das verfügbare Quantenvolumen vergrößert.

### **Quantenüberlegenheit ist eine recht unscharfe Angelegenheit**

Das ist einer der Gründe dafür, dass die viel gepriesene Quantenüberlegenheit eine

recht unscharfe Angelegenheit ist. Ein 50-Qubit-Quantencomputer, der einen modernen Supercomputer übertrifft – das klingt überwältigend. Doch es lässt eine Menge Fragen offen. Bei welchem Problem übertrifft er den Supercomputer? Woher wissen wir, dass der Quantencomputer die richtige Lösung liefert, wenn wir es nicht mit einem bewährten klassischen Computer überprüfen können? Und wie können wir sicher sein, dass der klassische Computer es nicht auch besser könnte – mit dem richtigen Algorithmus?

Das Konzept der Quantenüberlegenheit ist also mit Vorsicht zu genießen. Einige Forscher ziehen es daher inzwischen vor, von »Quantenvorteil« zu reden. Damit bezeichnen sie die Zunahme an Geschwindigkeit, die ein Quantencomputer bietet, ohne eine Aussage darüber zu machen, was am besten ist. Aber unabhängig von der Bezeichnung: Die Demonstration, dass Quantencomputer Aufgaben durchführen können, die jenseits der Möglichkeiten der derzeitigen klassischen Computer liegen, wäre von großer psychologischer Bedeutung für das Forschungsgebiet. »Die Vorführung eines eindeutigen Quantenvorteils wäre ein bedeutender Meilenstein«,

»Ein universeller fehler-toleranter Quantencomputer, der mit logischen Qubits arbeitet, liegt noch in weiter Zukunft«

[Jay Gambetta]

sagt Eisert. Es würde beweisen, dass Quantencomputer unsere technischen Möglichkeiten tatsächlich erweitern würden.

Zwar wäre es zunächst eher ein symbolischer Akt als bereits eine Transformation unserer verfügbaren Computerressourcen. Trotzdem könnte ein solcher Schritt wichtig sein. Denn wenn Quantencomputer erfolgreich sind, bedeutet das wahrscheinlich nicht, dass IBM, Google und andere Unternehmen plötzlich ihre neuen Superrechner zum Verkauf anbieten. Vielmehr wird es zunächst zu einer interaktiven und vielleicht schwierigen Zusammenarbeit von Entwicklern und Anwendern kommen. Und die Anwender werden die dazu notwendigen neuen Fähigkeiten nur entwickeln, wenn sie ausreichend darauf vertrauen können, dass sich der dazu nötige Aufwand auszahlt.

Deshalb legen IBM und Google so viel Wert darauf, ihre Maschinen zugänglich zu machen, sobald sie fertig sind. Neben dem 16-Qubit-Rechner IBM Q Experience, den jeder nutzen kann, der sich online anmeldet, stellt IBM inzwischen seinen Geschäftskunden – darunter JP Morgan Chase, Daimler, Honda, Samsung und der University of Oxford – eine 20-Qubit-Version zur Verfü-

gung. Damit können die Kunden nicht nur herausfinden, was ihnen diese Maschinen zu bieten haben. Die Maschinen helfen auch dabei, eine wachsende Zahl von Programmierern auszubilden, die mit Quantencomputern umgehen können – und die dann in der Lage sind, Ressourcen und Lösungen zu entwickeln, die jenseits der Möglichkeiten einzelner Unternehmen liegen. »Damit Quantencomputer Fahrt aufnehmen und zur Blüte gelangen können, müssen wir es der Welt ermöglichen, sie zu nutzen und den Umgang mit ihnen zu lernen«, unterstreicht Gambetta. »Jetzt ist die Zeit für Wissenschaft und Industrie gekommen, sich für Quantencomputer bereit zu machen.« ↩

(Spektrum – Die Woche, 10/2018)

## Spektrum PLUS+

### DIE VORTEILSSEITE FÜR ABONNENTEN

Exklusive Vorteile und  
Zusatzangebote für  
alle Abonnenten von  
Magazinen des Verlags  
**Spektrum** der Wissenschaft

Zur Anmeldung:

**Spektrum.de/plus**



TOPOLOGIE

# Die Physik-Revolution?

von Davide Castelvecchi

Das Innere exotischer Materialien lässt sich mit äußerst eleganter Mathematik beschreiben. Bescheren diese topologischen Festkörper der Physik einen Paradigmenwechsel?

**C**harles Kane hatte niemals daran gedacht, sich mit Topologen abzugeben. »Ich denke nicht wie ein Mathematiker«, gesteht der theoretische Physiker, der sich eigentlich mit greifbaren Problemen von Feststoffen beschäftigt. Das geht nicht nur ihm so. Physiker haben der Topologie – also der mathematischen Untersuchung von Formen und ihrer Anordnung im Raum – typischerweise wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Doch jetzt stürzen sich Kane und viele andere Physiker geradezu auf dieses Forschungsgebiet.

Denn im vergangenen Jahrzehnt sind Wissenschaftler darauf gestoßen, dass die Topologie einzigartige Einsichten in die Physik von Materialien bietet. Etwa darin, wie manche Isolatoren in einer nur ein Atom dicken Schicht an ihrer Oberfläche Strom leiten können.

Einige dieser topologischen Effekte wurden bereits in den 1980er Jahren entdeckt, doch erst in den vergangenen paar Jahren haben Physiker erkannt, dass solche Effekte sehr viel häufiger auftreten und sehr viel

bizarrer sind als erwartet. Topologische Materialien »befanden sich direkt vor unserer Nase, doch wir haben sie nicht beachtet«, sagt Kane, der an der University of Pennsylvania in Philadelphia tätig ist.

### **Die topologische Physik explodiert**

Inzwischen explodiert die topologische Physik geradezu. Es gibt kaum noch Forschungsarbeiten im Bereich Festkörperphysik, bei denen nicht das Wort »Topologie« im Titel vorkommt. Und die Experimentalphysiker werden künftig sogar noch fleißiger sein. Eine im Juli 2017 im Fachblatt »Nature« veröffentlichte Untersuchung präsentiert einen Atlas von Materialien, die topologische Effekte zeigen könnten. Damit liefert der Katalog den Physikern eine Vielzahl von Stoffen, bei denen sie nach bizarren Materiezuständen wie Weyl-Fermionen und Quantenspinflüssigkeiten suchen können.

Die Wissenschaftler hoffen, dass topologische Materialien eines Tages zu schnelleren und effizienteren Computerchips führen oder sogar für Quantencomputer ver-

wendet werden können. Schon jetzt finden die exotischen Stoffe Verwendung als virtuelle Laboratorien für die Suche nach exotischen und bislang unentdeckten Elementarteilchen und physikalischen Gesetzen.

Viele Forscher sind der Ansicht, der größte Gewinn der topologischen Physik werde ein tieferes Verständnis der Natur der Materie sein. »Emergente Phänomene der topologischen Physik sind möglicherweise überall um uns herum am Werk – sogar in einem Stück Gestein«, sagt Zahid Hasan, Physiker an der Princeton University in New Jersey.

Einige der grundlegendsten Eigenschaften subatomarer Teilchen sind im Grunde genommen topologischer Natur. Ein Beispiel ist der Spin des Elektrons, der nach oben oder nach unten zeigen kann. Kippt man ihn von »Spin aufwärts« nach »Spin abwärts« und dann wieder zurück nach »Spin aufwärts«, so würde man denken, diese Drehung um 360 Grad würde den ursprünglichen Zustand des Elektrons wiederherstellen. Doch verblüffenderweise ist das nicht der Fall.

In der seltsamen Welt der Quantenphysik lässt sich ein Elektron durch eine Wellenfunktion darstellen, in der die Informationen über das Teilchen kodiert sind, wie etwa die Wahrscheinlichkeit, es in einem bestimmten Spinzustand anzutreffen. Entgegen unserer Intuition führt die 360-Grad-Drehung zu einer Phasenverschiebung bei der Wellenfunktion, so dass aus Wellenkämmen Wellentäler werden und umgekehrt. Eine weitere 360-Grad-Drehung ist nötig, um die ursprüngliche Wellenfunktion wiederherzustellen.

### **Wie die Ameise auf einem Möbiusband**

Und das ist genau das, was bei einer der unter Mathematikern beliebtesten topologischen Kuriositäten passiert, dem Möbiusband. Es entsteht, wenn man einen Papierstreifen mit seinen beiden Enden ringförmig zusammenklebt, zuvor aber das eine Ende um 180 Grad verdreht. Läuft eine Ameise auf einem solchen Band immer in eine Richtung, würde sie sich nach einem Umlauf auf der Unterseite ihrer Startposition wiederfinden. Erst nach einem zweiten Umlauf wäre sie wieder dort, wo sie losgelaufen ist.

