

Spektrum
der Wissenschaft

42.21

KOMPAKT

QUANTEN COMPUTER

Der Weg in die praktische Anwendung

Quantum System One

Deutschlands erster Quantencomputer

Fehlerkorrektur

Google Quantum AI
demonstriert zwei Verfahren

Informatik

Wie komplex
darf es sein?





Antje Findeklee
E-Mail: findeklee@spektrum.de

Liebe Lesende,

als Google 2019 den ersten Quantencomputer vorstellte, der klassische Rechner übertrumpfen sollte, war die Skepsis zunächst groß – er habe seine Quantenüberlegenheit nur anhand einer maßgeschneiderten Spezialaufgabe gezeigt und die Fehlerrate sei noch viel zu hoch, so äußerten sich Kommentatoren. Inzwischen jedoch hat Google auch Erfolge bei der Fehlerkorrektur zu vermelden, und in Deutschland existiert mit Quantum System One ein erster Quantencomputer, der vom Konkurrenten IBM und der Fraunhofer-Gesellschaft entwickelt wurde und Forschenden oder Unternehmen zur Verfügung steht. Angesichts dieser Fortschritte stellen sich natürlich Fragen von der Konstruktion weiterer Bauteile bis hin zu Kryptografieverfahren und theoretischen Überlegungen, welche Bedeutung Quantencomputer für die Lösung mathematischer und physikalischer Annahmen spielen könnten.

Eine spannende Lektüre wünscht Ihnen

Erscheinungsdatum dieser Ausgabe: 25.10.2021

CHEFREDAKTION: Dr. Daniel Lingenhöhl (v.i.S.d.P.)

REDAKTIONSLEITUNG: Alina Schadwinkel (Digital),
Hartwig Hanser (Print)

CREATIVE DIRECTOR: Marc Grove

LAYOUT: Oliver Gabriel, Marina Männle

SCHLUSSREDAKTION: Christina Meyberg (Ltg.),
Sigrid Spies, Katharina Werle

BILDREDAKTION: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe

REDAKTION: Antje Findeklee, 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-IdNr.: DE229038528

GESCHÄFTSLEITUNG: Markus Bossle

MARKETING UND VERTRIEB: Annette Baumbusch (Ltg.),
Michaela Knappe (Digital)

LESER- UND BESTELLSERVICE: Helga Emmerich, Sabine Häusser,
Ilona Keith, Tel.: 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de

BEZUGSPREIS: Einzelausgabe € 4,99 inkl. Umsatzsteuer

ANZEIGEN: Wenn Sie an Anzeigen in unseren Digitalpublikationen interessiert sind, schreiben Sie bitte eine E-Mail an anzeigen@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: © 2021 (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. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

Folgen Sie uns:



SEITE
04

QUANTUM SYSTEM ONE
»Wir könnten in einigen
Bereichen noch Erster werden«

YUCELVILMAZ / GETTY IMAGES / ISTOCK

SEITE
25

UNERWARTETER KONKURRENT
Leistungsstärkster
Quantenrechner der Welt?

MONSITJ / GETTY IMAGES / ISTOCK

INFORMATIK

Wie komplex darf es sein?

