Quantentechnologie Ulm

Diamanten für Life Sciences-Innovationen

Der weltweit erste kommerzielle Quantencomputer, IBM „Q System One", steht jetzt in Ehningen bei Stuttgart bereit, um der Quantentechnologie in Deutschland den Sprung nach vorne zu ermöglichen. Genau dorthin, wo klassische Computer an ihre Grenzen stoßen. Die Universität Ulm ist an drei der sechs vom Wirtschaftsministerium geförderten Verbundprojekten beteiligt, um komplexe Simulationen von der Medikamentenentwicklung und Medizin bis hin zur Batterieforschung zu erstellen.

Es erscheint kurios, Quantenphysik mit „einfach" zu verbinden. Im Grunde besteht sie aber tatsächlich aus wenigen, einfach erscheinenden Formeln, die alle Theorien um uns herum erklären. Schwierig wird es, diese Grundlage als Tool darzustellen und zu nutzen. Hier setzen Forscher aus sechs Fraunhofer-Instituten, 16 weiteren Forschungseinrichtungen – darunter die Universität Ulm sowie das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt – und 40 Unternehmen als Partner an. Übergreifendes Ziel: Skalierbare Architekturen entwickeln, die neue Potenziale zur Datenbanksuche, Materialentwicklung bis hin zu Simulationen für Medizin, Umwelt- und Biowissenschaften eröffnen. Dafür steht allen Beteiligten im Rahmen des Fraunhofer-Kompetenznetzwerks der IBM-Quantencomputer „Q System One" zur Verfügung.[1]

Was macht Quantentechnologie so außergewöhnlich schnell?

„Viele Probleme lassen sich im klassischen Computing nicht akkurat lösen", erklärt Prof. Dr. Fedor Jelezko, Leiter des Ulmer Instituts für Quantenoptik. „Möchte man beispielsweise Eigenschaften und Verhalten einzelner Moleküle exakt berechnen, ist das meist nur über Annäherung möglich. Mit dem Quantencomputer dagegen lassen sich Lösungen relativ einfach, exakt und schnell erhalten."

Konventionelle Computer speichern Information in Form von Bits, die nur zwei mögliche Zustände annehmen können: Eins und Null. Ein Qubit eines Quantencomputers stattdessen befindet sich für eine bestimmte Zeitspanne in einem Überlagerungszustand: Eins, Null und alles dazwischen – eine Art Wellengleichung mit mehreren Zuständen gleichzeitig.

Und es gibt noch ein weiteres Phänomen, das Quantensysteme schneller macht. „Mehrere Qubits lassen sich gekoppelt in Schwingung versetzen", erläutert Jelezko das Prinzip der Verschränkung. Qubits bilden so ein System, das sich gesamtheitlich analysieren und manipulieren lässt.

Überlagerungszustand (Superposition):

In normalen Computern sind Bits die kleinsten Einheiten an Informationen, sie können entweder Null oder Eins sein. Für Rechenoperationen wird eine Kombination von mehreren Bits genutzt, die für sehr komplexe Berechnungen an Grenzen stoßen. Quantencomputer benutzen Qubits: Qubits können Null und Eins gleichzeitig sein – wie bei einer Münze mit Kopf (Null) und Zahl (Eins), die, in die Luft geworfen, sich dauernd dreht. Der Zustand ist exponentiell: Sind beispielsweise vier klassische Bits jeweils nur in einer von 2^4, also 16, Anordnungen repräsentiert, befinden sich hingegen vier Qubits in all diesen 16 Kombinationen zur selben Zeit. Ein Quantencomputer kann demnach alle möglichen Lösungen eines Problems gleichzeitig prüfen, während ein klassischer Computer dies nacheinander prüft. Das Quantenteilchen hält beide Zustände so lange inne, bis man es misst. Dadurch verlässt es den Überlagerungszustand und fällt in einen der beiden Zustände Null oder Eins zurück, was sich dann in einem klassischen Bit speichern lässt.

