

Zwei Ionen im Gatter

Experimente mit einzelnen Elektronen oder Atomen durchzuführen, hielt Erwin Schrödinger 1952 für so abwegig, dass er schrieb: „In thought-experiments we sometimes assume that we do; this invariably entails ridiculous consequences“. Doch nachdem es Werner Neuhauser 1979 in Heidelberg gelang, ein einzelnes Ba^+ -Ion in einer Paul-Falle zu präparieren und mit eigenen Augen zu sehen [1], ist aus Gedankenexperimenten längst Realität geworden. Inzwischen wurden und werden zahlreiche Experimente an einzelnen Ionen in Fallen durchgeführt, die der Erforschung grundlegender Fragen der Quantenphysik dienen.

Daneben sind aber auch praktische Anwendungen in den Mittelpunkt des Interesses gerückt, nachdem Ignacio Cirac und Peter Zoller 1995 erkannten, dass sich zu einer Kette aufgereichte Ionen in einer Falle für die Quanten-Informationverarbeitung nutzen lassen [2]. Als elementare Schalteinheit, als sog. Qubit, das dem Bit in einem klassischen Computer entspricht, werden dabei zwei interne Zustände eines Ions $|0\rangle_E$ und $|1\rangle_E$ genutzt, z. B. der elektronische Grundzustand und ein metastabiler angeregter Zustand. Ein Quantencomputer, der mit diesen Qubits rechnet, ist in der Lage, bestimmte Aufgaben drastisch effizienter zu lösen als ein klassi-

scher Computer. Ein beliebiger Quanten-Algorithmus lässt sich aus Ein-Qubit-Operationen sowie Operationen mit mindestens zwei Qubits zusammensetzen, wobei die gemeinsame Schwingungsbewegung der Ionen in der Falle die bedingte Dynamik zwischen einzelnen Qubits ermöglicht.

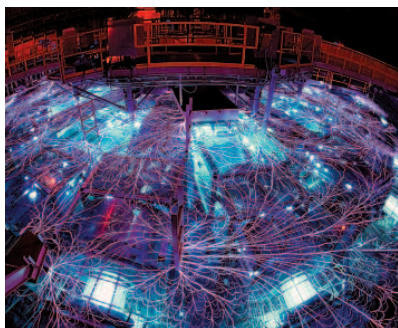
Nachdem es Ende letzten Jahres gelungen war, den sog. Deutsch-Jozsa-Algorithmus mit einem einzelnen Ion in einer Falle zu implementieren – dabei wurden die beiden Qubits durch interne Zustände bzw. die Schwingungsbewegung dargestellt [3] –, wurde kürzlich ein weiteres *Highlight* auf dem Weg zu einem Quantencomputer erreicht: Sowohl die Arbeitsgruppe von Rainer Blatt in Innsbruck als auch diejenige von David J. Wineland in Boulder, USA, realisierten Quantengatter mit zwei Ionen [4, 5].

Die Innsbrucker Gruppe verwirklichte ein Controlled-NOT-Gatter mit zwei individuell adressierten Ca^+ -Ionen entsprechend dem Vorschlag von Cirac und Zoller, wobei die elektronischen Zustände $|S_{1/2}\rangle \equiv |0\rangle_E$ und $|D_{5/2}\rangle \equiv |1\rangle_E$ als Qubit dienen. Je nach Wert eines Kontroll-Qubits ($|1\rangle_E^K$ bzw. $|0\rangle_E^K$) invertiert dieses Gatter ein Ziel-Qubit oder lässt es unverändert.

Dazu wird im ersten Schritt der Zustand des Kontroll-Qubits auf den eines quantisierten harmonischen Oszillators – die Schwingungsbewegung der gesamten Ionenkette – abgebildet, welcher

Fusion in der Z-Maschine

Physikern am Sandia National Laboratory in New Mexico ist es gelungen, an ihrer „Z-Maschine“ Neutronen nachzuweisen, die bei der Fusion von Deuterium zu Helium entstanden sind. Kernstück des rund 30 m großen und mit Wasser gefüllten Experiments ist ein Zylinder von der Größe eines Fingerhuts aus 360 dünnen Wolframdrähten. In seinem Inneren sitzt eine 2 mm große Deuterium-Kapsel. Mit einem kurzen Strompuls wird die gewaltige elektrische Energie von 12 MJ in die Drähte deponiert, die dadurch schmelzen



und ein Plasma bilden. Das mit dem Entladungsstrom einhergehende Magnetfeld führt zu einer Selbstkompression des Plasmas (Z-Pinch) und zur Erzeugung eines intensiven Röntgenpulses.