SEITE
46

JAMESEDHART / STOCK.ADOBE.COM

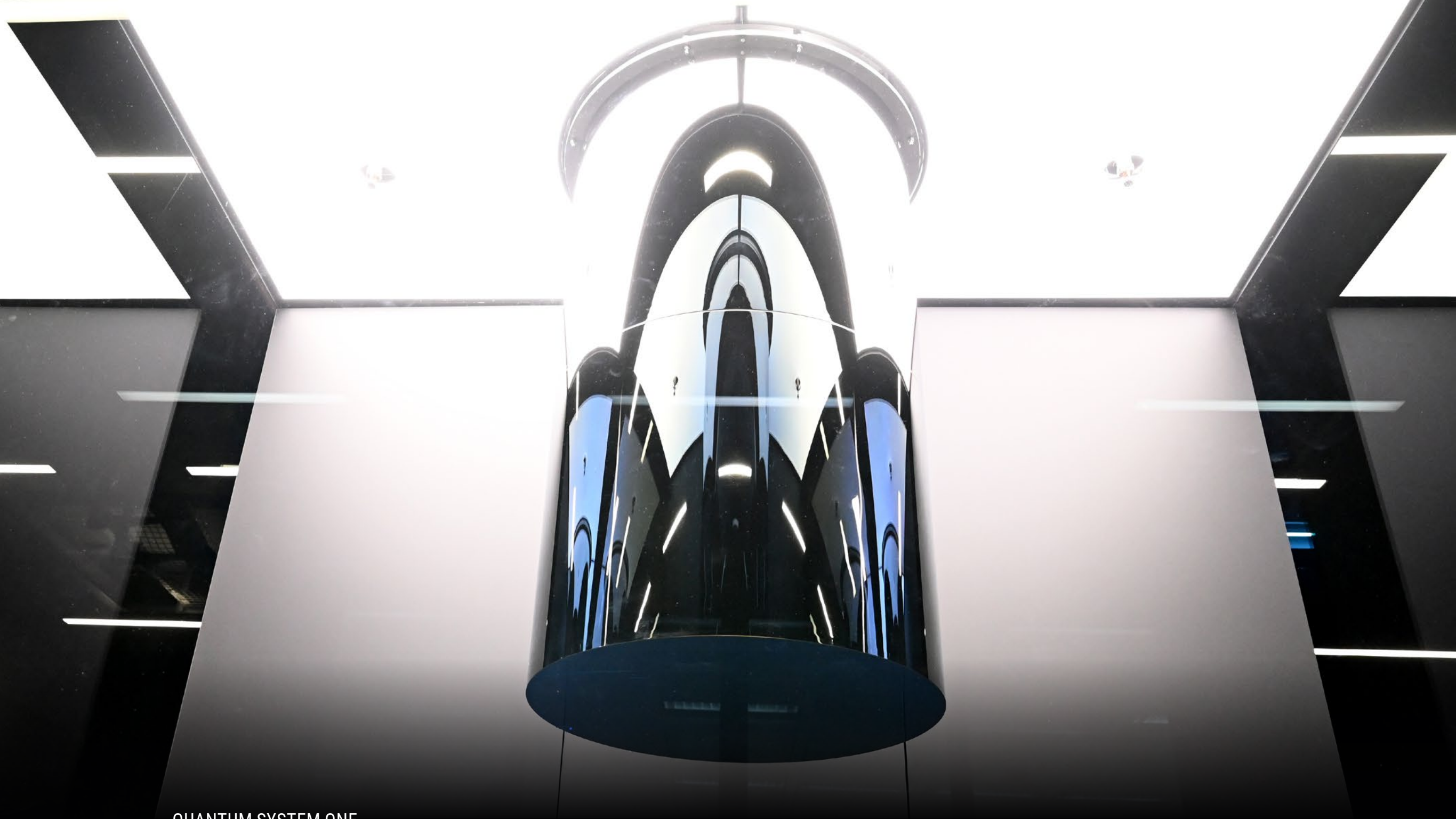
QUANTENPHYSIK

Zuwachs für den Doppelspalt

SEITE
55

PIRANKA / GETTY IMAGES / ISTOCK

- 11 DER ERSTE SEINER ART
Googles Quantencomputer
- 17 QUANTENKRYPTOGRAPHIE
»Wenn wir zu lange warten,
wird es zu spät sein«
- 22 RECHNEN MIT LICHT
Chinesischer Quantencomputer beweist
Quantenüberlegenheit
- 31 ESSENZIELLE KONTROLLE
Google demonstriert effiziente
Quanten-Fehlerkorrektur
- 34 PHASENVERSCHIEBUNG STATT STROM
Theoretisch vorhergesagte
Quantenbatterie konstruiert
- 36 QUANTENEFFEKTE
Neuer Bauplan für Ein-Atom-Transistoren
- 38 KÜHLUNG
Quantencomputer nimmt Temperaturhürde
- 40 QUANTEN-INTERNET
Neuer Rekord bei verschränkten
Quantenspeichern
- 42 MATERIALWISSENSCHAFTEN
Verflochtene Teilchen



