

**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:

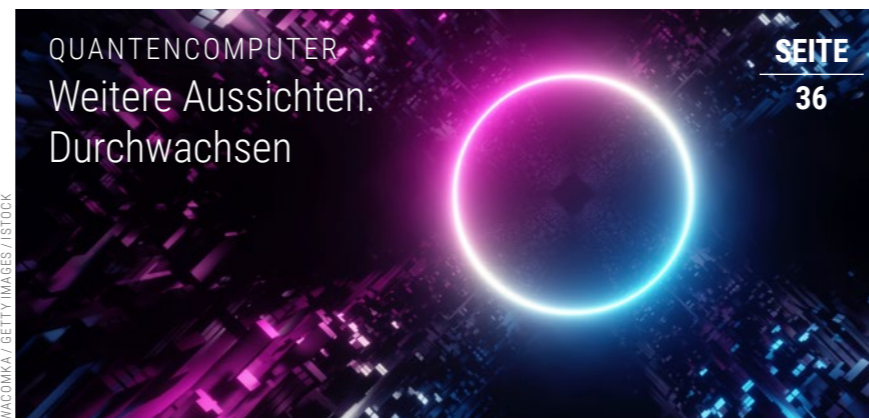
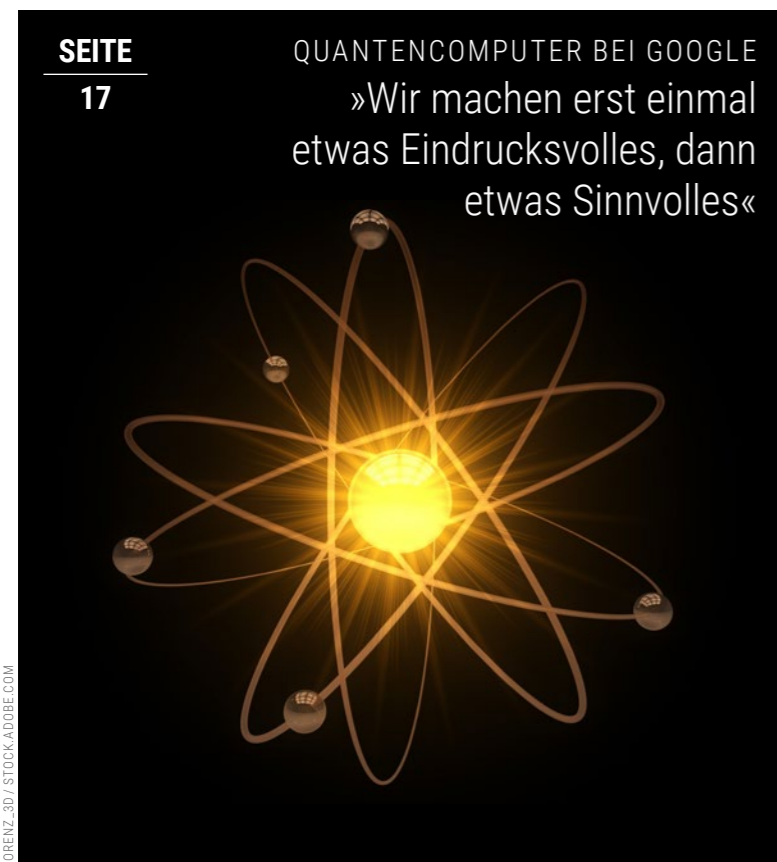
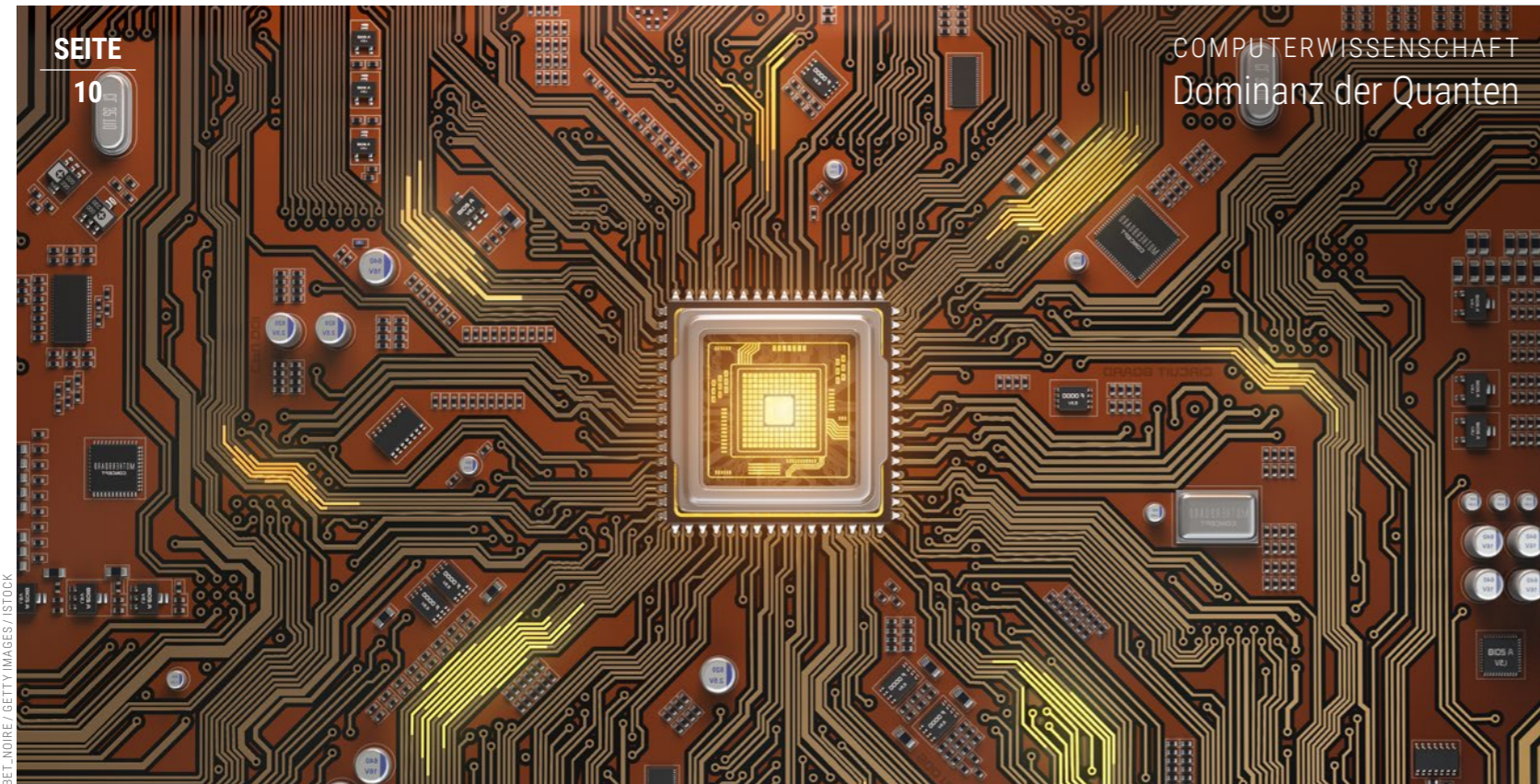


**CHEFREDAKTEURE:** Prof. Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.), Dr. Uwe Reichert  
**REDAKTIONSLEITER:** Dr. Hartwig Hanser, Dr. Daniel Lingenhöhl  
**ART DIRECTOR DIGITAL:** Marc Grove  
**LAYOUT:** Oliver Gabriel, Marina Männle  
**SCHLUSSREDAKTION:** Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle  
**BILDREDAKTION:** Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe  
**PRODUKTMANAGEMENT DIGITAL:** Antje Findekle, Dr. Michaela Maya-Mrschtik  
**VERLAG:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Tiergartenstr. 15-17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114, USt-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 Rechtsinhaberschaft 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-



**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.

FRIEDERIKE HENTSCHEL

**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 produktauglich. 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 –



**EU-Kommission und Wissenschaftler auf der Quantum Europe.**

EU2016 NL / FOTO: MINISTERIE VAN ECONOMISCHE ZAKEN/MARTIJN BEEKMAN / QUANTUM-EUROPE / CC BY 2.0 (CC BY)

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 weitergeteilt 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-**