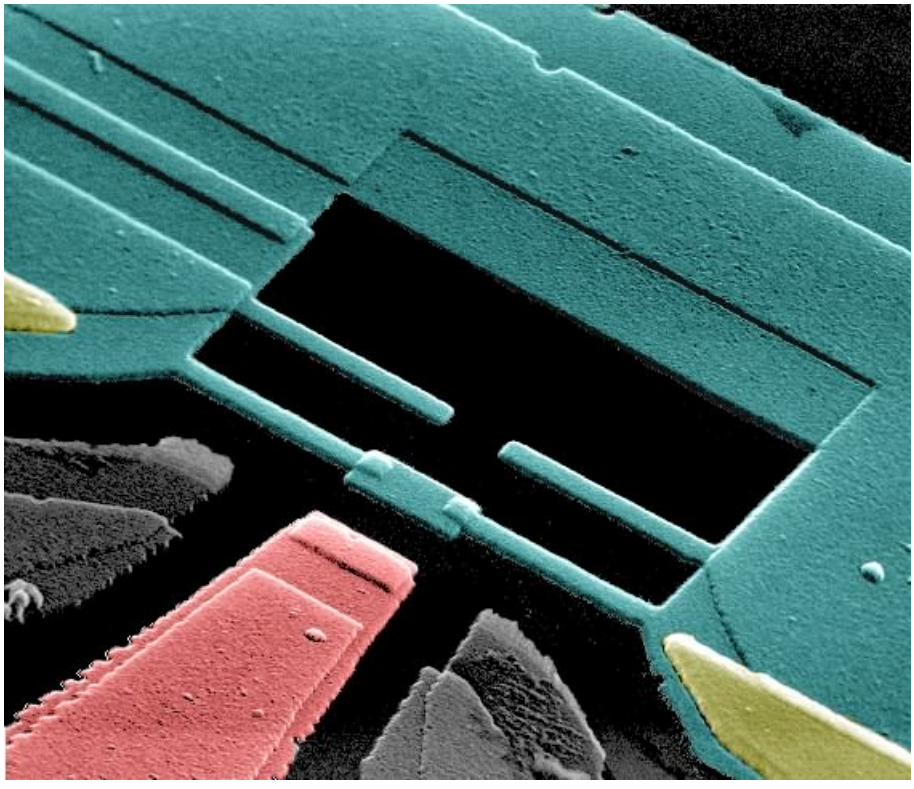
Verschränkung:

Wird ein Qubit in einen bestimmten Zustand versetzt, ändert sich in Überlichtgeschwindigkeit auch der Zustand der anderen, mit ihm verschränkten, Qubits. Da mehrere Qubits miteinander quantenverschränkt sind, erfolgt die

Berechnung im Quantencomputer überlichtschnell.

Prof. Dr. Jelezko, Direktor am Institut für Quantenoptik, Universität Ulm.
© Universität Ulm

Der Knackpunkt: Knobeln ohne Störeinflüsse



Elektronenmikroskopische Aufnahme (eingefärbt) eines supraleitenden Schaltkreises (blaugrün). Die kleine rechteckige, blaugrüne Insel (oberhalb rot eingefärbter Struktur), die durch zwei schmale Brücken mit dem "Umland" verbunden ist, stellt ein künstliches Atom dar. Ein Qubit wird als Zustand in einem solchen künstlichen Atom realisiert, die übrigen Zuleitungen etc. dienen zur Manipulation, Kontrolle und Messung (rot eingefärbt; hellgrün eingefärbte Struktur: vermindert störende Einflüsse). Das Bild stammt aus einer der ersten arbeitsfähigen Qubit-Realisierungen, an denen Prof. Ankerhold an der CEA Saclay theoretisch gearbeitet hat.
© Quantronics Group, CEA Saclay

Zum Lösen komplexer Rechenoperationen werden mehrere, meist in Register zusammengefasste Qubits, benötigt. Das Entscheidende: sie sollen in Ruhe herumknobeln können. „Qubits müssen immun gegen Störeinflüsse und gleichzeitig einfach manipulierbar sein, sodass am Ende mit hoher Wahrscheinlichkeit das richtige Ergebnis herauskommt“, erklärt Jelezko die Herausforderung. Dafür sollen die Qubits möglichst lange im Überlagerungszustand verbleiben, bis die Rechenoperation zu Ende durchgeführt ist.

