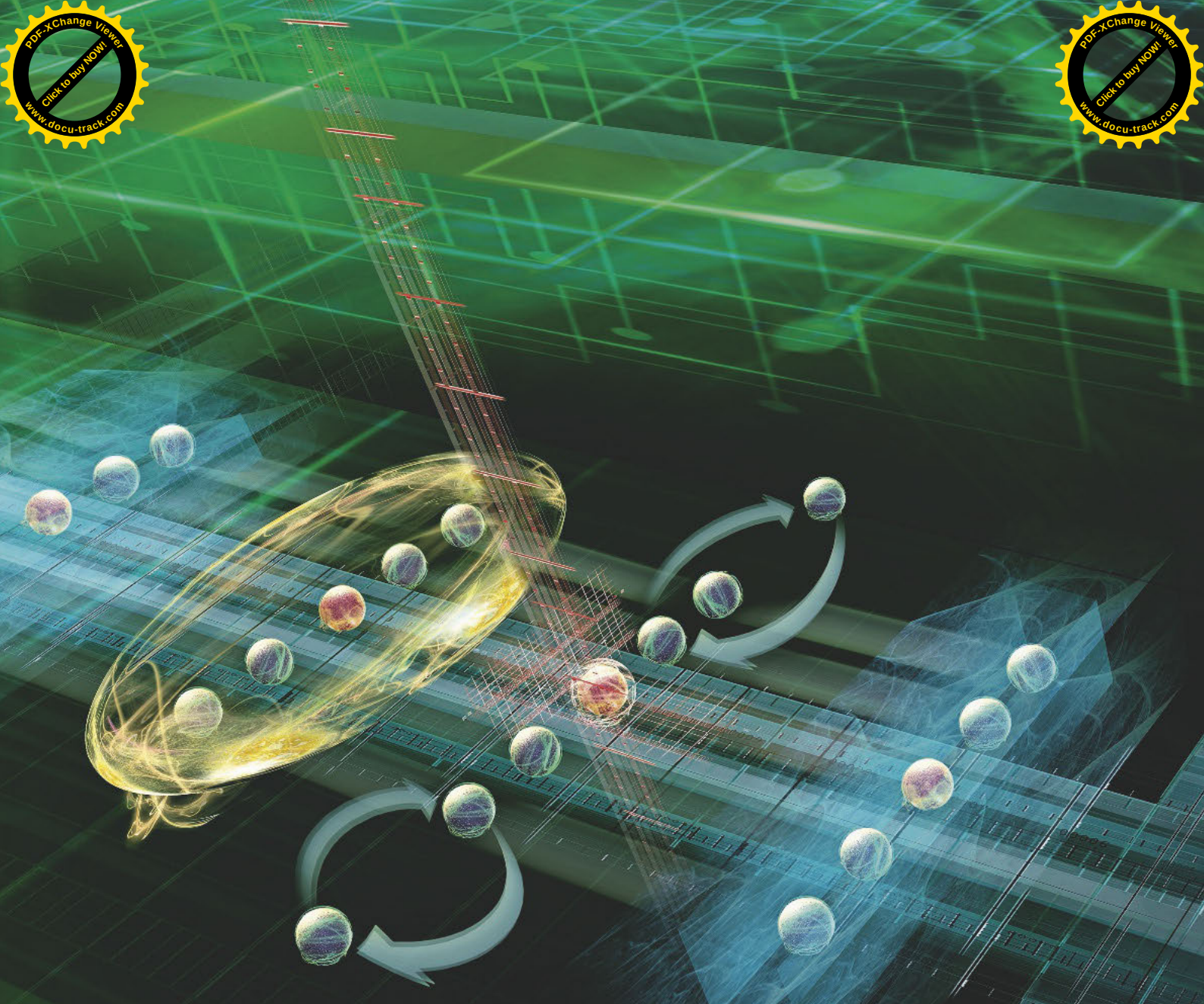
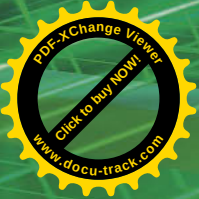




Der Traum vom Quantencomputer

Auf dem Weg zum neuen Wunderrechner wird ein Stein nach dem anderen zur Seite geräumt
von CHRISTIAN J. MEIER

Bausteine für Quantencomputer: Ferdinand Schmidt-Kaler, Forscher an der Universität Mainz (rechts), mit einer Ionenfalle, in der sich elektrisch geladene Atome einfangen und zum Rechnen nutzen lassen. Links: Illustration von Ionen, die durch Laserpulse verschränkt werden (gelb) und die Plätze tauschen.