Die Situation der Ameise ist nicht einfach nur eine Analogie für das, was mit der

Wellenfunktion eines Elektrons passiert. Es geschieht tatsächlich im abstrakten geometrischen Raum der Quanten-Wellenfunktionen. Es ist, als ob jedes Elektron ein kleines Möbiusband enthält, das diese interessante Topologie mit sich bringt. Alle Arten von Teilchen, die diese Eigenschaft teilen, darunter Quarks und Neutrinos, werden als Fermionen bezeichnet. Teilchen, die diese Eigenschaft nicht besitzen, wie etwa Photonen, heißen Bosonen.

Die meisten Physiker, die Quantenkonzepte wie den Spin untersuchen, scheren sich nicht um deren topologische Bedeutungen. Doch in den 1980er Jahren begannen Theoretiker wie David Thouless von der University of Washington in Seattle zu vermuten, dass eben diese Topologie für ein überraschendes Phänomen verantwortlich sein könnte, das als Quanten-Hall-Effekt bezeichnet wird. Bei diesem Phänomen ändert sich der elektrische Widerstand in einer nur ein Atom dicken Kristallschicht sprunghaft in diskreten Schritten, wenn das Material sich in einem veränderlichen Magnetfeld befindet. Andererseits ändert sich der Widerstand nicht bei Fluktuationen der Temperatur oder bei Unreinheiten in dem

»Wenn man eine neue Technologie entwickeln will, muss man zunächst das Fundament dafür richtig hinbekommen«

[Michael Freedman]

Kristall. Ein so robustes Verhalten war zuvor unbekannt, sagt Hasan, und es ist eine der Schlüsseleigenschaften jener topologischen Zustände, die Physiker jetzt für technische Anwendungen nutzen wollen.

### **Physik mit einer Drehung**

Im Jahr 1982 entschlüsselten Thouless und seine Kollegen die Topologie hinter dem Quanten-Hall-Effekt – was schließlich mit dazu führte, dass Thouless einen Anteil am Physik-Nobelpreis des vergangenen Jahres erhielt. Wie beim Spin des Elektrons zeigt sich die Topologie auch hier in einem abstrakten Raum. Doch diesmal ist die grundlegende Form kein Möbiusband, sondern die Oberfläche eines Torus. Wenn das Magnetfeld stärker oder schwächer wird, bilden sich auf der Oberfläche Wirbel und verschwinden wieder, ähnlich den Windströmungen um das Auge eines Hurrikans (siehe Grafik »Alles aufgewickelt«).

Wirbel besitzen eine »Windungszahl« genannte Eigenschaft. Sie beschreibt, wie oft sie sich um einen zentralen Punkt winden. Die Windungszahl ist eine topologische Invariante – sie ändert sich nicht, wenn man die Fläche deformiert. Außerdem ist die Gesamtsumme aller Windungs-

zahlen der bei den Veränderungen des Magnetfelds auftauchenden und wieder verschwindenden Wirbel konstant. Diese Summe wird als Chern-Zahl bezeichnet, benannt nach dem chinesisch-amerikanischen Mathematiker Shiing-Shen Chern. Sie ist unter Topologen bereits seit den 1940er Jahren bekannt.

### **Stromfluss ohne Widerstand**

Doch die überraschendste Entdeckung stand den Forschern noch bevor. Bis Mitte der 2000er Jahre hatte man den Quanten-Hall-Effekt und andere topologische Effekte lediglich unter dem Einfluss starker Magnetfelder beobachtet. Doch Kane und seine Kollegen sowie ein weiteres unabhängiges Forscherteam bemerkten, dass einige aus schweren Elementen hergestellte Isolatoren über innere Wechselwirkungen von Elektronen und Atomkernen ihr eigenes Magnetfeld mitbrachten. Das statet Elektronen an der Oberfläche dieser Materialien mit robusten, »topologisch geschützten« Zuständen aus, die einen Stromfluss nahezu ohne Widerstand möglich machen. Hasans Gruppe demonstrierte diesen Effekt 2008 in Wismut-Antimon-Kristallen, die als topologische Isola-

toren bezeichnet werden. »Damit begann der Spaß erst richtig«, sagt Hasan.

Die Entdeckung erschütterte die physikalische Welt, urteilt Edward Witten, Theoretiker am Institute for Advanced Study in Princeton. Er ist der einzige Physiker, der jemals die Fields-Medaille verliehen bekommen hat, die höchste Auszeichnung für Mathematiker. Topologische Zustände seien keineswegs exotische Ausnahmen, so Witten, sondern sie bieten vielfältige Möglichkeiten zur Entdeckung bislang unbekannter Effekte in der Natur: »Die Denkweise hat sich geändert.«

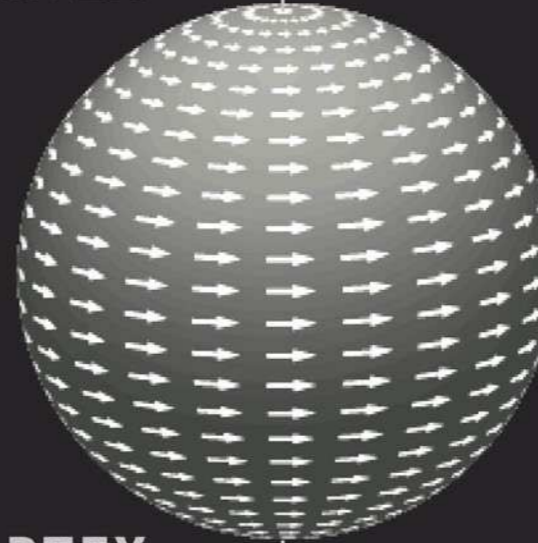
### **Kreislauf der Ideen**

Eine der größten Überraschungen war es, dass diese Zustände sich häufig mit Theorien erklären lassen, die zur Lösung völlig anderer Probleme erfunden worden waren – etwa für die Versöhnung der Gravitation mit der Quantenphysik. Konzepte wie Wittens topologische Quantenfeldtheorie, die zu Durchbrüchen in der reinen Mathematik geführt haben, tauchten nun in der Physik an unerwarteten Stellen wieder auf. »Es handelt sich um einen wunderbaren Kreislauf der Ideen«, erklärt der Mathematiker Michael Atiyah, ebenfalls Träger der

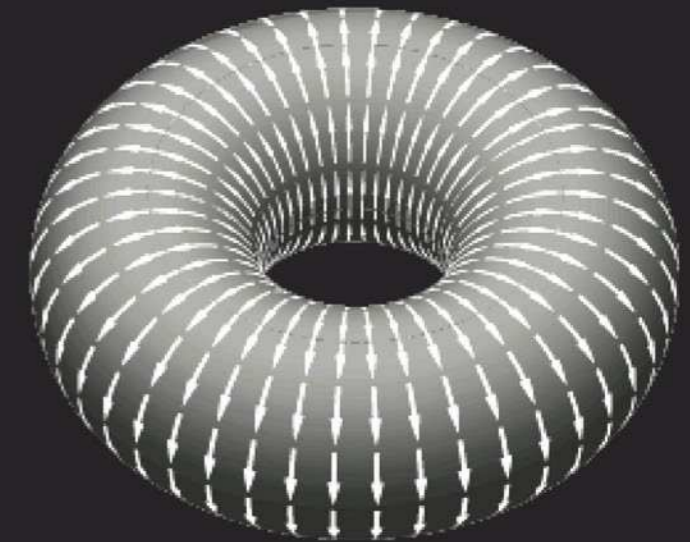
# Alles aufgewickelt

Viele physikalische Phänomene wie etwa Luft- oder Wasserströmungen lassen sich als Muster von Pfeilen auf einer Oberfläche darstellen. Das Verhalten der Phänomene hängt dann teilweise von der Topologie dieser Oberflächen ab. Und so, wie das Kämmen einer behaarten Kugel unvermeidlich zur Bildung von Haarwirbeln an den Polen der Kugel führt, wird eine Kugeloberfläche stets einige Wirbel oder »Vortices« in dem Muster enthalten. Wenn es sich bei der Oberfläche um einen Torus handelt, ist das jedoch nicht immer der Fall.