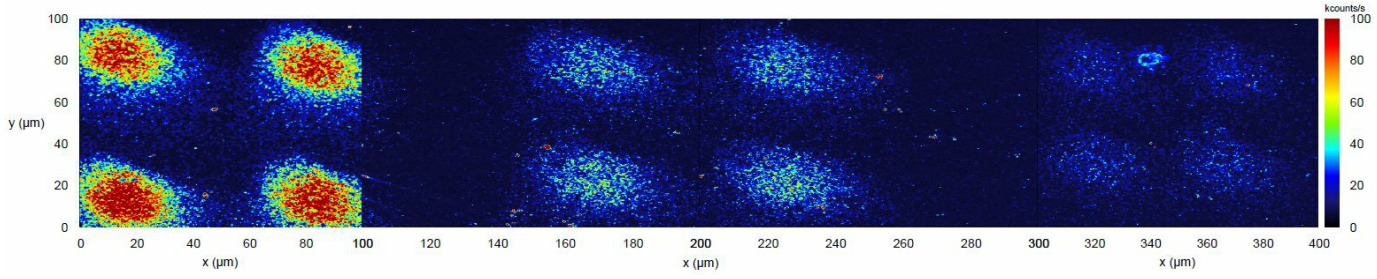
Doch wie lassen sich die unkontrollierten Störfaktoren, zum Beispiel elektrische, magnetische Felder und Phononen, fernhalten? IBM setzt hier – wie auch Google mit „Sycamore“ – auf supraleitende Quantenchips, die ihren elektrischen Widerstand unter einer Temperatur von minus 273 Grad Celsius verlieren. Kälter als im All – jedoch mit dem Vorteil, dass Störfaktoren unter diesen Bedingungen stark abnehmen und das Rechnen akkurat ablaufen kann.

Das Bizarre dabei: Da Supraleiter ohne Widerstand Strom leiten, können Quantenzustände verlustfrei und relativ stabil eingenommen werden. Die Energie nehmen supraleitende Systeme durch Mikrowellen auf – den Manipulationsschritt. Dadurch werden sie von einem niedrigeren Energiezustand (Null) auf einen höheren (Eins) gehoben. Hier sind Erfahrungswerte und theoretische Rechnungen zur Mikrowellen-Einstrahlzeit gefragt, schließlich will man einen hunderprozentigen Energieübergang hinauszögern und eine Wahrscheinlichkeitswelle dazwischen erreichen. Das große Rechnen kann beginnen. Am Ende kann als Lösung ein einzelnes Ergebnis erzielt werden, durch Überlagerung der Wahrscheinlichkeitswellen auf 0 Prozent (Null) oder 100 Prozent (Eins). Die Crux: Eine Wahrscheinlichkeitswelle erzeugt beim Messen verschiedene Wahrscheinlichkeitswerte, was ein vielfaches Wiederholen der Operationen nötig macht. Genau hier setzen die Ulmer Quantenforscher an. Mit dem Ziel, stabilere und skalierbare Systeme zu schaffen, die die Verschränkungszeit lange aufrechterhalten und mehrere, komplexere Algorithmen berechnen.

Ein schimmernder Weg aus der Tiefkühltruhe

Um Fehler auszubügeln, bräuchte man eine große Anzahl an Qubits. "Bisherige Quantencomputer bestehen aus wenigen Qubits und funktionieren nur bei extrem tiefen Temperaturen. So auch „Q System One“, der auf supraleitenden 50 Qubits aufbaut“, erklärt Jelezko den Ansatzpunkt des Verbundprojekts „QC-4-BW“. Zusammen mit seinem Team sowie Prof. Dr. Jörg Wrachtrup vom Physikalischen Institut der Universität Stuttgart und weiteren Wissenschaftlern des Fraunhofer IAF, des Fraunhofer ICT, der Universität Konstanz und des Karlsruher Instituts für Technologie arbeitet er an spinbasierten Quantenregistern. Im Zentrum des Geschehens: ein künstlicher Diamant.

