

Garching, 14.06.2012

Presse-Information

Quanten-Speicher mit Langzeitgedächtnis

In einem künstlichen Diamanten bleibt Quanteninformation bei Raumtemperatur länger als eine Sekunde erhalten

Absolut betrugssichere Kreditkarten und nicht fälschbare Ausweise: die Quantenphysik könnte beides möglich machen. Denn der quantenmechanische Zustand eines Teilchens, beispielsweise eines Atomkerns, lässt sich weder kopieren noch ohne Zusatzinformationen, über die nur autorisierte Nutzer möglicher Karten verfügen, fehlerfrei auslesen. Enthielte eine Kreditkarte einen Quanten-Speicher, wäre sie also vor Missbrauch sicher. Zwar haben Physiker längst Methoden entwickelt, Quantenzustände in verschiedenartige Speicher zu schreiben und daraus auszulesen. Doch entweder funktionieren diese Verfahren nur knapp über dem absoluten Temperaturnullpunkt – was eine Nutzung im Alltag ausschließt – oder die gespeicherte Quanteninformation geht nach wenigen Millisekunden verloren. Einen Quantenzustand in einem Diamantkristall für mehr als eine Sekunde bei Raumtemperatur zu speichern, gelang nun Forschern der Harvard University in Cambridge bei Boston, des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik in Garching und des Caltech in Pasadena. Die Forscher halten sogar eine Speicherdauer von eineinhalb Tagen für möglich, indem sie ihr Verfahren verbessern.



Ein Quanten-Speicher verwendet eine komplexere Version der kleinsten Informationseinheit eines herkömmlichen Computer-Speichers, des Bits, nämlich das so genannte Quanten-Bit, kurz Qubit. Während das Bit zu jedem Zeitpunkt jeweils nur einen von zwei möglichen Zuständen annehmen kann (wobei der eine mit „0“ und der andere mit „1“ bezeichnet wird), kann das Qubit buchstäblich beide Zustände gleichzeitig einnehmen. Sein Informationsgehalt besteht im Mischungsverhältnis von „0“ und „1“: das Qubit kann beispielsweise zu 20 Prozent aus „0“ und zu 80 Prozent aus „1“ bestehen. Jedes Verhältnis, das in der Summe 100 Prozent ergibt, ist dabei möglich. In einem einzigen Qubit lassen sich also viele Werte unterbringen.

Bild: Der Stoff für einen Quantenspeicher: Ein internationales Physiker-Team hat in einem Diamanten ein Quantenbit gespeichert, und zwar erstmals bei Raumtemperatur länger als eine Sekunde. Allerdings verwendeten die Forscher keinen natürlichen Diamanten, wie den hier dargestellten, und geschliffen war er auch nicht. Ihren Diamanten stellten sie vielmehr künstlich her, indem sie Kohlenstoff mit einem Hundertstel Prozent des schweren Kohlenstoff-Isotops C-13 und einer geringen Menge Stickstoff gasförmig auf einem Träger abschieden. Der Diamant, den sie so erhielten, hatte eine Kantenlänge von einigen Millimetern. © **iStockphoto**

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit,
Dr. Olivia Meyer-Streng

Tel.: +49(0)8932 905-213
E-Mail: olivia.meyer-streng@mpq.mpg.de

Hans-Kopfermann-Str. 1
D-85748 Garching

Tel.: +49(0)8932 905-0
Fax: +49(0)8932 905-200

Physiker verwenden unterschiedliche physikalische Systeme, um Qubits zu speichern, etwa Atome, die ähnlich wie Eier in einem Eierkarton in einem Gitter aus gekreuzten Laserstrahlen liegen, oder Atomkerne in einem Festkörper. Ein Quantenspeicher aus mehreren Qubits könnte einmal zur fälschungssicheren Speicherung genutzt werden, weil es das so genannte No-Cloning-Theorem der Quantenphysik verbietet, einen Quantenzustand zu kopieren. Darüber hinaus kann nur jemand den Inhalt auslesen, der die Parameter kennt, unter denen der Speicher beschrieben worden ist, etwa die Polarisationsrichtung von Lichtsignalen.

Ein Quantenspeicher muss von der Umwelt isoliert sein, aber nicht völlig

Doch der Umsetzung in die Praxis steht eine schwer zu nehmende Hürde entgegen. Ein Quantenspeicher muss zwei gegensätzliche Kriterien erfüllen: einerseits muss er von der Umwelt so gut wie möglich isoliert werden, damit die gespeicherten Qubits nicht durch äußere Magnetfelder, Lichtteilchen oder ähnliche Umwelt-Einflüsse zerstört werden. Andererseits muss er aber Informationen mit eben dieser Umwelt austauschen können, sonst ist es nicht möglich, Information in den Speicher zu schreiben und aus ihm auszulesen. Die Qubits komplett zu isolieren, ist also nicht zielführend.