QUANTUM SYSTEM ONE

»Wir könnten in einigen Bereichen
noch Erster werden«

von Eike Köhl

Deutschland hat seinen ersten Quantencomputer. Fraunhofer-Koordinator Oliver Ambacher spricht im Interview über die ersten Anwendungen und wo Deutschland noch aufholen muss.

Mitte Juni 2021 präsentierte IBM in Zusammenarbeit mit der Fraunhofer-Gesellschaft das Quantum System One, das in der IBM-Zentrale in Ehningen nahe Stuttgart steht. Die Nutzung des Quantencomputers geschieht exklusiv durch Fraunhofer und Partner, die über ein Ticketsystem Zugriff auf das System erhalten. Oliver Ambacher, Leiter des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Festkörperphysik IAF in Freiburg, koordiniert das Projekt. Im Interview erzählt er, ob das Zeitalter des Quantencomputing nun auch in Deutschland angekommen ist und wo noch nachgebessert werden muss.

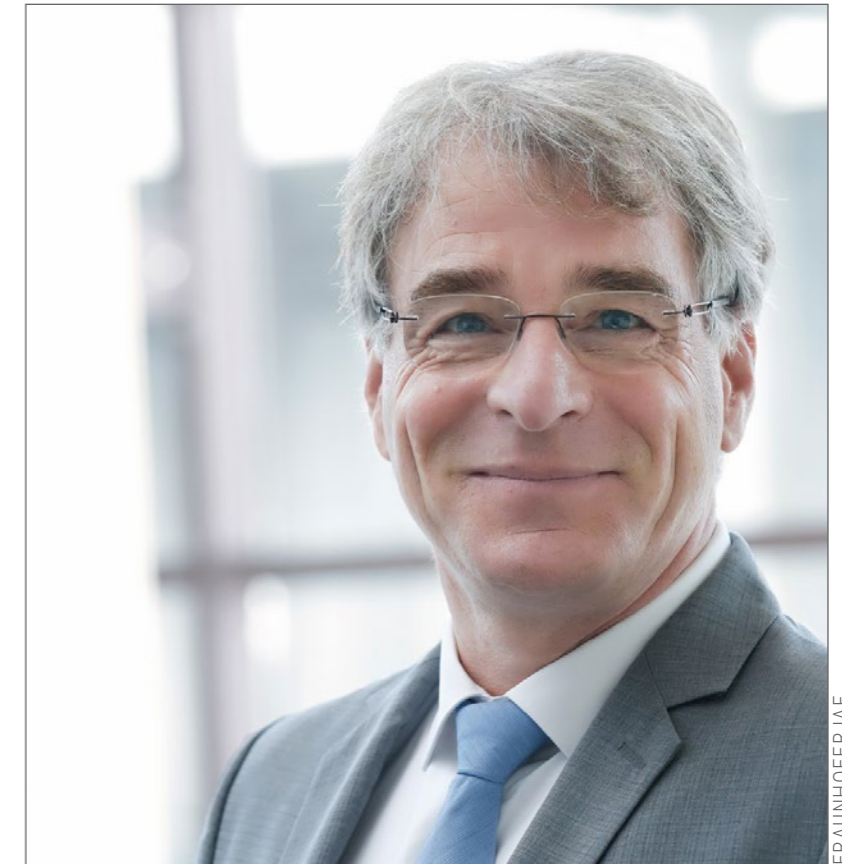
»Spektrum.de«: Seit Kurzem steht der erste Quantencomputer Deutsch-

Eike Kühl ist Journalist für Digital- und Wissenschaftsthemen.

lands zur Nutzung bereit. Was berechnen Sie derzeit konkret auf dem System in Ehningen?