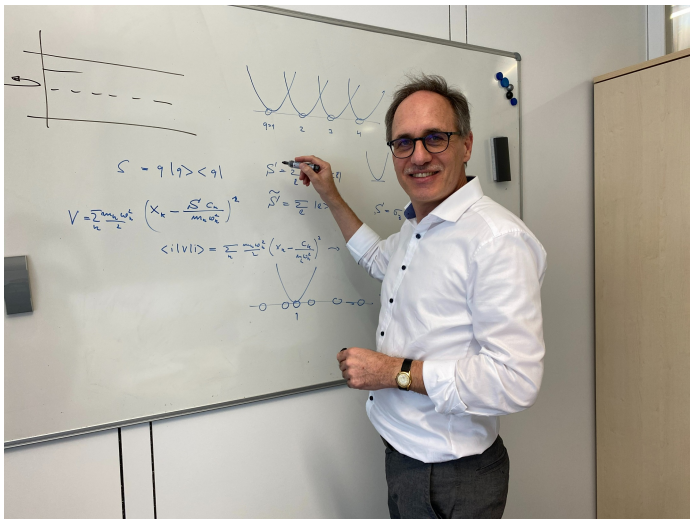
„Wir nutzen Farbzentren im künstlichen Diamanten, indem wir ihn gezielt durch Einschluss von Fremdatomen herstellen.“ Grob gesagt, wird im Gitter Platz gemacht für den Einbau eines Stickstoffatoms. Dieses sogenannte NV-Zentrum enthält ein einzelnes Elektron – quasi eingesperrt. Es ist anregbar durch Laser- und Mikrowellenlicht, sodass ein Qubit entsteht. Der Vorteil: Es ist keine Kühlung notwendig, um Umgebungseffekte auszuschließen. Die hohen Bindungskräfte der Gitterbausteine bewirken, dass die Frequenzen der Schwingungen selbst bei Raumtemperatur thermisch nicht angeregt werden.



Anders als im reinen Kohlenstoffgitter können NV-Zentren im Diamantgitter sichtbares Licht absorbieren oder emittieren. NV-Zentren werden daher auch als Farbzentren bezeichnet.
© Fedor Jelezko

Stabil skaliert für den nächsten Schritt

Es liegt jedoch in der Natur eines solchen Diamantgitters, dass es auf wenige Qubits beschränkt ist. In einem weiteren Projekt arbeiten die Ulmer Forscher deshalb an Grundlagen hinsichtlich Skalierung. „Die Kopplung mehrerer Register mit über 30 Qubits ist unser nächstes Ziel. Auch eine Kopplung mit supraleitenden Quantencomputern oder sogar klassischen Rechnern ist vorstellbar“, erklärt Prof. Dr. Joachim Ankerhold. Der Leiter des Instituts für Komplexe Quantensysteme der Universität Ulm arbeitet im Verbundprojekt „SiQuRe“ mit weiteren Wissenschaftlern des Fraunhofer-Instituts für Werkstoffmechanik (IWM) und



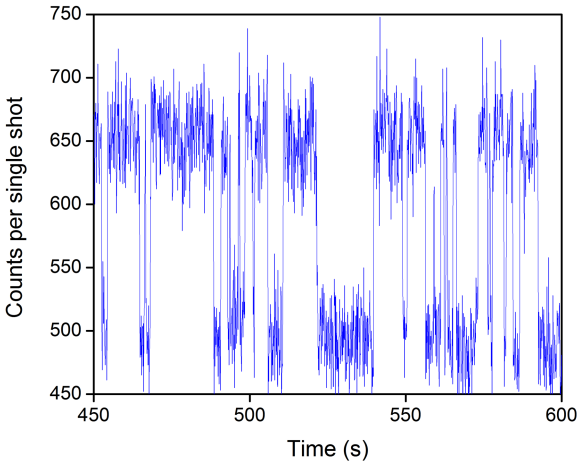
Prof. Ankerhold, Direktor am Institut für Komplexe Quantensysteme in Ulm
© privat

der Universität Freiburg an den Farbzentren. „Mit Modellen und Simulationen aus der theoretischen Quantenphysik wollen wir prüfen, inwieweit kristallbasierte Plattformen als Basis für Quantencomputer dienen können“, erklärt Ankerhold. Gestützt werden sie dabei vom Ulmer Supercomputer JUSTUS 2. Erst danach sollen die entwickelten Modelle auf „Q System One“ übertragen werden – gefolgt vom spannenden Moment der Prüfung, ob sich das System für die Lösung wissenschaftlicher Fragestellungen eignet - etwa zur Material- und Medikamentenentwicklung.