**VORTEX**



**VORTEX**

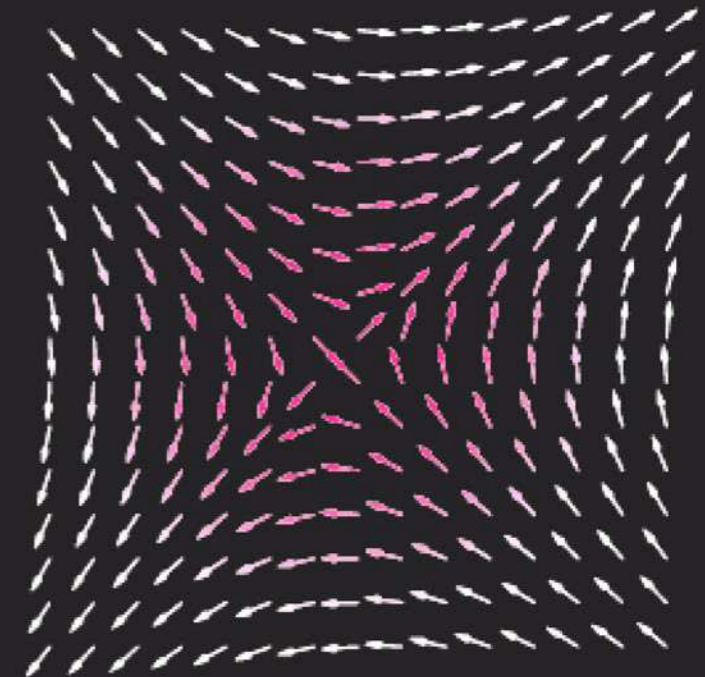


**MUSTER OHNE VORTICES**

Jeder Vortex besitzt eine »Windungszahl«, die erfasst, wie oft sich der Wirbel um einen Punkt windet. Diese Zahl kann positiv oder negativ sein.

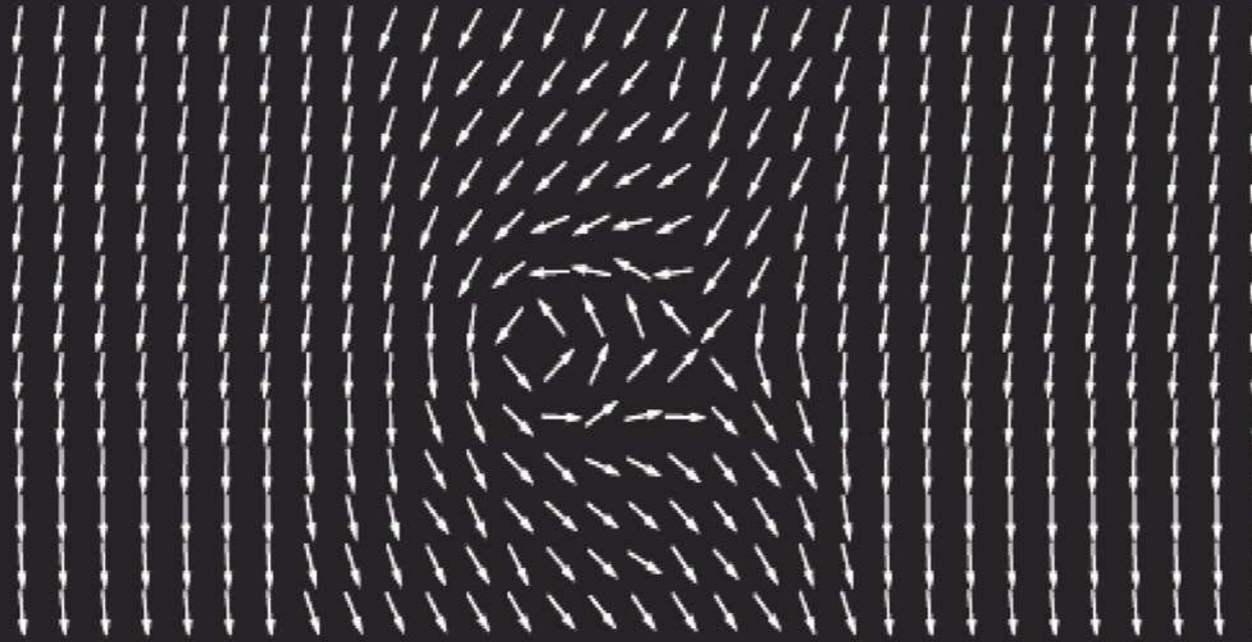


**WINDUNGSZAHL 1**

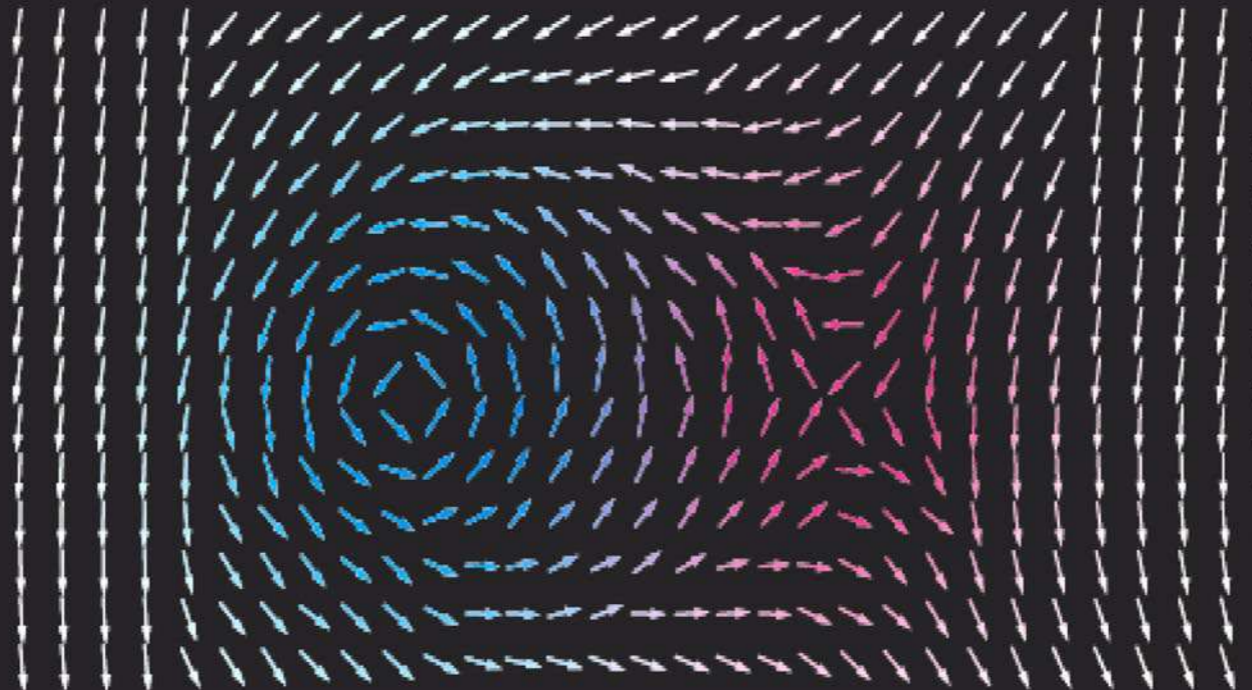


**WINDUNGSZAHL -1**

In einer zuvor wirbelfreien Region kann sich ein Vortex-Paar bilden.



Die beiden Vortices trennen sich voneinander, und ihre entgegengesetzten Windungszahlen werden sichtbar. Die Anzahl der Vortices kann sich also ändern, aber die Summe der Windungszahlen bleibt dabei erhalten. Diese Invarianz ist wichtig für das Verhalten topologischer Isolatoren.



Fields-Medaille, der an der University of Cambridge in Großbritannien über diese Theorien forscht.

Eine weitere Quelle der Aufregung ist, dass Elektronen und andere Teilchen in topologischen Materialien mitunter Zustände einnehmen können, in denen sie sich kollektiv wie ein einziges Elementarteilchen verhalten. Solche »Quasiteilchen«-Zustände können Eigenschaften aufweisen, die bei natürlichen Elementarteilchen nicht auftreten. Sie können sogar Teilchen imitieren, die von den Physikern erst noch entdeckt werden müssen.

Einige solcher heiß ersehnten Quasiteilchen wurden vor zwei Jahren aufgespürt. Sie werden als Weyl-Fermionen bezeichnet, weil der Mathematiker Hermann Weyl bereits in den 1920er Jahren über masselose Fermionen spekuliert hatte. Alle Fermionen, die im konventionellen Teilchenzoo entdeckt worden sind, besitzen eine Masse. Doch wie Hasan berechnet hat, können topologische Effekte im Inneren von Tantal-Arsenid-Kristallen zu masselosen Quasiteilchen führen, die sich wie Weyl-Fermionen verhalten. Wenn ein Quasiteilchen masselos ist, bewegt es sich unabhängig von seiner Energie stets mit der gleichen Geschwindigkeit.

Hasans Team konnte das 2015 experimentell bestätigen, ebenso wie eine von Hongming Weng an der Chinesischen Akademie der Wissenschaften in Peking geleitete Gruppe. Die Hoffnung der Forscher ist, dass solche Materialien eines Tages in superschnellen Transistoren Anwendung finden. Wenn sich Elektronen durch einen Kristall bewegen, werden sie normalerweise an Unreinheiten gestreut. Das verlangsamt ihre Bewegung. Doch die topologischen Effekte in Hasans Tantal-Arsenid erlauben es den Elektronen, sich ungehindert durch den Kristall zu bewegen.