Per Mausklick schiebt Henri Lehec fünf verwaschene Lichtpunkte auf einem Computerbildschirm hin und her, entfernt einen davon und lässt einen neuen erscheinen. Der Physiker sitzt zwischen Vakuumkammern, Kabeln, Lasern, Linsen und Spiegeln in einem Labor an der Universität Mainz. Was einem Computerspiel ähnelt, zeigt, wie präzise Physiker inzwischen die Welt der Quanten kontrollieren können.

In Wirklichkeit stupst Lehec per Mausklick einzelne Kalzium-Ionen umher – Teilchen, die nur ein Tausendstel so groß sind wie ein Virus. Die elektrisch geladenen Atome schweben in einer der Vakuumkammern, gehalten von elektromagnetischen Feldern. Lehec wirft einzelne Ionen aus dieser „Falle“, lädt neue hinein, ordnet die Teilchen zu einer Kette an und verschiebt diese.

Und das ist keine Spielerei: Lehecs Chef Ferdinand Schmidt-Kaler nutzt Kalzium-Ionen als Bausteine für einen künftigen Quantencomputer. Die Forscher arbeiten an einem von zwei Quantenrechnern mit, mit denen die Europäische Union die Konkurrenz aus USA und China hinter sich lassen will.

Woher kommt die Überlegenheit?

Physiker stehen vor der Erfüllung eines Traums, den einer ihrer besten Köpfe, Richard Feynman, schon in den 1980er-Jahren skizzierte. Zu einer Zeit, als Computer alle zwei Jahre ihre Leistung ver-

doppelten, ohne absehbares Ende, erkannte der Nobelpreisträger ihre Grenzen: Nie würden die Rechner in der Lage sein, Objekte Atom für Atom zu simulieren. Das ist mehr als nur ein theoretisches Problem. Denn virtuelle Experimente mit Molekülen oder Kristallen gelten als die dritte Säule ihrer Erforschung – neben Theorie und Laborexperiment.

Im Quantencomputer rechnen die Atome und Elektronen selbst

Der klassische Rechner ist an die Gesetze der klassischen Physik gebunden. Atome und Elektronen, die Bausteine von Molekülen, gehorchen dagegen der Quantenmechanik, die eine Art Parallelexistenz erlaubt: Ein Elektron muss sich ebenso wie ein Atom oder Lichtteilchen nicht entscheiden, ob es durch einen von zwei Spalten in einem Schirm tritt. Es nimmt einfach beide Wege gleichzeitig.

KOMPAKT

- Die Gesetze der Quantenmechanik erlauben Teilchen, gleichzeitig in mehreren Zuständen zu sein.
- Diese Fähigkeit zur Superposition soll ein Quantencomputer nutzen, um komplexe Aufgaben zu lösen.
- Ein Problem ist noch die Fehleranfälligkeit des Rechners.

Auch als Teil eines Moleküls lebt das Elektron sein Doppelleben als Teilchen und Welle, umkreist etwa zwei Atome simultan. Physiker nennen das „Superposition“.

Rechner in der Falle

Weil der Computer beide Varianten berücksichtigen muss, verdoppelt sich der Rechenaufwand. Er gerät in die Komplexitätsfalle. Ein Supercomputer mag noch so leistungstark sein, um zum Beispiel ein Molekül mit zig Atomen und Elektronen simulieren zu können: Ein einziges Elektron mehr würde die bereits ausgelastete Rechenpower ein zweites Mal beanspruchen. Derzeit schaffen Supercomputer Moleküle mit rund 50 Atomen. Eines mehr wirft sie aus dem Rennen.

Feynman wollte aus der Not eine Tugend machen: Warum nicht die Atome und Elektronen selbst rechnen lassen? Ein solcher „Quantencomputer“ würde die Fähigkeit zur Superposition von Natur aus mitbringen und Information parallel verarbeiten. Sein kleinster Baustein wäre nicht – wie beim klassischen Rechner – das Bit, das sich zwischen den Werten „1“ und „0“ entscheiden muss, sondern das „Quantenbit“, kurz „Qubit“, das 0 und 1 simultan speichert.

Der Quantenrechner beutet eine weitere Ressource aus, die nur die Quantenphysik bietet: die „Verschränkung“. Zwei Qubits, die einmal interagiert haben, sind von da an miteinander verbunden, selbst

wenn sie sich kilometerweit voneinander entfernen. Verändert sich das eine, dann ändert sich im selben Moment auch das andere. Auf diese Weise agieren viele Qubits als Team, verarbeiten somit die gespeicherten Werte simultan.