Krankheiten früh erkennen und neue Medikamente entwickeln

Eine Berechnung sämtlicher Eigenschaften aller Atome in einem Molekül ist für konventionelle oder auch Supercomputer eine oft unlösbare Aufgabe. Quantensysteme könnten präzise Simulationen und Analysen von Molekülen ermöglichen, die für den jeweiligen Krankheitsmechanismus relevant sind. Großes Ziel dabei: Die Entwicklung besserer Wirkstoffe und personalisierter Therapien. Auch könnten Mutationen oder epigenetische Änderungen in der DNA präziser und schneller aufgedeckt werden.

Mit künstlichen Diamanten im Nanobereich lassen sich darüber hinaus Sensoren und bildgebende Verfahren verbessern, um Strukturen und Funktionen einzelner Biomoleküle unter physiologischen Bedingungen sichtbar zu machen – mit einer bis zu 10.000-fach höheren Empfindlichkeit als gängige Verfahren. Jelezko stellt das Potenzial für die Medizintechnik heraus: „In der Magnetresonanztomografie könnten Strukturen viel hochauflösender dargestellt werden, um Krebserkrankungen früher zu erkennen.“ Auch Herz-Kreislauf-Erkrankungen ließen sich früh diagnostizieren, mithilfe eines Diamant-Polarisators, der kleinste Magnetfelder bei Stoffwechselprozessen des Herzgewebes misst. „Die extrem erhöhte Empfindlichkeit hat revolutionären Charakter, von der Abbildung der menschlichen Gehirnaktivität bis hin zur Erdbeobachtung aus dem Weltraum“, erklärt Ankerhold.



Quantensprünge des NV-Zentrums: Fügt man dem Kristall Stickstoffatome hinzu, so erhält er die besonderen Quanteneigenschaften: Sein Quantenzustand zeigt abrupte Wechsel zwischen zwei Eigenzuständen.
© Fedor Jelezko

Im Verbundvorhaben „QuEST“, an dem das Ulmer Quantentechnologie-Institut ebenfalls beteiligt ist, soll das Materialdesign von Batterien optimiert werden. Partner des am Institut für Technische Thermodynamik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) geleiteten Projekts sind das Helmholtz-Institut Ulm (HIU) und das Fraunhofe IWM.

Literatur:

1) Das Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg fördert sechs Verbundprojekte mit über 19 Mio. Euro. Das von den Fraunhofer-Instituten für Angewandte Festkörperphysik (IAF) und für Arbeitswirtschaft und Organisation (IOF) koordinierte „Kompetenzzentrum Quantencomputing BW“ gehört einem bundesweiten Kompetenznetzwerk an. Dazu steht der seit Januar 2021 in Ehningen im Kreis Böblingen installierte IBM-Quantencomputer „Q System One“ allen beteiligten Partnern zur Verfügung.

Fachbeitrag

08.04.2021
Simone Giesler
© BIOPRO Baden-Württemberg GmbH

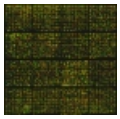
Weitere Informationen

Prof. Dr. Joachim Ankerhold
Institut für Komplexe Quantensysteme
Universität Ulm
E-Mail: joachim.ankerhold(at)uni-ulm.de

Prof. Dr. Fedor Jelezko
Institut für Quantenoptik
Universität Ulm

- Universität Ulm
- Institut für Quantenoptik
- Institut für Komplexe Quantensysteme

Der Fachbeitrag ist Teil folgender Dossiers



Biochips: Mikrosystemtechnik für die Life Sciences

Big Data – das große Versprechen der neuen digitalisierten Welt

Die Quantenrevolution der Gesundheitsindustrie

Laser | Gehirn | Datenbank | Simulation | Therapie | Wirkstoff | Wirkstoffsuche