Marin Soljačić, Physiker am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge in den USA, und seine Kollegen haben inzwischen etwas Ähnliches wie Weyl-Fermionen beobachtet, jedoch nicht in einem Kristall, sondern in elektromagnetischen Wellen. Zunächst formten die Wissenschaftler eine Gyroid-Struktur, ein faszinierendes dreidimensionales Muster, das wie ein System miteinander verbundener Wendeltreppen aussieht, in dem sie sorgfältig Löcher in einen Stapel Kunststofffliesen bohrten. Dann feuerten sie Mikrowellen auf den Gyroid und beobachteten, dass sich die Photonen – bei denen es sich um

masselose Bosonen handelt – wie die Weyl-Fermionen in Hasans Material verhielten.

Einer der aufregendsten Perspektiven dieses boomenden Forschungsgebiets der topologischen Photonik ist die mögliche Nutzung von Kristallen zur Herstellung optischer Leiter, in denen Licht sich nur in die eine Richtung bewegen kann. Das würde verhindern, dass das Licht an Unreinheiten zurückgeworfen wird, und so die Effizienz von Datenübertragungen über weite Entfernungen verbessern.

### **Verrücktheit der Quasiteilchen**

Auf einer Skala der reinen Verrücktheit gibt es eine Sorte von Quasiteilchen, die Soljačićs Boson-Fermionen noch übertreffen: die Anyonen. Normalerweise sind individuelle Teilchen entweder Fermionen oder Bosonen. Doch Anyonen – Quasiteilchen, die in zweidimensionalen, nur ein Atom dicken Materialien existieren – brechen diese Regel. Die Forscher können diesen Verstoß beobachten, wenn zwei identische Teilchen ihre Plätze tauschen. Bei Bosonen hat ein solcher Tausch keinen Einfluss auf die kollektive Wellenfunktion. Bei Fermionen dagegen verschiebt sich die Phase der Wellen-

funktion um 180 Grad, ähnlich wie bei der Drehung eines Elektrons um 360 Grad. Doch bei Anyonen ändert sich die Phase der Wellenfunktion um einen Winkel, der von der Art des Anyons abhängt. Und die Theorie deutet darauf hin, dass in einigen Fällen ein zweiter Platztausch der Anyonen nicht zur Wiederherstellung der ursprünglichen Wellenfunktion führt.

Wenn die Wissenschaftler also eine Vielzahl solcher Anyonen nahe beieinander erzeugen könnten und dann hin und her tauschen würden, würden sich ihre Quantenzustände »erinnern«, wie sie gemischt worden sind. Die Physiker können diesen Prozess visualisieren, indem sie die zweidimensionale Bewegung der Anyonen gegen eine dritte Dimension, die Zeit, auftragen. Das Ergebnis ist ein Flechtwerk von Linien, die sich zu hübschen Zöpfen verwickeln. Im Prinzip ließen sich mit solchen Zopfzuständen Quantenbits kodieren. Solche »Qubits« sind die kleinsten Informationseinheiten in Quantencomputern. Die Topologie der Zöpfe würde die Qubits vor externem Rauschen schützen – störenden Einflüssen, die bislang jedes andere Verfahren zur Speicherung von Quanteninformationen beeinträchtigen.

Microsoft übertrug 2005 dem Mathematiker Michael Freedman die Verantwortung für die Forschung des Unternehmens im Bereich Quantencomputer – und investierte damit massiv in Quantenzöpfe. Denn Freedman hatte 1986 die Fields-Medaille für seine Arbeiten über die Topologie vierdimensionaler Sphären erhalten und entwickelte in den 1990er Jahren einige der wichtigsten Ideen zu Zopf-Qubits.

Zunächst konzentrierte Freedmans Team sich auf die Theorie. Doch Ende vergangenen Jahres stellte Microsoft eine ganze Reihe angesehener Experimentalphysiker aus der akademischen Welt ein. Einer von ihnen ist Leo Kouwenhoven von der Technischen Universität Delft in den Niederlanden. Er hatte 2012 als Erster experimentell bestätigt, dass Teilchen wie Anyonen sich an ihre Vertauschung erinnern. Kouwenhoven baut gegenwärtig ein Labor für Microsoft in Delft auf, dessen Ziel es ist, mit Anyonen Qubits zu kodieren und einfache Quantencomputer-Operationen durchzuführen.

Zwar hinkt dieses Verfahren anderen Ansätzen für Quantencomputer um gut zwei Jahrzehnte hinterher. Doch Freedman

ist davon überzeugt, dass die Robustheit der topologischen Qubits dem neuen Ansatz letztlich zum Sieg verhelfen wird. »Wenn man eine neue Technologie entwickeln will, muss man zunächst das Fundament dafür richtig hinbekommen«, betont er. Hasan versucht sich an ähnlichen Experimenten, glaubt jedoch, dass es topologische Quantencomputer frühestens in vier Jahrzehnten geben wird. »Meine Prognose ist, dass topologische Phasen der Materie noch für viele Jahre auf die Laboratorien von Universitäten beschränkt bleiben«, führt er weiter aus.

### **Ein topologischer Atlas**

Doch vielleicht gibt es eine Möglichkeit, die Entwicklung zu beschleunigen. Die konventionelle Methode der Experimentalphysiker bei der Suche nach neuen topologischen Isolatoren basiert auf der arbeitsintensiven Berechnung möglicher Energien von Elektronen in jedem Material, um dann daraus die Eigenschaften des Materials vorherzusagen.

Ein von dem theoretischen Physiker Andrei Bernevig an der Princeton University geleitetes Team hat eine Abkürzung gefunden. Die Forscher erstellten einen

Atlas topologischer Materialien, indem sie alle 230 unterschiedlichen Symmetrien betrachteten, die in der Kristallstruktur eines Materials existieren können. Dann untersuchten sie systematisch, welche dieser Symmetrien – im Prinzip – zu topologischen Zuständen führen können, ohne dass sie dazu erst alle Energieniveaus berechnen mussten.

### **Zehntausende topologische Legierungen**

Die Forscher gehen davon aus, dass 10 bis 30 Prozent aller Materialien topologische Effekte zeigen könnten. Das wären potenziell Zehntausende von Legierungen. Bislang konnten erst einige hundert dieser topologischen Materialien identifiziert werden. »Wie sich zeigt, kennen wir bisher nur einen kleinen Teil der gewaltigen Menge von topologischen Materialien, die existieren können, und es gibt noch viel, viel mehr davon«, sagt Bernevig.

Zu Bernevigs Team gehören auch drei Experten für die Mathematik von Kristallen von der Universität des Baskenlands in Bilbao. Schon bald können Forscher den »Bilbao Crystallographic Server« konsultieren, um herauszufinden, ob ein bestimmtes kristallines Material potenziell

topologisch ist. Bernevigs Methode sei »definitiv ein effizienter Weg«, um nach neuen topologischen Isolatoren zu suchen, unterstreicht Wei Li, Physiker an der Tsinghua-Universität in Peking: »Ich glaube, wir werden damit viele neue Materialien entdecken.«

### **Ein ganzer Zoo physikalischer Phänomene**

»Wenn wir wissen, dass ein Material topologische Materiezustände besitzt, heißt das aber noch nicht, dass wir unmittelbar seine Eigenschaften vorhersagen können«, mahnt Koautorin Claudia Felser, Materialwissenschaftlerin am Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe in Dresden, zur Vorsicht. Diese Eigenschaften müssten immer noch für jedes Material berechnet und gemessen werden, erläutert sie.


Die meisten der bislang untersuchten topologischen Materialien – einschließlich jener in Bernevigs Atlas – sind relativ einfach zu verstehen, weil die Elektronen in ihnen ihre gegenseitige Abstoßung kaum spüren. Die nächste große Herausforderung für die Theoretiker ist es, »stark wechselwirkende« topologische Materialien zu verstehen, in denen die Elektronen sich

stark abstoßen. Wenn die Theoretiker dieses Problem lösen, sagt Hasan, »werden wir einen ganzen Zoo neuer physikalischer Phänomene finden, die wir uns heute nicht einmal vorstellen können«.

Der Artikel erschien im Original unter dem Titel »The strange topology that is reshaping physics« in »Nature«.

(Spektrum – Die Woche, 46/2017)





ALTERNATIVE ZUM SUPERCOMPUTER

# Quantensimulatoren auf der ÜBERHOLSPUR

von Dirk Eidemüller

Leistungsfähige universelle Quantencomputer lassen noch auf sich warten.

Bis dahin lösen ihre hoch spezialisierten Verwandten gewisse physikalische Probleme immer besser: die Quantensimulatoren. Sie sind bei einigen Aufgaben mittlerweile ähnlich gut wie klassische Supercomputer.