Die internationale Gruppe aus Forschern der Harvard University, des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik und des Caltech hat es nun geschafft, die widerstreitenden Faktoren soweit zu versöhnen, dass ein Qubit in einem künstlichen Diamantkristall selbst bei Raumtemperatur mehr als eine Sekunde lang stabil bleibt. Zuvor blieben diese Art von Qubits nur wenige Tausendstel Sekunden erhalten. „Wir haben diese Verbesserung um fast das Tausendfache mit einem relativ geringen experimentellen Aufwand erreicht“, sagt David Hunger vom Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching. Sie brauchten im Wesentlichen einen grünen Laser, schnell schaltbare Quellen für Mikrowellen und Radiofrequenzen und einen hochempfindlichen Detektor, der in der Lage ist einzelne Lichtteilchen nachzuweisen.

Als Qubit verwendeten sie den Atomkern eines Kohlenstoffatoms, genauer gesagt des Kohlenstoff-Isotops C-13. Dessen Kern besitzt einen so genannten Kernspin, der ein magnetisches Moment verursacht. Der C-13-Kern verhält sich daher wie ein winziger Stabmagnet. Dieser kann sich bezüglich eines von außen angelegten Magnetfeldes parallel oder antiparallel ausrichten. Diese beiden Zustände bilden die „0“ und die „1“ des Qubits.

Das C-13-Qubit wird über eine Stickstoff-Fehlstelle beschrieben und ausgelesen

Der Informationsaustausch zwischen diesem Qubit und der Umwelt erfolgte indirekt: Die Forscher haben den Diamanten so gezüchtet, dass er neben winzigen Spuren des Isotops C-13 auch ein bisschen Stickstoff enthält und dass manche Stickstoffatome in der Nähe eines C-13-Atoms sitzen. In direkter Umgebung des Stickstoffatoms fehlt zudem ein Kohlenstoffatom. Physiker sprechen daher von einem Stickstoff-Fehlstellen-Zentrum, kurz N-V-Zentrum („V“ für den englischen Begriff vacancy, zu deutsch Fehlstelle). Auch das N-V-Zentrum besitzt einen Spin und bildet daher ein Qubit. Letzteres lässt sich mithilfe von Mikrowellen- und Laserpulsen leicht in einen definierten quantenmechanischen Zustand bringen. Außerdem kann die Information, die es trägt, leicht mit einem Laserstrahl ausgelesen werden.

„Man kann sozusagen leicht mit dem N-V-Zentrum sprechen, es dient uns daher als Hilfs-Qubit“, sagt Hunger. Das N-V-Zentrum wiederum spricht mit dem Kernspin des Kohlenstoffatoms, da die beiden winzigen Stabmagneten aufeinander einwirken. Durch definierte Folgen von Laser-, Mikrowellen- und Radiowellen-Pulsen lässt sich der Quanten-Zustand des Kohlenstoff-Atomkerns indirekt kontrollieren und somit das Qubit einlesen. Auf ähnliche Weise lässt es sich auch über das N-V-Zentrum auslesen.

Das Kohlenstoffatom und nicht das N-V-Zentrum wählten die Forscher als eigentlichen Speicherort, weil sein Atomkern ein vergleichsweise kleines magnetisches Moment besitzt und daher weniger empfindlich auf Umwelteinflüsse reagiert als das N-V-Zentrum. C-13-Kerne können Quanten-Informationen also potenziell länger behalten und gelten als ideale Systeme, um Quanteninformation zu speichern.

Zwei Störeinflüsse auf den Quantenspeicher müssen unterdrückt werden

Allerdings bewirkt die Kopplung an das N-V-Zentrum, die für das Schreiben und Auslesen hilfreich ist, gleichzeitig, dass das Qubit im C-13-Atomkern seine Information innerhalb weniger Tausendstel Sekunden verliert. Das liegt daran, dass nach dem Einlesen das sich selbst überlassene magnetische Moment des N-V-Zentrums unkontrolliert hin- und herspringt und so das benachbarte C-13-Qubit stört, so wie ein sich ständig hin- und herdrehender Stabmagnet einen benachbarten, viel schwächeren Magneten zu einer ähnlichen Schaukelbewegung mitreißt. Auf ähnliche Weise beeinflussen die magnetischen Momente anderer C-13-Kerne im Diamantkristall den magnetischen Zustand des C-13-Qubits.