Viel mächtiger als vermutet

Feynmans vielversprechender Plan ruhte jedoch ein Jahrzehnt im Dornröschenschlaf. Der rasante Leistungszuwachs klassischer Rechner machte Alternativen zunächst unattraktiv. Doch dann zeigte der US-Mathematiker Peter Shor, dass ein Quantencomputer noch viel mächtiger sein würde, als Feynman ahnte. Er entwickelte einen Algorithmus für einen noch fiktiven Quantenrechner, der Zahlen im Handumdrehen in ihre Primfaktoren zerlegt. Auf klassischen Rechnern explodiert der Rechenaufwand für eine solche Aufgabe mit der Größe der zu zerlegenden Zahl – ähnlich wie für ein wachsendes Molekül. Weil ein Tablet Jahrmilliarden rechnen würde, ist das „Faktorisierungsproblem“ quasi unknackbar. Es dient der Sicherheit im Internet, etwa beim Online-Banking, digitalen Signaturen oder militärischen Geheimnissen.

Mit Shors Arbeit entstanden zwei neue Motive für die Entwicklung eines Quantencomputers: Großmächte wollten die

Ersten sein, die ihn haben. Darüber hinaus blühte die Idee eines digitalen Quantencomputers auf, der sich genauso universell programmieren ließe wie ein klassischer Computer – mit dem Unterschied, dass er quasi unendlich viel schneller rechnet. Diese Idee lebt inzwischen mehr denn je, nicht zuletzt, weil der klassische Rechner an seine Grenzen stößt. Die Tech-Branche sucht daher nach

Die Großmächte wollen die Ersten sein, die einen Quantencomputer haben

dem nächsten großen Ding. Offenbar glauben viele, dieses Ding sei der Quantencomputer. Doch ihn zu erträumen, ist eine Sache. Ihn zu bauen, eine andere.

„Es ist in etwa so, als wollten Sie einen radioaktiven Zerfall auf Knopfdruck anhalten“, illustriert Ferdinand Schmidt-Kaler die Herausforderung. Der Quantencomputer erfordert eine Kontrolle über die Welt der Quanten, die manche Physiker für unmöglich halten. Denn Qubits verlieren leicht ihre Superposition.

Dazu bedarf es nur einer minimalen Wechselwirkung mit ihrer Umwelt. Schon

der Stoß mit einem Luftmolekül macht aus dem Qubit ein klassisches Bit, das entweder 0 speichert oder 1. Das lästige Phänomen heißt „Dekohärenz“ und führt dazu, dass im Alltag keine Superposition zu beobachten ist: Keine Katze ist gleichzeitig lebendig und tot. Daher ist das Ziel aller Forscher das „lebende Qubit“, wie sie es nennen: im Grunde etwas Unnatürliches, eben wie ein radioaktives Atom, das man dauerhaft daran hindert zu strahlen.

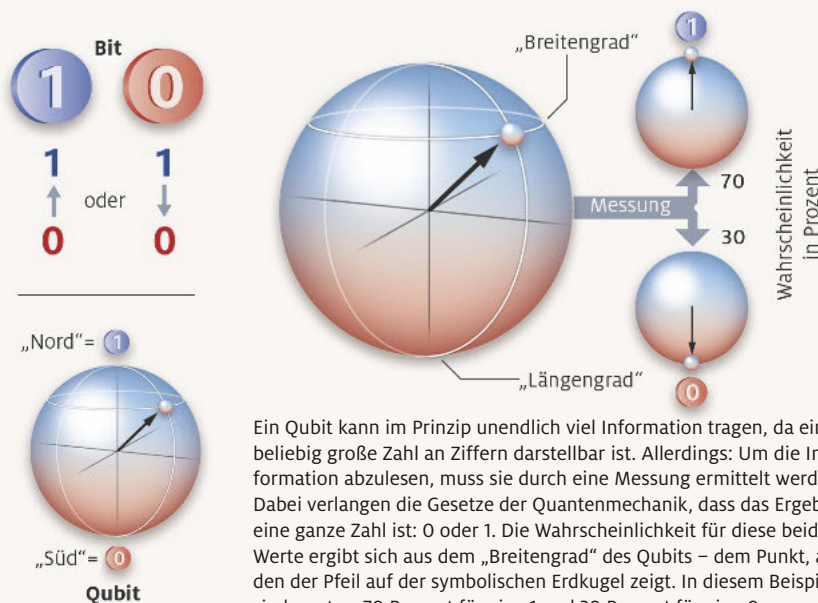
Die Forscher isolieren dazu ihre Qubits von allen Umwelteinflüssen, indem sie sie vor Magnetfeldern abschirmen, sie in ein möglichst perfektes Vakuum bringen oder sie auf tiefste Temperaturen abkühlen, auf knapp über dem absoluten Nullpunkt (minus 273 Grad Celsius). Doch völlig isolieren darf man die Qubits auch wieder nicht, denn der Quantencomputer soll ja Daten aufnehmen und Resultate liefern.