**I**m Herzen der Materie ist überall die Quantenphysik am Werk. Deren Gesetze sind zwar bekannt, aber die Komplexität der schwierigen Gleichungen nimmt sehr schnell mit der Anzahl der involvierten Teilchen zu. Die Wechselwirkungen bei chemischen Reaktionen beispielsweise lassen sich bloß für die einfachsten Moleküle noch quantenmechanisch exakt berechnen.

Bei größeren Objekten kommen nur Näherungsverfahren in Frage, mit deren Hilfe Wissenschaftler die ungefähren Reaktionschritte bestimmen. Selbst die leistungstärksten Supercomputer kommen dabei schnell an ihre Grenzen, da die nötigen Rechenzeiten exponentiell mit der Größe des betrachteten Systems ansteigen. In Zukunft könnten jedoch Quantencomputer helfen. Sie arbeiten schon von ihrem Bauprinzip her quantenmechanisch und können daher die notwendigen Kalkulationen sehr viel schneller abarbeiten als herkömmliche Computer. Davon dürften viele Industriezweige profitieren. Die chemische Industrie etwa setzt jedes Jahr riesige Mengen an

Grundstoffen um. Gelänge es, auch nur einige wenige Reaktionsschritte dank neuer Quantenalgorithmien zu optimieren, wären die möglichen Einsparungen immens.

Beim Quantenrechnen macht man sich die Verschränkung zwischen den verschiedenen Teilchen zu Nutze. Wegen dieser quantentypischen Eigenschaft reicht nicht mehr der Zustand der einzelnen Ionen oder Lichtteilchen aus, um das Gesamtsystem zu beschreiben. Der ganze Komplex – im Fall eines Quantencomputers alle an einer Rechnung beteiligten »Qubits« – beinhaltet mehr Informationen als die Summe der isolierten Teilchen. Der Gesamtzustand kann zudem noch verschiedene Rechenpfade gleichzeitig durchlaufen. Es ist genau dieser eigenartige, holistische Charakter von Quantensystemen, der ihr Verständnis so schwierig macht und gleichzeitig für ihre potenzielle Rechenleistung so wichtig ist.

Der Weg zum Quantencomputer ist allerdings steinig und mit zahlreichen Unwägbarkeiten verbunden. So ist bislang weder geklärt, was der beste technologische Ansatz dafür ist, noch können Forscher sagen, wie lange noch ein konkurrenzfähiges Exemplar auf sich warten lassen wird. Künftige, digital arbeitende Quantencom-

Künftige Quantenrechner  
sollen mit mehreren tausend  
Qubits laufen

puter sollen mit mehreren tausend Qubits laufen. Aktuell sind jedoch die Hürden groß, bereits nur mehrere Dutzend davon nahezu perfekt kontrolliert miteinander in Wechselwirkung treten zu lassen.

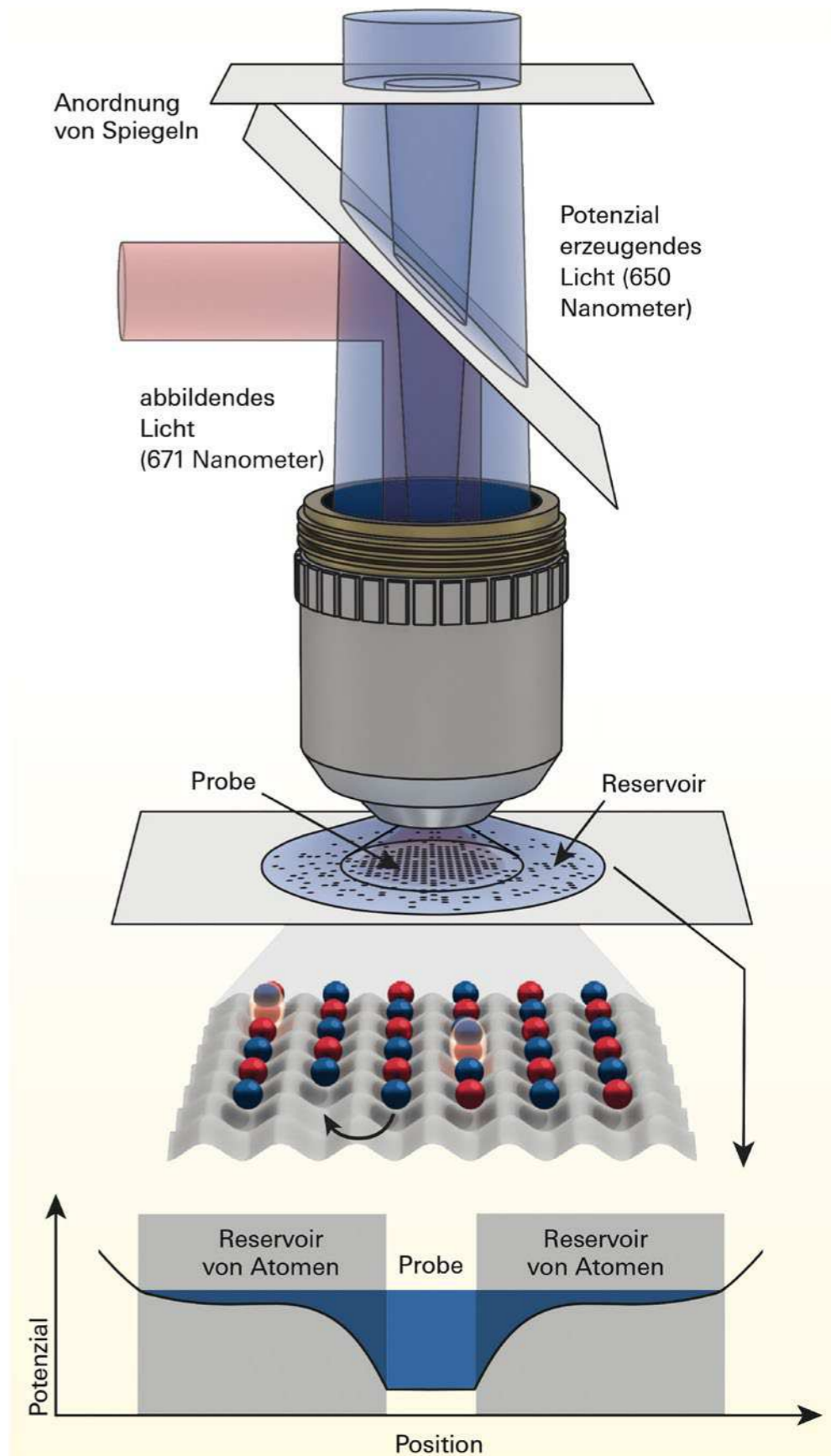
Hier können nun analoge Quantensimulatoren Abhilfe schaffen. Solche Geräte sind im Gegensatz zu einem Quantencomputer nicht frei programmierbar und bilden jeweils nur einen bestimmten Typ von Problemen ab. Dafür lassen sie sich einfacher konstruieren und kontrollieren. Aktuelle Fortschritte bringen gleich bei mehreren Arten von Quantensimulatoren die Lösung praktischer Probleme in Reichweite.

### Jedes System taugt nur für spezielle Fragestellungen – ist dort aber sehr leistungsfähig

Es gibt mittlerweile eine ganze Reihe von unterschiedlichen Modellsystemen: Atome in optischen Gittern, aufgereichte Ionen in Ionenfallen oder Laserpulse, die durch nichtlineare Kristalle flitzen und sich dabei aufspalten. Jedes eignet sich dazu, gewisse Eigenschaften der Quantenwelt möglichst exakt zu bestimmen, doch keines lässt sich beliebig verallgemeinern. »Durch diese Beschränkung sind Quantensimulatoren in

## Mit Licht gefangen

Ein Quantengas-Mikroskop hält Atome in einem zweidimensionalen optischen Gitter fest. Dazu erzeugen die Forscher unter anderem mit speziell angeordneten Lichtstrahlen (blau) ein Potenzial, in das die Atome aus einem umliegenden Reservoir gewissermaßen hineinfallen (Diagramm unten). Die Physiker beobachten mit Hilfe von Licht einer anderen Wellenlänge (rot), wie sich bestimmte Eigenschaften des Systems verändern – etwa seine magnetische Ordnung bei verschiedenen Temperaturen und Atomdichten. So können sie beispielsweise das quantenmechanische Verhalten von Supraleitern simulieren.



manchen Bereichen aber überraschend leistungsfähig«, sagt Christian Roos vom Institut für Experimentalphysik an der Universität Innsbruck. Der Quantenphysiker arbeitet dort an Quantensimulatoren, die aus einer Kette von bis zu 20 Ionen bestehen. Das klingt noch nicht nach allzu viel. Aber auch mit nur ein bis zwei Dutzend Ionen lassen sich zum Beispiel magnetische Wechselwirkungen simulieren, die etwa bei der Entwicklung neuer Materialien eine Rolle spielen.