Oliver Ambacher: Wir finden derzeit heraus, was der Quantencomputer gut kann und was nicht und wie man ihn in seiner Leistungsfähigkeit steigern kann. In unserer Gruppe bei Fraunhofer haben wir damit begonnen, quantenchemische Reaktionen von Metallatomen mit Wasserstoffatomen zu simulieren. Dies ist eine gute Testanwendung, da wir hier mit Fehlern, die die Systeme immer noch machen, vergleichsweise gut umgehen können. Das Land Baden-Württemberg hat Mittel für sechs Forschungsprojekte für Mitglieder des Kompetenzzentrums bereitgestellt, die die Leistungsfähigkeit des Quantencomputers in den Bereichen Quantenchemie, Logistik, Finanzwesen und Robustheit von Netzwerken evaluieren.

Wie kann ich als Firma oder Forschungseinrichtung auf den Quan-



FRAUNHOFER IAF

OLIVER AMBACHER | Der Professor für Leistungselektronik an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg leitet das Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF in Freiburg. Er koordiniert mit seinem Institut und dem Fraunhofer IAO in Stuttgart das Kompetenzzentrum »Quantencomputing Baden-Württemberg« und in dessen Rahmen auch die Zusammenarbeit am IBM Q System One in Ehningen.

tencomputer zugreifen? Muss ich eine bestimmte Software beherrschen oder Quantenphysiker im Team haben?

Ein physikalisches Grundverständnis hilft sicherlich. Wir bringen momentan auch Studierenden des 6. Semesters bei, wie der Computer funktioniert und wie man ihn programmieren kann. Die Studierenden können ungefähr nach zwei, drei Wochen erste Schritte mit dem System in Ehningen machen und erste Algorithmen mit der Programmiersprache Qiskit von IBM testen. Man muss also nicht Quantenphysik studiert haben, um erste Erfahrungen zu sammeln. Um auf das System konkret zugreifen zu können, muss man Mitglied im Kompetenznetzwerk werden und ein Ticket erwerben, das kostet zirka 11000 Euro pro Monat. Dann können Sie direkt über den Laptop auf die 27 Qubits (siehe Infokasten) des Quantencomputers zugreifen.

Wie sehr profitiert Fraunhofer davon, mit einem großen Unternehmen wie IBM zusammenzuarbeiten?

Wir versuchen, uns gegenseitig zu helfen. Ein Problem ist, dass alle derzeitigen

Kleines Quantencomputer-Glossar

Qubit

Ein traditioneller Computer speichert Informationen in Form von Bits. Ein Bit kann zwei Zustände annehmen, entweder null oder eins. Je mehr Bits es gibt, desto mehr Zahlen und desto mehr Informationen können dargestellt werden. Ein Quantencomputer dagegen rechnet mit Quantenbits, kurz Qubits. Die können ebenfalls null oder eins repräsentieren, aber, und das ist der Unterschied, auch gleichzeitig null oder eins sein. Zwei Qubits können somit vier gleichzeitige Zustände annehmen, drei Qubits bereits acht und 20 Qubits mehr als eine Million (2^{20}) Zustände. Dieser so genannte Quantenparallelismus führt dazu, dass Quantencomputer im Vergleich zu einem klassischen Computer Berechnungen nicht nur hintereinander (seriell), sondern auch gleichzeitig (parallel) durchführen – und somit viel mehr Informationen in viel kürzerer Zeit speichern können.

Superposition und Verschränkung

Qubits machen sich zwei elementare quantenmechanische Prozesse zu Nutze: Wenn sie gleichzeitig im Zustand von null und eins sind (oder theoretisch in allen erdenkbaren Zuständen dazwischen), spricht man vom Zustand der Überlagerung oder auch Superposition. Zudem wechselwirken Qubits mit anderen Qubits, was man Verschränkung nennt. Verändert man ein Qubit, reagieren alle mit ihm verschränkten Qubits darauf, auch über lange Strecken hinweg. In den bisherigen Quantencomputern sind allerdings bislang vor allem benachbarte Qubits verschränkt.