Diese beiden Störeinflüsse lassen sich jedoch deutlich reduzieren, wie die Forscher bewiesen. Den Effekt des N-V-Zentrums unterdrückten sie mit einem grünen Laserstrahl. Dieser zwingt das N-V-Zentrum in einen der beiden magnetischen Zustände und unterbindet die natürliche Fluktuation des magnetischen Moments. Allerdings schleudert der Laser dabei zeitweise ein Elektron des N-V-Zentrums heraus, das kurz darauf wieder von diesem eingefangen wird. Das Zentrum wird also dauernd ionisiert und gleich wieder deionisiert. Damit verbunden ist wieder ein Hin- und Herspringen des magnetischen Moments.

Indem die Physiker die Laserleistung auf zehn Milliwatt erhöhten, sorgten sie jedoch dafür, dass das magnetische Moment viel schneller seine Richtung wechselt als bei der ursprünglichen Fluktuation. Daher spürt das Qubit im C-13-Atomkern keine unterschiedlichen Magnetfelder mehr, sondern einen zeitlich konstanten Durchschnittswert. Das bedeutet, die Fluktuation ist ausgeschaltet. Im Bild mit den Stabmagneten gesprochen: Dreht man den einen Stabmagnet viel schneller hin- und her, als der andere umklappen kann, bleibt dieser einfach in seiner Orientierung. Dieses Verfahren erhöhte die Lebensdauer des Qubits auf etwa eine halbe Sekunde.

Die Lebensdauer des Qubits lässt sich theoretisch auf 36 Stunden erhöhen

Den Störfaktor der anderen C-13-Atome minimierten die Wissenschaftler durch zwei Tricks. Erstens beschränkten sie den Anteil des Kohlenstoffisotops C-13 in ihrem künstlichen Diamanten auf ein Hundertstel Prozent, während natürliche Diamanten etwa ein Prozent der schwereren Kohlenstoff-Variante enthalten. So befinden sich die nächsten magnetischen C-13-Atomkerne im künstlichen Diamanten weiter voneinander entfernt als im natürlichen Diamanten und stören sich entsprechend weniger. Der zweite Trick bestand darin, dass die Forscher mit geschickt gewählten Radiofrequenz-Pulsen die Einflüsse der verbleibenden C-13-Atomkerne auf das Qubit neutralisierten. Beide Maßnahmen erhöhten die Lebensdauer des Qubits auf etwa 1,4 Sekunden.

„Laut Theorie lässt sich die Lebensdauer des Qubits auf maximal 36 Stunden erhöhen“, sagt David Hunger. „Die momentanen Limitierungen lassen sich prinzipiell mit verbesserter Technik weiter zurückdrängen.“ Beispielsweise durch eine höhere Leistung des grünen Lasers, was allerdings eine Kühlung des Diamanten nötig machen würde. Desweiteren könnten weiter optimierte Sequenzen der Kontroll-Pulse, sowie eine weitere Senkung der C-13-Konzentration die Lebensdauer erhöhen. Das Forscherteam nehme diese Herausforderungen an, sagt der Physiker.

Neben Quanten-Speichern für Kreditkarten oder Ausweise können sich die Forscher vorstellen, dass Quanten-Speicher in zukünftigen Kommunikationsnetzen eine Rolle spielen, die auf Quanteninformation basieren. Ein solches Netz würde beispielsweise für den Informationsaustausch zwischen Quantencomputern gebraucht. „Auf längeren Wegstrecken durch solche Netzwerke müsste die Quanteninformation zwischengespeichert werden“, sagt Hunger. Für diese so genannten Repeater könnten Diamantkristalle wie der in der aktuellen Studie eingesetzt werden. Hunger räumt allerdings ein, dass für Anwendungen wie die sichere Kreditkarte noch die Miniaturisierung von Laser, Mikrowellen- und Radiofrequenz-Quellen deutliche Fortschritte machen muss. Außerdem müsse die Auslese-Technik noch effizienter werden. Aber auch das sei nur eine Frage der Zeit. [CM/PH]

Originalveröffentlichung:

Peter Maurer, Georg Kucsko, Christian Latta, Lian Jiang, Norman Jao, Steven Bennett, Fernando Pastawski, David Hunger, Nicholas Chisholm, Matthew Markham, Daniel Twitchen, Ignacio Cirac und Mikhail Lukin

Room-Temperature Quantum Bit Memory Exceeding One Second

Science, 8. Juni 2012; doi: 10.1126/science.1220513

Kontakt:**Prof. Dr. Ignacio Cirac**

Honorarprofessor, TU München

Direktor am Max-Planck-Institut für Quantenoptik

Hans-Kopfermann-Straße 1

85748 Garching

Tel.: +49 (0) 89 / 32 905 -705 / 736

Fax: +49 (0) 89 / 32 905 -336

E-Mail: ignacio.cirac@mpq.mpg.de

www.mpq.mpg.de/Theorygroup/CIRAC

Dr. David Hunger

Max-Planck-Institut für Quantenoptik

Tel: +49 (0) 89 / 2180 -39 37

E-Mail: david.hunger@physik.lmu.de