Eine große Schwierigkeit bei allen Quantenobjekten liegt darin, den genauen Zustand des Gesamtsystems zu bestimmen. Bei einem klassischen Computer reicht dafür die Kenntnis der einzelnen Bits im Speicher. Quantensysteme hingegen bestehen darüber hinaus aus den Korrelationen zwischen allen möglichen Teilchen.

Roos und seine Kollegen in Innsbruck haben nun zusammen mit Physikern der Universität Ulm und der schottischen University of Strathclyde ein neues Verfahren entwickelt, mit dem sich der Quantenzustand der Ionenkette über eine Abfrage mit Laserpulsen sehr viel schneller als bislang auslesen lässt. Dieses neue Verfahren ermöglicht es, die Quantenkorrelationen von 14 Ionen mit

Hilfe von 27 Messungen in zehn Minuten abzufragen. Noch vor einem Jahrzehnt waren bei nur acht Ionen 6000 Messungen und zehn Stunden nötig. Mit dieser neuen »Matrix-Produkt-Zustands-Tomografie« können die Forscher ihr Quantensystem also rasch und gut charakterisieren. »Wir wollen ja möglichst genau wissen, ob der Quantensimulator auch das macht, was wir von ihm erwarten«, kommentiert Roos.

Die Methode ist darüber hinaus im Prinzip nicht auf Ketten von Ionen beschränkt – die Mathematik dahinter lässt sich auf beliebige Quantensysteme anwenden. Die Physiker wollen die Algorithmen deshalb so weiterentwickeln, dass auch andere Forschergruppen sie einsetzen können. Dann ließen sich verschiedene Vielteilchensysteme miteinander vergleichen.

Wissenschaftler unter anderem am Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ) in Garching arbeiten mit einer anderen Art von Quantensimulatoren. Ihnen ist es gelungen, extrem tief gekühlte Atome in einem Lichtgitter aus gekreuzten Laserstrahlen festzuhalten und dann das Verhalten dieser Atomwolke zu studieren. Damit die Atome in dem speziellen optischen Gitter ausreichend still sitzen, mussten die

Bald könnten  
Quantensimulatoren  
die Supercomputer  
abgehängt haben

Forscher sie aufwändig auf wenige milliardenstel Grad über dem absoluten Nullpunkt herunterkühlen. Dann liegen die Atome in den Potenzialmulden des Lichtgitters wie zufällig verteilte Eier in einem Eierkarton (siehe »Mit Licht gefangen«). »Auf diese Weise können wir bis zu einige hundert Atome über dem Mikroskop festhalten und dann deren gegenseitige Wechselwirkung beobachten«, erläutert der Physiker Christian Groß vom MPQ.

Das sind deutlich mehr Quantenteilchen, als man sie etwa in Ionenfallen kontrolliert aufreihen kann. Dafür ist die Kontrolle der Atome in den so genannten Quantengas-Mikroskopen deutlich schwieriger. So können die Wissenschaftler zwar einzelne Atome aus dem optischen Gitter herausschießen, aber die wechselseitigen Korrelationen lassen sich nur sehr bedingt einstellen. Vielmehr überlassen sie das System sich selbst.

### **Während die Rechenzeit am Computer exponentiell steigt, bleibt das Laborexperiment überschaubar**

Zur Ermittlung des Endzustands müssen die Wissenschaftler die Anordnung jedoch mit Licht bestrahlen, und dieser Lichtblitz erhitzt die Atome bereits so stark, dass sie

aus dem optischen Gitter herauspurzeln. Eine Messung beendet also jeweils den Versuch. Dann muss das Quantengas-Mikroskop wieder neu mit Atomen beladen und heruntergekühlt werden. Inzwischen können die Forscher rund eine Simulation pro Minute durchführen.

Damit lassen sich bereits eine Reihe interessanter Quantensysteme studieren. Besonders fasziniert die Physiker derzeit ein theoretisches Modell zu Hochtemperatur-Supraleitern, das der Brite John Hubbard 1963 eingeführt hat. Es beschreibt die Phasenübergänge in solchen Festkörpern. Mit Quantensimulatoren lassen sich hier Eigenschaften bestimmen, die sich Berechnungen bislang entziehen. »Mit unseren Quantengas-Experimenten liegen wir mittlerweile ungefähr gleichauf mit dem, was Supercomputer heute leisten können«, erklärt Groß. Schon in wenigen Jahren, so die Forscher, werden Quantensimulatoren die Supercomputer deutlich hinter sich gelassen haben. Denn während bei Letzteren die Rechenzeit exponentiell ansteigt, wachsen die Simulatoren im Prinzip stückweise und linear.

Dennoch wird das Rennen um die besten Algorithmen und die geschickteste Rechen-

strategie weiterhin spannend bleiben. Dank neuer mathematischer Näherungsmethoden von Quantenchemikern lassen sich die Reaktionspotenziale komplexer Moleküle auf herkömmlichen Supercomputern ziemlich gut beschreiben. So große Objekte galten vielen Wissenschaftlern noch vor einigen Jahren als kaum berechenbar.

Der Trick bei den verbesserten Verfahren besteht in einer geschickt gewählten Näherung für die Umgebung der für die Reaktion wichtigen Bereiche. Das spart Rechenzeit. Auf diese Weise lassen sich zum Beispiel bei der Entwicklung neuer Arzneimittel die gewünschten Moleküle besser verstehen und etwa die chemischen Gruppen, die an ein bestimmtes Zellprotein binden, maßgeschneidert herstellen.

### **Die Zukunft gehört der Allianz von Supercomputern und Quantensystemen**

Diese Methoden funktionieren aber auch nur mit einer gewissen Genauigkeit, die sich durch Quantencomputer oder passende Quantensimulatoren steigern lassen sollte. In Zukunft könnten für solche Zwecke deshalb Hybridansätze bedeutsam werden, bei denen ein gewöhnlicher Supercomputer die chemische Umgebung berechnet und ein

Quantensystem die zentralen Reaktions-  
schritte bestimmt.

Von den Materialwissenschaften bis hin  
zur Pharmazie können viele Forschungs-  
zweige von den neuen Entwicklungen pro-  
fitieren. Wohl unter anderem wegen sol-  
cher Überlegungen hat die Europäische  
Union ihr neues »Flaggschiff«-Projekt der  
Quantentechnologie gewidmet. Nach den  
Initiativen zum menschlichen Gehirn  
(»Human Brain Project«) und zu Graphen  
soll das dritte Flaggschiff ab 2018 die Quan-  
tenkompetenz der europäischen Institute  
und Industrie stärken. Hierzu gibt es insge-  
samt eine Milliarde Euro an Fördergeldern,  
die über einen Zeitraum von zehn Jahren  
ausgeschüttet werden. Quantencomputer  
und -simulatoren werden dort mit Sicher-  
heit eine wichtige Rolle spielen. ↩

(Spektrum der Wissenschaft, Januar 2018)

Groß, C., Bloch, I.: Quantum Simulations with Ultracold Atoms  
in Optical Lattices. In: Science 357, S. 995–1001, 2017

Lanyon, B. P. et al.: Efficient Tomography of a Quantum Ma-  
ny-Body System. In: Nature Physics 10.1038/nphys4244, 2017

Mazurenko, A. et al.: A Cold-Atom Fermi-Hubbard Antiferro-  
magnet. In: Nature 545, S. 462–466, 2017

# DATEN- SPEICHER

Von Pergament bis DNA

Archivierung | Digitales Gedächtnis

Pergament | Datenträger für die Ewigkeit!

Biocomputer | Das Weltwissen in der DNA

HIER DOWNLOADEN

FÜR NUR  
€ 4,99

# MASCHINELLES LERNEN

## Neuronale Netze als Quantensimulator

von Robert Gast

Forscher wollen mit lernfähigen Algorithmen die Quantenphysik aufmischen.  
Nun sind ihnen mit einem einfachen Modellsystem erste Erfolge gelungen.



**Z**wei Physiker wollen mit Hilfe künstlicher Intelligenz ein zentrales Problem der Quantenphysik lösen. Bisher übersteigt es die Rechenpower von Computern, das Zusammenspiel größerer Quantenensembles zu simulieren, Physiker sprechen vom Viele-Körper-Problem der Quantenphysik. Mit Hilfe neuronaler Netze könnten Wissenschaftler auf diesem Gebiet Fortschritte machen, zeigen Giuseppe Carleo und Matthias Troyer von der ETH Zürich im Fachmagazin »Science«.

Im Fokus der Computerexperten steht das berühmte Konzept der Wellenfunktion. Sie enthält alle Informationen, die für die Beschreibung einer bestimmten Situation im Mikrokosmos nötig sind. Allerdings wird die Funktion schnell sehr kompliziert, wenn Physiker damit den Zustand einer größeren Zahl interagierender Teilchen beschreiben oder Prognosen über deren Dynamik abgeben wollen.