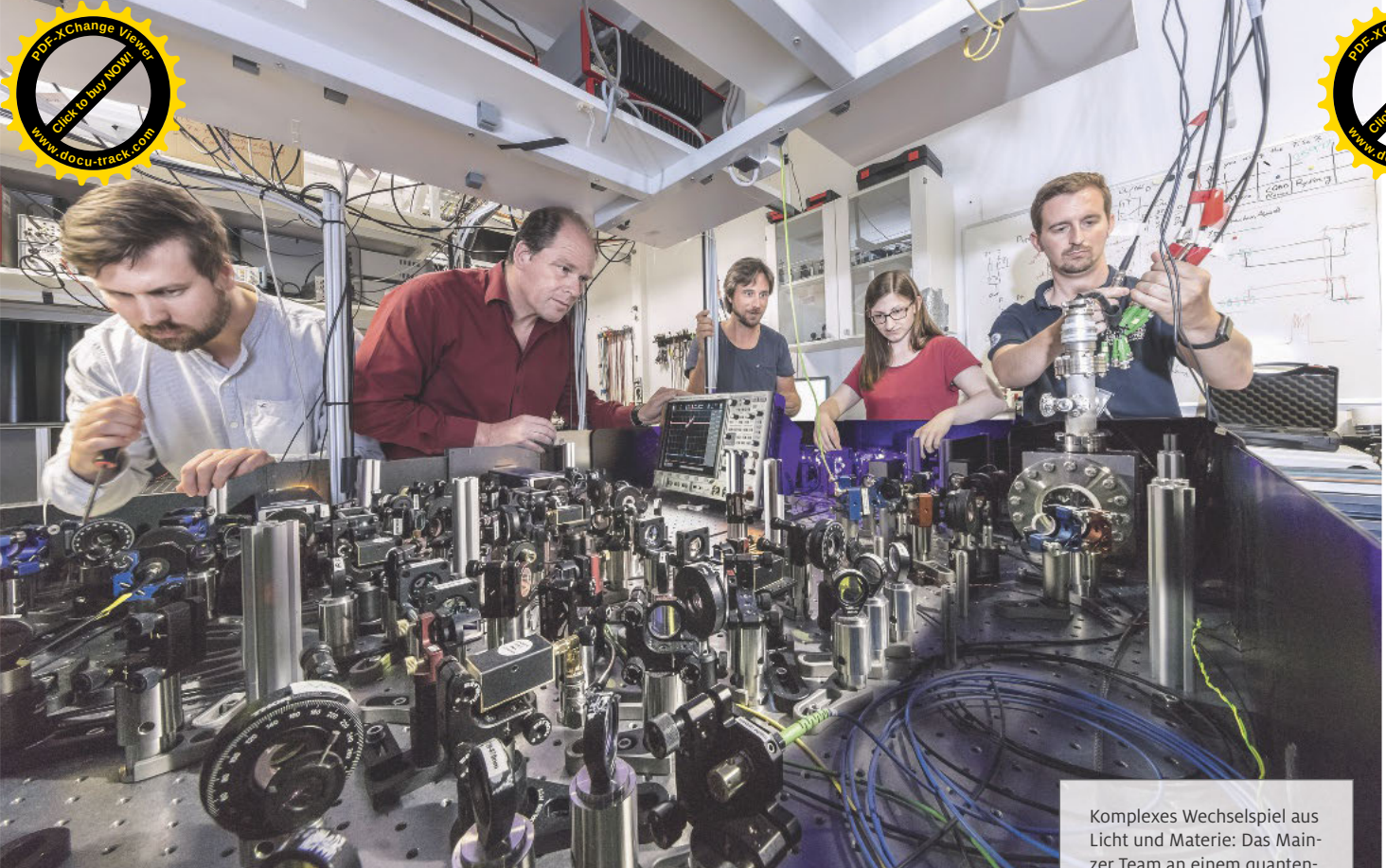
Kniffliger Spagat

Wie der Spagat gelingen soll, wissen die Physiker noch nicht. Sie testen viele Arten von Qubits: etwa Ionenketten wie in Mainz, Elektronen in winzigen Käfigen aus Halbleitermaterial, Lichtteilchen, die durch mikroskopische Lichtleiter flitzen oder supraleitende Schleifen, in denen Strom simultan rechts und links herum