Kohärenzzeit

Die Zeit, in der Qubits im Zustand der Superposition und Verschränkung sind, nennt man Kohärenzzeit. Nur in diesem Zeitraum sind quantenmechanische Berechnungen möglich. Sobald man das Ergebnis misst, fallen die Qubits in den Zustand von entweder null oder eins zurück, das System muss dann vereinfacht gesagt neu gestartet werden. Bislang liegt die Kohärenzzeit im Bereich von maximal Millisekunden. Um möglichst lange Berechnungen durchführen zu können, ist es deshalb wichtig, die Kohärenzzeit zu verlängern.

Quantencomputer noch Prototypen und somit Einzelanfertigungen sind. Das macht sie teuer, sowohl im Bau als auch im Betrieb. Außerdem bieten alternative Systeme bislang nur einen Zugriff über die Cloud an, die Computer selbst stehen in anderen Ländern. Hier schaffen wir von Fraunhofer und IBM Abhilfe: Universitäten, Spin-offs und Unternehmen kommen unkompliziert und schnell an das System, und wir von Fraunhofer ermöglichen den direkten Zugriff auf die Hard- und Software. Wir können also nicht nur im Simulator, sondern direkt am Objekt lernen, wie etwa die elektrischen Signale verarbeitet werden oder das System kalibriert wird. Das ermöglicht eine steile Lernkurve, die uns dann auch bei der Entwicklung eigener Systeme und Programme hilft.

Bei einer Schlüsseltechnologie wie Quantencomputing möchte man sich nicht zu abhängig von den großen Unternehmen des Silicon Valley wie IBM und Google machen. Wie wichtig ist es, dass nun der erste Quantencomputer auf deutschem Boden steht?

Supraleiter und Ionenfallen

Um Qubits zu erstellen, verwenden die meisten Quantencomputer Supraleiter: Schaltkreise auf Basis von Metallspulen werden dabei fast auf den absoluten Nullpunkt heruntergekühlt, wodurch sie supraleitend werden. Elektrischer Strom kann in beide Richtungen ohne Widerstand durch sie hindurchfließen, wodurch »künstliche Atome« entstehen. Mit Hilfe von Mikrowellen werden anschließend die Zustandsveränderungen herbeigeführt. Alternativ lassen sich Qubits auch mit Hilfe von Ionenfallen realisieren: Hier werden elektrisch geladene Atome mittels elektrischer und magnetischer Felder im Vakuum festgehalten. Beide Ansätze haben ihre Vor- und Nachteile.

Quantenalgorithmus

Ein Quantencomputer wird zwar mit herkömmlichen Computern gesteuert, allerdings mit speziellen Programmierumgebungen wie Quiskit von IBM. Daraus werden Quantengatter erstellt, mit denen die Qubits angesteuert werden. Ein Quantenalgorithmus ist somit eine Berechnung oder Anwendung, die auf Quantencomputern ausgeführt werden kann.

Quantenüberlegenheit

Der Augenblick, in dem ein Quantencomputer bei der Ausführung einer Aufgabe die besten klassischen Supercomputer übertrifft, wird als Quantenüberlegenheit bezeichnet. Das ist erstmals einem System von Google im Jahr 2019 gelungen, auch wenn die Aufgabenstellung im Anschluss kritisiert wurde. Gemeinhin sollen Systeme ab 50 Qubits in der Lage sein, alle bisherigen Supercomputer abzuhängen. Allerdings ist man noch lange nicht so weit, dass Quantencomputer für universelle Aufgaben eingesetzt werden können. Die bisherigen Systeme sind dagegen für bestimmte Quantenalgorithmen optimiert.