

Messen, so genau wie nur möglich

Quantensensoren

Was im Quantencomputer stört, sollen sich Quantensensoren zunutze machen: Weil Quantensysteme extrem empfindlich sind, zeigen sie Strukturen atomarer Auflösung und ermöglichen ganz neue Anwendungen

VON FELIX KNOKE

Quantensensoren sollen enthüllen, was klassischen Messinstrumenten für immer verborgen bleibt. Dazu nutzen sie Quantenzustände und quantenmechanische Phänomene wie Überlagerung und Verschränkung, um so extrem schwache oder fein abgestufte physikalische Größen zu erfassen. Das ermöglicht die Vermessung von elektrischen sowie magnetischen Feldern mit atomarer Auflösung, die Erfassung feinsten Frequenzunterschiede, tiefster Temperaturen sowie kleinster Beschleunigungen, Drücke und Belastungen. Und weil einfache Quantensensoren mit nur einem Quantensystem – oder Qubit – auskommen, hat deren industrielle Nutzung bereits begonnen. Einige Anbieter, oft universitäre Ausgründun-

gen, verkaufen bereits die ersten Quantengravimeter, die Hohlräume unter Straßen anhand von Abweichungen im Gravitationsfeld der Erde entdecken. Quanten Gyroskope sind viel feinfühler und stabiler als gängige MEMS-Mikrosysteme (das ist in der Raumfahrt und beim autonomen Fahren wichtig). Quantenmikroskope wiederum stellen einzelne Elektronen oder feinste Ströme in Schaltkreisen dar. Und Quantenspektroskope erfassen mithilfe eines Laserstrahls Gaslecks auf hundert Meter Entfernung. Sobald die quantenmechanische Verschaltung mehrerer Sensor-Qubits gelingt, könnten sogar Magnetresonanz-Tomografen gebaut werden, die den Blick bis hinunter auf das Niveau einzelner Moleküle frei machen.

Bei der Entwicklung von Quantensensoren nutzen Forscher die Empfindlichkeit von Quantensystemen aus: So reagiert ein Elektron sensibel auf umgebende Magnetfelder mit einer Änderung seines Spins. Geladene Teilchen wie Ionen reagieren empfindlich auf elektrische Felder, indem sie ihren energetischen Zustand ändern. Beim Quantencomputing versucht man, diese Einflüsse zu unterbinden. Bei der Quantensensorik versucht man, sie auszunutzen: "Dieser Bug der Quantensysteme ist unser Feature", sagt Jörg Wrachtrup, Experimentalphysiker und Institutsleiter an der Universität Stuttgart. Gerade durch ihre Störanfälligkeit können mit Qubits externe Einflüsse mit extremer Genauigkeit und Empfindlichkeit gemessen

Ein Qubit als Magnetometer

Der Spin eines Elektrons, das in einer Stickstoff-Fehlstelle im Kristallgitter eines Diamanten gefangen ist, kann als Sensor-Qubit Magnetfelder extrem präzise messen

1 Präparation per Laser

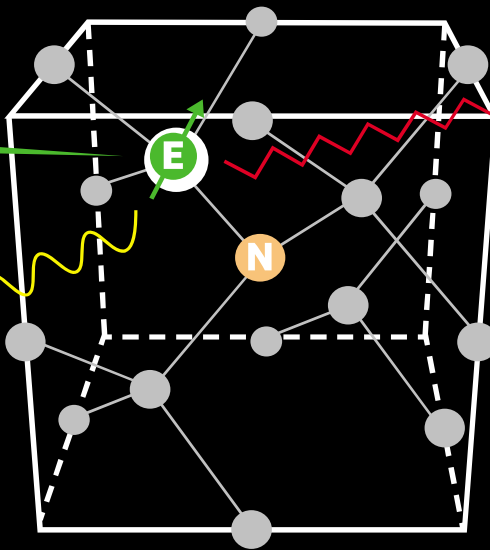
Ein Laserpuls initialisiert das Qubit auf einen definierten Grundzustand, zum Beispiel $|0\rangle$ oder $|1\rangle$.

2 Steuerung per Mikrowellen

Mikrowellenpulse verändern den Zustand des Qubits, zum Beispiel in die Überlagerung $|1\rangle + |0\rangle$

3 Störung Messung einer Probe

Im Magnetfeld verändert sich der Quantenzustand des Qubit-Elektrons und damit die Messwahrscheinlichkeiten der Grundzustände, z. B. $0,51|1\rangle + 0,86|0\rangle$



4 Zustand auslesen

Laserpuls & Fluoreszenz

Ein weiterer Laserpuls setzt das Qubit zurück. Dabei wird je nach Zustand ein messbares Photon emittiert oder nicht: 0 oder 1



Elektron

Der Elektronenspin reagiert empfindlich auf Magnetfelder. Hier dient er als Qubit