Bits in der Quantenwelt

Ein „Bit“ steht in der Informationstechnik üblicherweise für einen von zwei möglichen Zuständen: „0“ oder „1“. In der Praxis lässt sich das etwa durch die Schalterstellung eines Transistors („an“ oder „aus“) realisieren – und abstrakt durch einen nach oben oder unten weisenden Pfeil darstellen. In der Quantenmechanik hingegen sind unendlich viele Zustände gleichzeitig möglich. Ein Quanten-Bit oder „Qubit“ kann daher durch einen Pfeil symbolisiert werden, der auf einen Punkt auf der Oberfläche einer Kugel zeigt. Betrachtet man die Kugel als Erdball, so entspricht der Nordpol beispielsweise dem Zustand „1“, der Südpol dem Zustand „0“. Alle anderen Punkte auf der Kugeloberfläche sind Überlagerungen dieser beiden Zustände.





Komplexes Wechselspiel aus Licht und Materie: Das Mainzer Team an einem quantenoptischen Experiment.

fließt. Jede der Plattformen hat ihre Stärken und Schwächen.

„Unsere Qubits leben relativ lange, etwa zwei Sekunden“, nennt Schmidt-Kaler einen Vorteil der Ionenketten. „Um jedoch mehr als rund tausend Rechenschritte ausführen zu können, müssen wir das Qubit noch viel länger am Leben halten“, räumt er ein. Das Rezept: Fehler, die durch Dekohärenz verursacht werden, rückgängig machen.

Dazu fügen die Forscher Qubits hinzu, die nicht rechnen, sondern als Sensoren wirken. Sie spüren, wenn ein rechnendes Qubit auf die Umwelt reagiert. Das melden sie, und ein Laser gleicht den Fehler aus. „Das ist harte Physik“, sagt Schmidt-Kaler. Er meint: Grundlagenforschung mit offenem Ausgang. Doch die Wissenschaftler sind optimistisch, dass es gelingt. Denn die Fehler können korrigiert werden, sobald der störende Einfluss der Umwelt unter ein gewisses Maß gedrückt wird, wie theoretische Physiker zeigen.

Tricks gegen zu viel Aufwand

Unklar ist bislang, wie viele zusätzliche Aufpasser-Qubits nötig sind. Der technische Aufwand könnte immens sein und ein nützlicher Quantencomputer könnte

Millionen von Qubits benötigen. Die Forscher sind dabei, das herauszufinden. Gibt es clevere Tricks, den Aufwand zu reduzieren? Wenn ja, dann wäre das so etwas wie ein Transistor für den Quantenrechner – eine Basiseinheit, die sich wie ein Legobaustein zu beliebig komplexen Rechnern erweitern ließe.

Allerdings: Viele Qubits allein machen noch keinen Quantencomputer. Um

Eine große Zahl an Qubits allein ergibt noch keinen Quantenrechner

komplizierte Aufgaben zu lösen, müssen die Teilchen auch miteinander verschränkt werden. Der Weltrekord liegt derzeit bei 20 verschränkten Kalzium-Ionen, aufgestellt von einem Team um Rainer Blatt an der Universität Innsbruck. Andere Rekordmeldungen, etwa die vom Internet-Konzern Google über einen Rechner mit 72 supraleitenden Qubits, erfüllen dieses Kriterium indessen nicht. Chefentwickler John Martinis will das Defizit jedoch binnen Monaten beheben.

Dass es dann allerdings schnell auch 1000 oder 10000 Qubits werden, glaubt in der Forschergemeinde niemand. Dennoch sprechen viele von einem Wettrennen um den Quantencomputer.

Wer entwickelt den Superrechner?