Trifft dieser auf die Kapsel, so entsteht eine Stoßwelle, die die Kapsel innerhalb von 7 ns auf einen Durchmesser von $160 \mu\text{m}$ komprimiert und auf fast 12 Millionen K aufheizt – genug für das Einsetzen der Fusion. Das Foto zeigt Lichtblitze im Wasser, die durch elektrische Verluste entstehen. (Foto: SNL)

zuvor durch Laserkühlung im Grundzustand initialisiert wurde. Für diese Übertragung des Zustands des Kontroll-Qubits auf den harmonischen Oszillator dient ein in Frequenz, Länge und Intensität gut kontrollierter Laser-Puls bei einer Wellenlänge von 729 nm, der das Ion mit Wahrscheinlichkeit nahe 1 vom Grundzustand $|0\rangle_E^K$ in den angeregten Zustand $|1\rangle_E^K$ übergehen lässt. Die Frequenz ω_L des Laserlichts ist dabei so eingestellt, dass der elektronische Übergang von der Anregung eines externen Schwingungsquants begleitet wird ($\omega_L = \omega_E + \omega_{HO}$, mit der elektronischen Übergangsfrequenz ω_E sowie der Frequenz ω_{HO} der Mode, bei der die Ionen gegeneinander schwingen). Befand sich das Kontroll-Qubit dagegen im Zustand $|1\rangle_E^K$ und der Oszillator im Grundzustand, so ist die Resonanzbedingung nicht erfüllt und der Laser-Puls hat keine Auswirkung auf die Besetzung der elektronischen und Oszillator-Niveaus.

Nun werden weitere Laser-Pulse auf das Ziel-Qubit angewandt, wobei Dauer, Intensität, Frequenz und Phase gewährleisten, dass der Zustand des Ziel-Ions genau dann geändert wird, wenn der Oszillator im Grundzustand ist, d. h. wenn das Kontroll-Ion sich zu Beginn im Zustand $|1\rangle_E^K$ befand. Diese Pulsfolge ist der Kernspinresonanz entlehnt. Ein abschließender Laser-Puls versetzt Kontroll-Qubit und Oszillator wieder in ihren Ausgangszustand.

Durch Präparation eines Überlagerungszustands des Kontroll-Qubits ließ sich mit diesem Gatter ein verschränkter Zustand zweier Ionen mit einer Güte (*Fidelity*) von 71 % erzeugen. Mit weiteren technischen Verbesserungen und der Anwendung noch ausgefeilterer Methoden für Qubit-Operationen (z. B. aus dem Bereich der Kernspinresonanz) lässt sich eine weitere deutliche Verbesserung der *Fidelity* dieses Quantengatters mit individuell adressierten Ionen erwarten.

Die Forschergruppe um D. J. Wineland in Boulder nutzt zwei Hyperfein-Niveaus des elektronischen Grundzustands von Be^+ -Ionen als Qubit. Kohärente Übergänge zwischen den Qubit-Zuständen werden durch stimulierte Raman-Anregung mit zwei Lichtfeldern bei 313 nm getrieben, die um die Hyperfein-Übergangsfrequenz gegeneinander verstimmte sind. Die Gruppe hat eine abgewan-

delte Form eines von A. Sørensen, K. Mølmer und G. Milburn vorgeschlagenen Zwei-Qubit-Quantengatters experimentell umgesetzt, für welches die individuelle Adressierung der Ionen nicht erforderlich ist. Vorteilhaft ist auch, dass keine tatsächliche Anregung der Schwingungsbewegung für die Ausführung dieses Gatters notwendig ist. Daher hängen bedingte quantenlogische Operationen weniger ab vom Ausgangszustand der Schwingungsbewegung, deren Initialisierung im Grundzustand damit nicht mehr zwingend erforderlich ist. Für das realisierte Phasen-Gatter ist keine interne Zustandsänderung der beteiligten Ionen notwendig. Dadurch gewinnt dieses Gatter – verglichen mit dem bisher verwendeten Sørensen-Mølmer-Gatter – zusätzlich an Robustheit und lässt sich bei gleicher *Fidelity* mit höherer Geschwindigkeit ausführen.