Für bestimmte Quantenensembles ist es Physikern schon vor Jahren gelungen, eine kompaktere mathematische Darstellungsweise zu finden. Beispielsweise lassen sich Ketten von Atomen, die jeweils zwei Spinzustände einnehmen können, recht

elegant mit Matrizen charakterisieren, was den Rechenaufwand verringert. Insbesondere bei höherdimensionalen Systemen versagen derartige Ansätze aber oft.

### **Erfolg versprechendes Konzept**

In diesem Fall nimmt die Menge an Information, die zur vollständigen Beschreibung des Systems nötig ist, exponentiell mit der Zahl der Teilchen zu. Bereits bei einigen Dutzenden Partikeln wird der Speicheraufwand so enorm, dass ihn kein Computer mehr bewältigen kann.

Carleo und Troyer schlagen nun vor, mit Hilfe lernfähiger Algorithmen gezielt nach kompakteren Darstellungen von Viele-Teilchen-Wellenfunktionen zu suchen. Konkret wollen sie einem neuronalen Netzwerk gewissermaßen die Rolle einer Wellenfunktion geben. Der Algorithmus kann über verschiedene veränderbare Parameter deren genaues Aussehen steuern.

Anschließend wird das Netzwerk mit einer bestimmten Situation im Mikrokosmos konfrontiert, die die Forscher in Form des so genannten Hamilton-Operators der Schrödingergleichung formuliert haben. Durch Ausprobieren soll das künstliche neuronale Netz eine möglichst kompakte

Darstellung des Grundzustands des Systems finden.

Die Wissenschaftler konnten in ihrer Studie zeigen, dass dieses Konzept Erfolg versprechend ist. Sie testeten ihr lernfähiges Netzwerk an ein- und zweidimensionalen Spinketten, bei denen bereits eine kompakte Beschreibung der Zustände bekannt war. Dabei zeigte sich, dass das neuronale Netz der Forscher mit weniger Aufwand zu diesem Ergebnis kam als herkömmliche Algorithmen.

Noch sei nicht sicher, ob man auf diese Weise auch schwierigere Viele-Körper-Probleme der Quantenphysik lösen könne, schreibt Michael R. Hush in einem Begleitkommentar. Der Forscher der University of Nottingham sieht aber großes Potenzial: So hätten Carleo und Troyer bisher nur ein einschichtiges neuronales Netz benutzt. Netze aus mehreren Schichten, auf die beispielsweise die Software Alpha Go zurückgreift, könnten die Leistungsfähigkeit der Methode noch deutlich steigern. ↩

(Spektrum.de, 09.02.2017)



MESSTECHNIK

# PRÄZISION

jenseits des Quantenlimits

von Warwick P. Bowen und Christopher G. Baker

Quanteneffekte begrenzen die erreichbare Genauigkeit miniaturisierter Sensoren. Ein trickreiches System könnte diese fundamentalen Einschränkungen umschiffen – indem sich ein Teil von ihm verhält wie eine negative Masse.

**A**uf der Quantenebene kann bereits der schiere Akt des Hinschauens dramatische Konsequenzen haben. Das ist nicht nur im bekannten Gedankenexperiment mit Schrödingers Katze unter Umständen fatal, sondern wirkt sich ganz praktisch umso störender aus, je empfindlicher die Messtechnik wird. Ein Forscherteam um Christoffer Møller vom Niels-Bohr-Institut an der Universität Kopenhagen hat gezeigt, dass sich die lästigen Effekte durch ein Quantensystem mit einer Art negativer Masse reduzieren lassen. Wenn diese angestoßen wird, bewegt sie sich im krassen Widerspruch zu unserer alltäglichen Erfahrung entgegen der Beschleunigungsrichtung. Das seltsame Verhalten könnte sich für

Sensoren ausnutzen lassen, die ihrerseits die fundamentalen Grenzen der Quantenphysik umgehen.

Bewegungssensoren sind für moderne Technik unverzichtbar, von Smartphones bis zur biomedizinischen Diagnostik. Sie ermitteln unsere Lage und Geschwindigkeit, und Forscher verfolgen mit ihnen das Verhalten von Molekülen und Teilchen. Ein aktuelles Beispiel, wie weit uns höchst präzise Mikromechanik bringt, liefern die Gravitationswellen: Mit ausgeklügelten Anordnungen von Spiegeln und Lasern empfangen Astronomen inzwischen Signale von Schwarzen Löchern in Milliarden Lichtjahren Entfernung.

Alle solchen Systeme enthalten Bauteile, die von äußeren Reizen in eine Schwingung versetzt werden. Diese Vibration wird üblicherweise mit Hilfe eines elektromagnetischen Felds ausgelesen, indem etwa Licht oder Mikrowellen vom Sensor reflektiert werden. Durch die rasanten nanotech-

nologischen und optoelektronischen Fortschritte sind die Sensoren mittlerweile bis zu einem Grad miniaturisiert, an dem quantenmechanische Effekte ihr Verhalten stark beeinflussen.

Wenn ein elektromagnetisches Feld auf die Oberfläche trifft, überträgt es per Strahlungsdruck einen Impuls auf den Sensor. Den Effekt kennen wir zwar nicht aus dem Alltag, aber wir können ihn etwa bei Kometen beobachten, deren Schweif stets von der Sonne weg zeigt. Ein Grundpfeiler der Quantenphysik ist die Erkenntnis, dass sich die Energie eines elektromagnetischen Felds auf diskrete Einheiten aufteilt, die Photonen. Darum spüren nanomechanische Sensoren keine kontinuierliche Kraft, sondern eine Reihe kleiner Stöße durch Lichtteilchen, die auf die Oberfläche prallen. Da die zeitliche Abfolge dem Zufall unterliegt, fließt eine Unbestimmtheit in den Messprozess ein, die als Quantenrauschen bezeichnet wird. Dieses Phäno-

---

**Warwick P. Bowen** leitet das Labor für Quantenoptik an der University of Queensland in Australien. **Christopher G. Baker** arbeitet dort als Postdoktorand.

men spielt bei allen quantenmechanischen Messvorgängen eine Rolle und lässt beispielsweise bei Gravitationswellendetektoren schwache Abstandsänderungen der Spiegel im Prasseln der Photonen untergehen. Das Quantenrauschen folgt aus der heisenbergschen Unschärferelation, die besagt, dass wir die Position und den Impuls eines Teilchens niemals gleichzeitig beliebig genau bestimmen können. Da es sich um eine fundamentale Aussage der Quantenmechanik handelt, scheint die Lage ausweglos und Rauschen unvermeidlich. Dennoch lässt sich das Problem durch geschickt konzipierte Experimente umgehen. So ist es möglich, den Ort eines Objekts zu erkennen, ohne Aussagen über seinen Impuls treffen zu müssen. In anderen Fällen lässt sich die Unschärferelation umschiffen, indem man Messungen nicht an einzelnen Teilchen, sondern an mehreren parallel durchführt. Das war auch der Trick der Forscher aus Dänemark.

### **Je ein Stoß auf negative und gewöhnliche Masse würden sich genau ausgleichen**

Ein hypothetisches Experiment hilft, die Methode zu verstehen. Dazu betrachtet man zwei mechanische Oszillatoren, näm-

lich Spiegel, die jeweils an einer Feder aufgehängt sind (siehe »Bizarrer Spiegel im Gedankenexperiment«). Sie reflektieren einen Laserstrahl, mit dem der Abstand zwischen beiden Oberflächen gemessen wird. Jeder Oszillator erhält von den Photonen im Laser ständig kleine Stöße. Da ein Lichtteilchen nacheinander beide Spiegel trifft, sind die Impulse miteinander korreliert. Sie sind gegenläufig und addieren sich, sorgen also für kleine Schwankungen im Spiegelabstand. Wäre es nun möglich, einen der Spiegel durch ein Objekt mit so etwas wie negativer Masse zu ersetzen, würde dieses durch einen Impuls genau in Gegenrichtung beschleunigt. Die Auswirkungen jedes Stoßes glichen sich stets aus, und das Quantenrauschen verschwände.