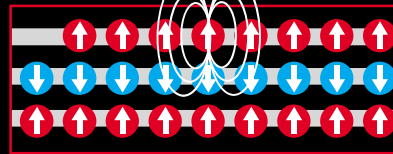
Stickstoff

Fehlerhaft eingelagertes Stickstoff-Atom



Kohlenstoff

Künstlich eingelagerte Atome des Kohlenstoff-13-Isotops können als zusätzliche Qubits verwendet werden



den. Die Kunst besteht dabei darin, die gewünschten Zielgrößen durch technische, quantenmechanische und statistische Vorkehrungen von allen anderen Störeinflüssen zu trennen, sagt Wrachtrup. „So können wir an die physikalischen Grenzen des Messbaren gehen.“

Schritt für Schritt mehr Quantum

Allgemein sind Quantensensoren Quantensysteme (oder Qubits), die in einen Überlagerungszustand versetzt, eingestellt und einer Messgröße ausgesetzt werden. Je nach ihrer Stärke oder Form ändert sich dabei der Quantenzustand, was durch eine Messung festgestellt und zur Rekonstruktion der Messgröße genutzt werden kann. Als Faustregel gilt: Je länger der Überlagerungszustand hält, desto genauer misst der Quantensensor.

Sensor-Qubits können als Ströme in Supraleitern, als Atomwolken, eingefangene Ionen oder Photonen in einer Glasfaser umgesetzt werden. Als Hoffnungsträger gelten aber Stickstoff-Fehlstellen-Zentren in Diamanten (kurz: NV-Zentrum). Das sind Qubits, die durch die atomare Struktur des Diamanten stabilisiert werden. Selbst bei Zimmertemperatur verharren sie sekundenlang im Quantenzustand, messen elektrische und magneti-

sche Felder, Temperaturen und Belastungen und können bequem per Laser eingestellt und ausgelesen werden. Und weil das NV-Zentrum mit den umgebenden Kohlenstoff-Atomen in Wechselwirkung steht, lassen sich diese als Extra-Qubits für Quantenfehlerkorrektur oder Quantenspeicher nutzen (dazu lagert man C^{13} -Atome künstlich ein). Das wäre auch ein Ansatz für Quantenrepeater, zum Beispiel in einem Netzwerk aus Quantensensoren.

Man kann Quantensensoren nach Entwicklungsstufen sortieren, sagt Fedor Jelezko, Experimentalphysiker am Institut für Quantenoptik an der Universität Ulm: Einfache Quantensensoren bestehen aus einzelnen Qubits, bei denen Überlagerungszustände für höhere Empfindlichkeit und Präzision ausgenutzt werden. Das ist Stand der Technik und wird zum Beispiel in modernen Atomuhren ausgenutzt.

Einen wirklichen Sprung erwartet die Forschung aber von Quantensensoren, die nach dem Prinzip der Quantenverschränkung verkoppelt werden. Denn miteinander verschränkte Qubits sind nicht nur viel sensibler als dieselbe Anzahl Qubits im Parallelbetrieb (deren Sensibilität wächst mit ihrem Produkt statt der Wurzel ihrer Anzahl). Außerdem können sie auch zu weiträumigen und extrem empfindlichen

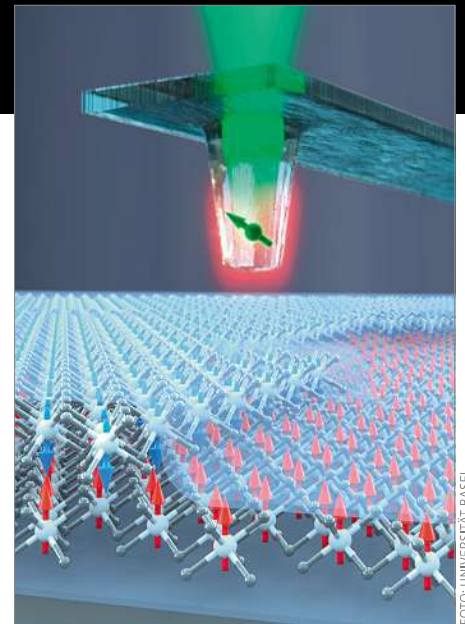


FOTO: UNIVERSITÄT BASEL

Messen auf Nanoskala

Feinste Magnetfelder einer Materialprobe verändern den Quantenzustand eines einzelnen Elektrons in einem Diamanten

Sensor-Netzwerken aufgespannt werden. Das wäre ein riesiger Fortschritt.

Nach diesem Prinzip ließe sich etwa im Weltall nach Gravitationswellen suchen oder Neuronen-genau Hirnströme messen. Und mit einer Quantenfehlerkorrektur könnten Quantensensoren die „Heisenbergsche Unschärferelation“, sprich die fundamentale Messgrenze, erreichen: Feiner kann niemals etwas gemessen werden. Nichts weniger als das ist das Versprechen der Quantensensoren. redaktion@chip.de