Nach anfänglicher Raman-Laserkühlung der beiden Be^+ -Ionen werden zwei Laser-Lichtfelder, weit verstimmte von einer elektronischen Resonanz, eingestrahlt. Diese bewirken (für Zeiten $\ll 1/\omega_{HO}$) eine unterschiedliche dynamische Stark-Verschiebung der beiden Qubit-Niveaus, womit eine zustandsabhängige elektrische Dipolkraft einhergeht. Die beiden Ionen werden so positioniert, dass das von den beiden (relativ zueinander um $\omega_{HO} + \delta$ mit $\delta \ll \omega_{HO}$ verstimmten) Laserstrahlen erzeugte elektrische Feld am Ort beider Ionen die gleiche Phase hat. Es wirkt also keine differenzielle Dipolkraft, wenn sich beide Ionen im selben Zustand befinden. Nehmen die Ionen jedoch unterschiedliche Zustände ein, so wirkt eine differenzielle Kraft, welche die beiden Ionen gegeneinander in Schwingung versetzen kann.

Die Dauer und Intensität des zweifarbigen Laser-Pulses wird so eingestellt, dass der harmonische

Oszillator auf einer geschlossenen Trajektorie im Phasenraum geführt wird und die Gesamtwellenfunktion, welche die internen Zustände und den harmonischen Oszillator beschreibt, eine rein geometrische Phase von $\pi/2$ aufammelt. Die bedingte Dynamik wird dabei durch die gemeinsame Schwingungsbewegung beider Ionen vermittelt, jedoch kehrt der Oszillator nach dieser Operation wieder in seinen Ausgangszustand zurück, nahezu unabhängig von dessen Gestalt, d. h. das Phasen-Gatter hängt – bis zu einem gewissen Grad – nicht von der Anregung des Oszillators ab. Gemeinsam mit Ein-Qubit-Operationen lassen sich mit Hilfe dieser bedingten Dynamik beliebige Quanten-Algorithmen synthetisieren. Die *Fidelity* eines mit diesem Gatter erzeugten verschränkten Zustands betrug 97%.

Die Experimente in Innsbruck und Boulder sind maßgebliche Schritte hin zu einem skalierbaren Quantencomputer mit Ionenfallen. Für das Verständnis der Verschränkung von mehr als zwei Teilchen sind von theoretischer Seite noch grundlegende konzeptionelle Schwierigkeiten zu überwinden. Zukünftige Experimente mit gespeicherten Ionen werden auch hier neue Impulse liefern, sowie weiterhin den fruchtbaren Austausch zwischen den Disziplinen, insbesondere der Physik, Mathematik und Informatik im Rahmen der Quanten-Informationsverarbeitung fördern und nutzen.

CHRISTOF WUNDERLICH

- [1] W. Neuhauser et al., Phys. Rev. A **22**, 1137 (1980).
- [2] J. I. Cirac and P. Zoller, Phys. Rev. Lett. **74**, 4091 (1995).
- [3] S. Gulde et al., Nature **421**, 48 (2003).
- [4] F. Schmidt-Kaler et al., Nature **422**, 408 (2003).
- [5] D. Leibfried et al., Nature **422**, 412 (2003).

Priv.-Doz. Dr.
Christof Wunderlich,
Institut für Laser-
Physik, Universität
Hamburg, Luruper
Chaussee 149, 22761
Hamburg

KURZGEFASST...

■ Neues Teilchen am SLAC

Das Babar-Experiment am Linearbeschleuniger in Stanford hat mit dem $D_s(2317)$ -Teilchen vermutlich ein neues Meson entdeckt, das aus einem charm-Quark und einem strange-Antiquark besteht. Da die beobachtete Masse von 2317 MeV/ c^2 nicht zu theoretischen Vorhersagen passt, könnte es sich bei dem Teilchen allerdings auch um einen Zustand aus vier Quarks handeln.¹⁾

1) arxiv.org/abs/hep-ex/0304021

■ Bose-Einstein-Kondensation im Festkörper

Physiker aus der Schweiz, Frankreich und Deutschland haben mit inelastischer Neutronenstreuung erstmals ein Bose-Einstein-Kondensat in einem Festkörper nachgewiesen. Bei den kondensierten Bosonen handelt es sich demnach um magnetische Triplett-Anregungen (Magnonen) in der Verbindung $TlCuCl_3$.²⁾

2) Ch. Rüegg et al., Nature **423**, 62 (2003)