Der Wettbewerb setzt immense Geldmittel frei. Die USA und China preschen seit einigen Jahren vor. Keines der beiden Länder will dem anderen bei der codeknackenden Wunderwaffe den Vortritt lassen. Und sie wollen den nächsten Coup in der Computertechnik landen. Sowohl in den USA als auch in China investieren Staat und Privatwirtschaft Milliarden US-Dollar. Große Firmen wie Google und IBM in den USA sowie Alibaba in China haben erste Prototypen mit Qubits aus supraleitenden Schleifen gebaut. In den USA gibt es zudem Startup-Unternehmen, ausgestattet mit Hunderten Millionen Dollar Wagniskapital, die Prototypen betreiben und Algorithmen für künftige Quantenrechner entwickeln. Die US-Regierung will nun über eine Milliarde Dollar in eine zehnjährige Nationale Quanten-Initiative (National Quantum Initiative) stecken.

China stellt das noch in den Schatten: Zehn Milliarden Dollar pumpt es in ein



Quanten-Forschungszentrum in der Nähe von Shanghai, das 2020 seinen Betrieb aufnehmen soll. Eine der beiden Prioritäten der Wissenschaftler dort sind Quantencomputer. Die schillerndste Figur in der chinesischen Quantenforschung ist Jan-Wei Pan. Der Physiker hat in Europa promoviert und geforscht.

Wo Europas Stärken liegen

Der alte Kontinent ist stark in der Grundlagenforschung zum Quantencomputer. Da ihm jedoch sowohl das militärische Interesse als auch ambitionierte Digitalkonzerne fehlen, tut er sich schwer mit der Umsetzung. Das soll nun ein von der EU initiiertes Flaggschiff-Projekt für Quantentechnologie ändern – mithilfe von rund einer Milliarde Euro. Ein Teil davon geht in die Entwicklung von Quantencomputern. Innerhalb weniger Jahre sollen zwei Maschinen mit jeweils 50 bis 100 Qubit entwickelt werden – die eine mit Ionen-Qubits in Innsbruck, die andere mit supraleitenden Schleifen in Jülich.

Ein Rechner dieser Größe soll den leistungsstärksten Supercomputern bei einigen Anwendungen überlegen sein, etwa bei der Simulation von Molekülen. Doch der Durchbruch wären sie noch nicht. „Bei den 100 Qubits werden wir eine Weile hängen bleiben“, schätzt Frank Wilhelm-Mauch von der Universität des Saarlandes, Leiter eines der beiden Projekte.

Neben Problemen bei der „harten Physik“ gibt es auch technische Hürden. Die

supraleitenden Qubits werden mit Mikrowellen gesteuert, deren Zuleitungen in den Kühlapparat viel Platz benötigen. Es müssen platzsparende Leitungen entwickelt werden, um Tausende oder Millionen von Qubits regeln zu können.

Die Wissenschaftler, die an Ionen-Qubits forschen, kämpfen mit einem anderen Problem: Viel mehr als 20 Qubits lassen sich in einer Ionenkette nicht verschränken. Will man darüber hinaus, braucht man mehrere Ketten. Um Qubits

Quantencomputer könnten die Wirkstoffsuche in der Medizin stark beschleunigen

in verschiedenen Ketten zu verschränken, sollen einzelne Ionen wie Boten zwischen ihnen reisen.

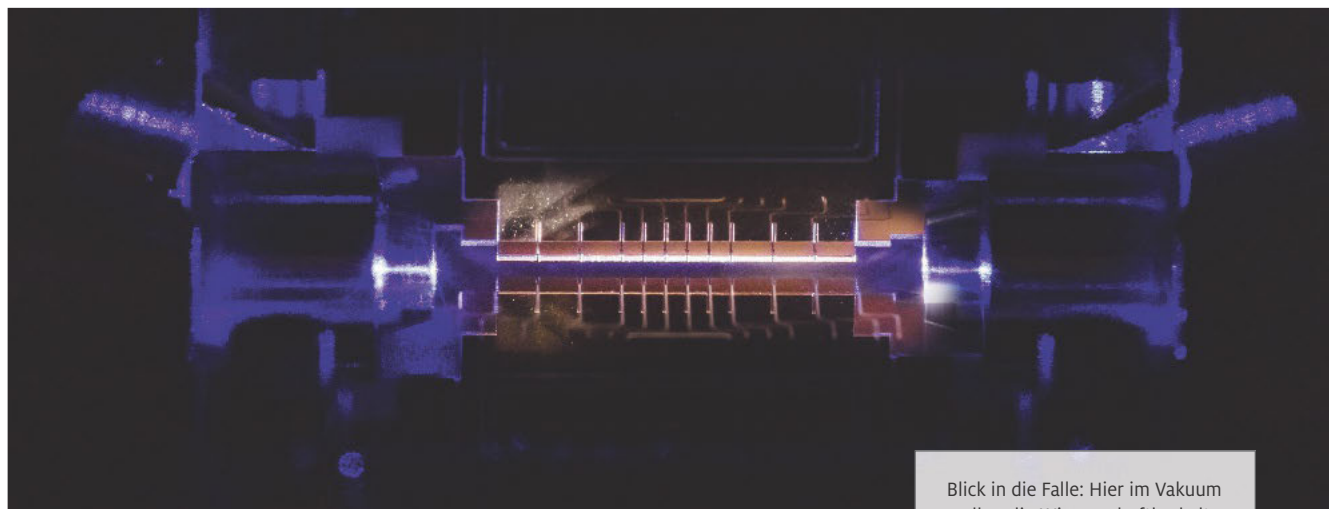
Die Mainzer Physiker bauen eigens Chips, um die winzigen Kuriere hin und her zu rangieren – eine Aufgabe, die über die reine Forschung hinausgeht. „Wir brauchen dafür Ingenieure“, sagt Schmidt-Kaler. Der Bau eines Quantencomputers ist ein Großprojekt. Bei dem EU-Flaggschiffprojekt sitzen Grundlagenforscher, Ingenieure und Industrie gemeinsam in einem Boot. Auch die anwendungsorientierte Fraunhofer-Gesellschaft und Privatfirmen wie der französische IT-Dienstleister Atos sind mit dabei. Schon jetzt lotet die Pharmaindustrie aus, wie