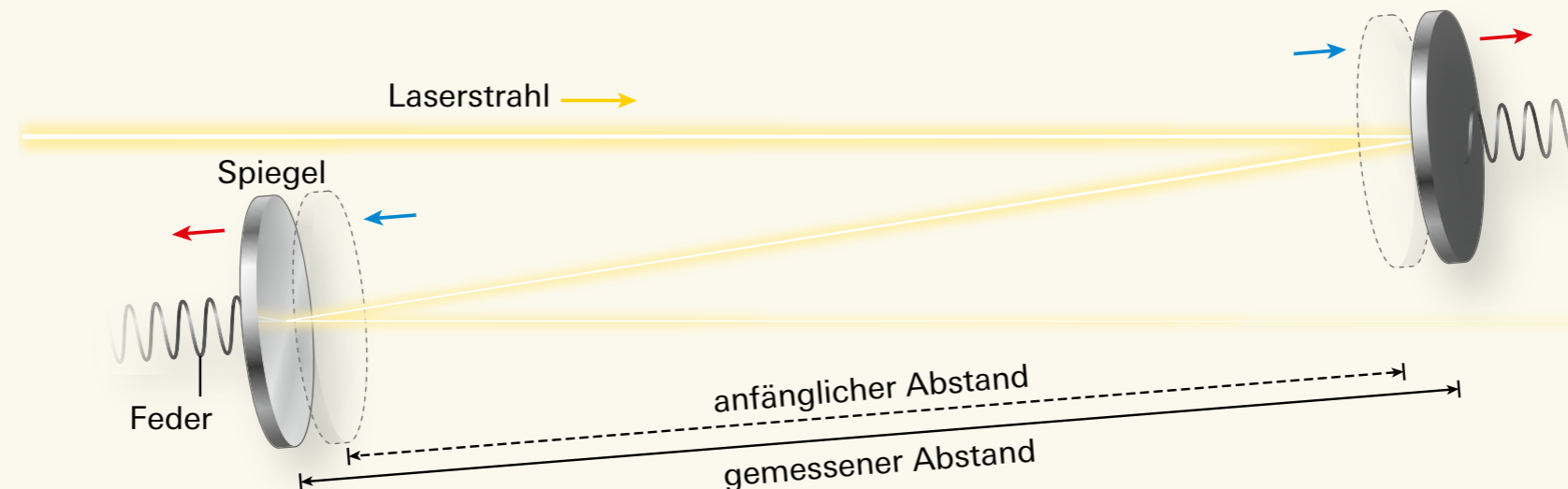
Das klingt wie Sciencefiction. Wie soll etwas eine negative Masse besitzen? Jedoch konnten Wissenschaftler zuvor bereits sowohl theoretisch wie auch in Experimenten zeigen, dass sich Oszillatoren unter gewissen Umständen so verhalten, als hätten sie eine negative Masse, ohne grundlegende physikalische Gesetze zu brechen.

Die Forscher um Møller haben solche Objekte nun genutzt, um das Quantenrau-

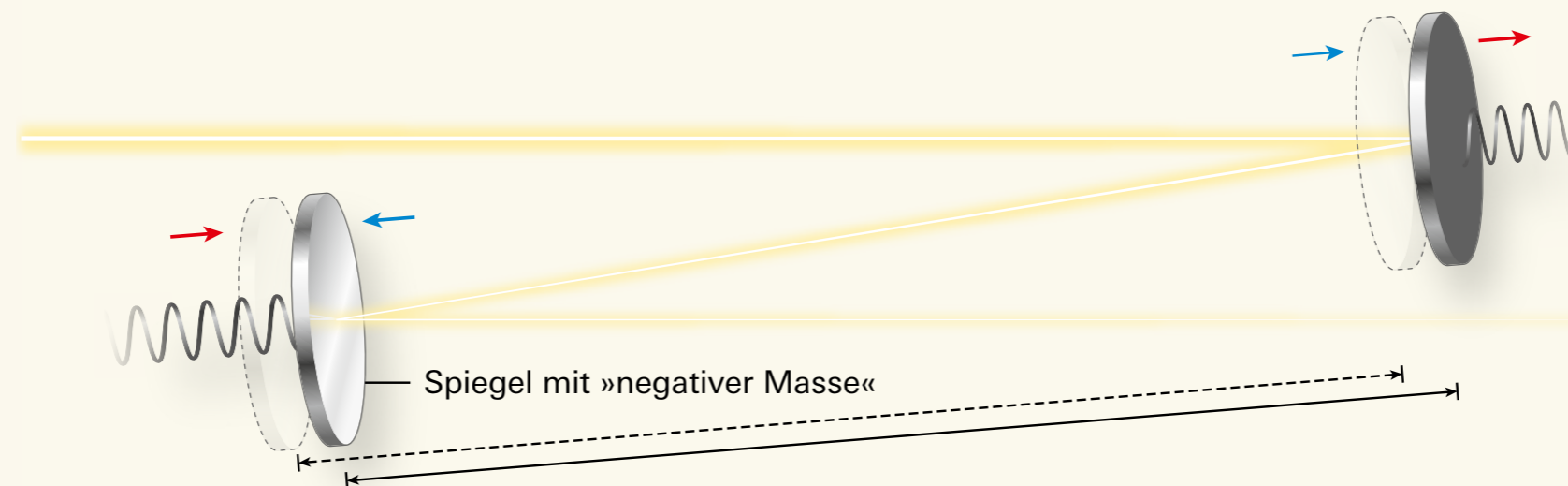
Durch geschickt konzipierte Experimente lässt sich sogar die Unschärferelation umgehen

# Bizarrer Spiegel im Gedankenexperiment

- 1 Die Photonen eines Laserstrahls übertragen ihren Impuls (blaue Pfeile) auf zwei frei aufgehängte Spiegel. Diese bewegen sich daraufhin (rote Pfeile), wodurch sich der Abstand zwischen ihnen vergrößert.



- 2 Ein hypothetischer Spiegel mit negativer Masse würde in die entgegengesetzte Richtung beschleunigt werden. Dadurch bliebe die Distanz zwischen ihm und einem herkömmlichen Spiegel stets gleich. Im Laborversuch verwendeten die Forscher den Drehimpuls einer Atomwolke, um eine negative Masse zu simulieren.



schen zu eliminieren. Ihr Äquivalent einer negativen Masse stammte vom Drehimpuls einer Wolke von Zäsiumatomen. In einem Atom trägt jedes Elektron einen so genannten Spin. Dieser quantenmechanische Drehsinn richtet sich stets nach einem äußeren Magnetfeld aus und verhält sich dabei wie ein Oszillator: Kippt man den Spin ein wenig, schwingt er zurück. Mit einer Technik namens optischem Pumpen – eine gezielte Anregung mit speziellem Licht – haben die Wissenschaftler die Orientierung des Gesamtspins der Zäsiumatome umgedreht. Wie die Physiker berechneten, wirkt ein Zäsiumatom mit derart invertiertem Spin auf die Photonen des auftreffenden Lasers wie ein Oszillator mit negativer Masse.

### **Das Quantenrauschen verschwand nicht ganz, doch das Prinzip funktioniert**

Die Forscher koppelten den Spin über den Lichtstrahl, ähnlich wie in unserem Gedankenexperiment, an einen konventionellen mechanischen Oszillator. Dieser bestand aus einer Membran aus Siliziumnitrid in einem optischen Resonator, bei dem möglichst oft hin- und herlaufendes Licht die Wechselwirkung mit der Membran verstärkte. Im Vergleich zum Aufbau mit einer

klassischen positiven Masse war das im Versuch ermittelte Quantenrauschen um 34 Prozent reduziert.

Bereits 2016 haben andere Forscher ein ähnliches Ergebnis mit einem unterschiedlichen Konzept erreicht. Dabei haben sie zwei mechanische Oszillatoren in einem supraleitenden elektrischen Schaltkreis vermessen. Hier waren allerdings extrem tiefe Temperaturen nötig, was praktische Anwendungen erschwert.

Die Rauschminderung ist zwar noch relativ moderat. Doch das Prinzip funktioniert, und es weist einen Weg in Richtung präziserer Sensoren für jegliche Kräfte, die kleinste mechanische Elemente bewegen können. Insbesondere scheint es für Gravitationswellendetektoren der nächsten Generation sinnvoll zu sein.

Darüber hinaus zeigt das Hybridsystem aus Spin und daran gekoppelter mechanischer Membran auf, wie Atome und mikroskopisch kleine Bauteile auf eine quantenmechanische Weise miteinander verbunden werden können. Solche Verschränkungen werden zukünftig außer in der Messtechnik vermutlich im Bereich der Quantenkommunikation und bei Quantencomputern eine wichtige Rolle spielen. ↩

(Spektrum der Wissenschaft, September 2017)

Møller, C. B. et al.: Quantum Back-Action-Evading Measurement of Motion in a Negative Mass Reference Frame. In: Nature 547, S. 191–195, 2017

Ockeloen-Korppi, C. F. et al.: Quantum Backaction Evading Measurement of Collective Mechanical Modes. In: Physical Review Letters 117, 140401, 2016



Im Abo nur  
**0,92 €**  
pro Ausgabe

Jetzt bestellen!  
**Das wöchentliche  
Wissenschaftsmagazin**  
als Kombipaket im Abo:  
Als App und PDF

HIER ABONNIEREN!

Jeden Donnerstag neu! Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature« in deutscher Übersetzung. Im Abonnement nur 0,92 € pro Ausgabe (monatlich kündbar), für Schüler, Studenten und Abonnenten unserer Magazine sogar nur 0,69 €.