sie kleinere Quantenrechner, die es bereits als Cloudservice von IBM oder dem US-Start-up Rigetti gibt, nutzen könnte. Denn Quantencomputer könnten die Wirkstoffsuche beschleunigen. Bislang dauert das Jahre und verschlingt Milliardenbeträge, weil Tausende potenzielle Arzneien im Reagenzglas getestet und per Versuch und Irrtum ausgesiebt werden. Mit einem Quantenrechner ließe sich ein großer Teil der Experimente virtuell ausführen, so die Hoffnung.

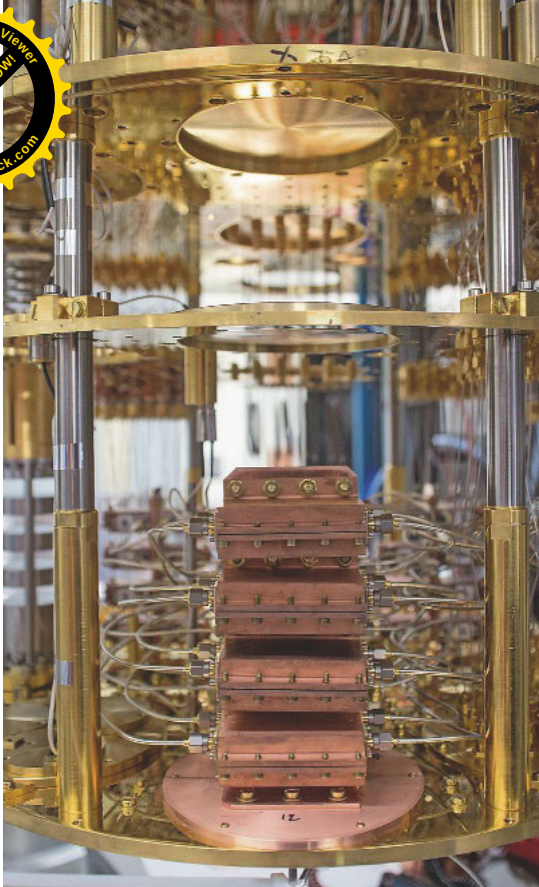
„Auf klassischen Computern ist dies nicht möglich, und auch auf bisherigen Quantenrechnern gelingt es noch nicht“, sagt Sebastian Zanker vom Karlsruher Start-up HQS Quantum Simulations, das für die Pharmaindustrie Algorithmen für den Zukunftsrechner entwickelt. Doch man bräuchte nur wenige Qubits mehr sowie eine höhere Lebensdauer der Qubits. „Dieser Technologiesprung kann schnell kommen“, sagt der Physiker. Dann wäre Feynmans Traum wahr geworden. Mit ähnlichen Algorithmen wie denen von HQS ließen sich auch Festkörper simulieren, was zu technischen Durchbrüchen führen könnte: der Entwicklung eines Supraleiters etwa, der bei Raumtemperatur verlustfrei Strom leitet.

Auf den Algorithmus kommt es an

Quantencomputer sind frei programmierbar. Allerdings sind sie nicht per se schneller. Denn beim Auslesen der Daten von einem Qubit kommt ein zufälliger Wert heraus. Ein Algorithmus muss daher



Blick in die Falle: Hier im Vakuum wollen die Wissenschaftler kalte Kalzium-Ionen erforschen.



Links: Das Innenleben eines bei IBM entwickelten Quantencomputers. Rechts: Die IBM-Forscher Hanhee Paik (links) und Sarah Sheldon (rechts) prüfen die Bauteile einer Kühlanlage im J. Watson Research Center bei New York. Eine vielversprechende Anwendung von Quantencomputern ist die Entwicklung neuer Medikamente.

sicherstellen, dass beim Übergang zum klassischen Bit das korrekte Ergebnis angezeigt wird. Das gelingt nur bei bestimmten Aufgaben. Besonders gut sollen die künftigen Wunderrechner etwa verborgene Muster in Daten erkennen. Das könnte Finanzmathematikern helfen.

Eine weitere Stärke der Quantenrechner sind Optimierungsaufgaben. Diese versuchen mit Gegebenem das Bestmögliche zu erreichen, etwa eine stauarme Lenkung bei starkem Verkehr. Auch das maschinelle Lernen, wie es für Bild- und Spracherkennung oder andere KI-Anwendungen wichtig ist, könnte mit Quantencomputern effizienter werden, wie erste Forschungsergebnisse hoffen lassen. Für derlei Aufgaben würden aber 50 oder 100 Qubits nicht reichen – es bräuchte Tausende, den Aufwand zur Fehlerkorrektur nicht mitgerechnet.

Doch schon bevor er überhaupt läuft, produziert der Quantenrechner Neues. Im Sommer 2018 sah sich die damals 18-jährige Ewin Tang an der University of Texas in Austin einen neuen Algorithmus für Quantencomputer an. Der sollte beispielsweise Empfehlungssysteme beschleunigen, die in Online-Shops Produkte suchen, die ein Kunde mögen könnte. Eigentlich lautete Tangs Aufgabe,

mathematisch zu beweisen, dass keine klassische Software genauso leistungsfähig sein kann. Doch das Mathematik-Wunderkind enttäuschte seinen Professor: Inspiriert vom Quantenalgorithmus fand Tang tatsächlich einen klassischen Algorithmus, der genauso schnell Empfehlungen findet.

Das Beispiel zeigt, dass die andere Art, mit der Software für Quantencomputer entwickelt wird, sich auf die klassische Softwareproduktion übertragen lässt. Ähnliches gelang bereits mit einem Optimierungs-Algorithmus.

Das Rätsel von Raum und Zeit

Der Bau des Quantencomputers inspiriert auch Physiker, die über eines der größten Rätsel ihrer Zunft nachdenken. Es betrifft das Wesen von Raum und Zeit, die Albert Einstein zur vierdimensionalen Raumzeit zusammengefasst hat. Um sie zu erklären, fehlt den Wissenschaftlern bislang eine einheitliche Theorie. So stehen Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie und die Quantenmechanik nebeneinander: Sie sind nicht miteinander vereinbar, und ihre Gültigkeit beschränkt sich jeweils auf ein bestimmtes Größenregime: Während die Allgemeine Relativitätstheorie das All als großes Ganzes

beschreibt, erklärt die Quantenmechanik den Mikrokosmos der Elementarteilchen.

Bei der Suche nach einer einzigen Theorie, die alles umfasst, könnte den Forschern eine Analogie zum Prinzip des Quantencomputers helfen. So berichtete der chinesische Theoretische Physiker Xiao-Linang Qi, der an der Stanford University in Kalifornien forscht, vor Kurzem im Fachmagazin Nature, dass die menschliche Wahrnehmung von Raum und Zeit dem Verfahren zur Korrektur von Fehlern beim Rechnen mit verschränkten Qubits entspricht. Die Qubits selbst ähneln demnach der Raumzeit als Grundpfeiler des Universums.

Das bedeutet: Selbst, wenn es niemals gelingen sollte, einen funktionsfähigen Quantencomputer zu bauen, könnte die Erforschung seiner physikalischen Grundlagen künftig immerhin das Verständnis der Wissenschaftler vom Universum ein gutes Stück voranbringen. ■



CHRISTIAN J. MEIER

ist Journalist und Physiker. Mit „Eine kleine Geschichte des Quantencomputers“ hat er ein Buch über die sagenhafte Maschine verfasst.