

Ionen in Reih und Glied

Quantencomputer mit gespeicherten Ionen

Rainer Blatt

Ist eine Münze gezinkt oder nicht, d. h. weist sie Kopf und Zahl auf oder stimmen beide Seiten überein? Ein einfacher Quantenalgorithmus erlaubt es, diese Frage mit nur einem Blick auf die Münze statt zweien zu beantworten. Der „Rechner“, auf dem dieser Algorithmus ausgeführt wird, besteht nicht aus Transistoren, sondern aus kalten, eingesperrten Ionen.

Von den bislang untersuchten Technologien erscheint gegenwärtig die elektromagnetische Speicherung von Ionen als ein besonders vielversprechender Ansatz für den Bau eines skalierbaren Quantencomputers. Elektrodenanordnungen, die mit Hilfe elektromagnetischer Wechselfelder geladene Teilchen speichern können, sind seit dem Ende der 50er-Jahre bekannt. Sie werden nach ihrem Erfinder, Wolfgang Paul aus Bonn, der dafür 1989 den Physik-Nobelpreis erhielt, auch als Paul-Fallen bezeichnet (Abb. 1).

Solche Ionenfallen werden seither für spektroskopische und massenspektroskopische Zwecke vielfach eingesetzt. Gespeicherte Ionen bewegen sich üblicherweise sehr schnell und sind damit spektroskopisch nur schwer nachweisbar. Daher gelang es erst Anfang der 80er-Jahre, in solchen Fallen gezielt einzelne atomare Ionen zu speichern und sichtbar zu machen. Mit optischer Kühlung, ursprünglich von Hänsch und Schawlow für freie Atome und von Wineland und Dehmelt für gespeicherte Ionen vorgeschlagen, konnten erstmals Neuhauser, Toschek und Dehmelt (Universität Heidelberg) und Wineland (NBS in Boulder) die Bewegung einzelner Ionen in einer Falle so „einfrieren“, dass ihre Bewegung auf einen Raumbereich eingeschränkt wird, der kleiner als die Wellenlänge der das Ion anregenden Laser-Strahlung ist. Dadurch streut ein einzelnes gespeichertes Ion sehr viele Photonen, sodass sich die Fluoreszenz sogar mit dem Auge beobachten lässt. Diese Experimente bildeten die Grundlage für die heutigen Experimente mit einzelnen Atomen und deren Manipulation mit Laserlicht.

Befindet sich die Falle im Vakuum, so können darin gespeicherte einzelne Ionen nicht mehr mit Wän-

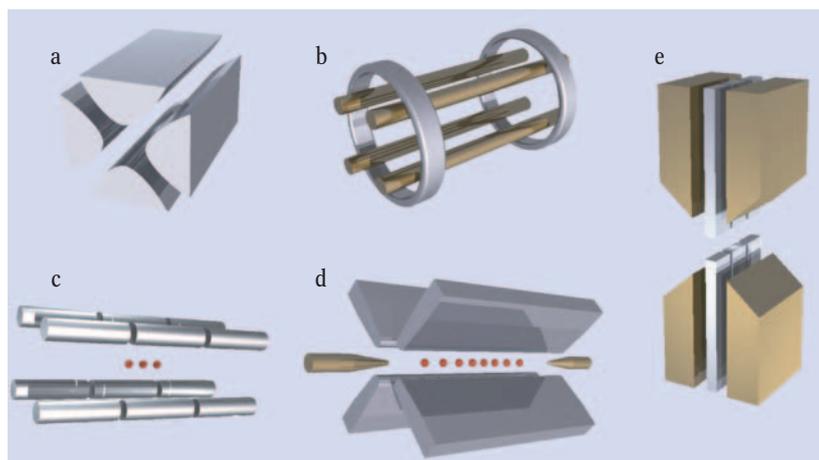


Abb. 1: Lineare Paul-Fallen ähneln Paulschen Massenfiltern (a), in denen sich ein Ionenstrahl mit vier (idealerweise hyperbolischen) Stangenelektroden und hochfrequenten Wechselspannungen masselektiert transportieren lässt.

Mit zusätzlichen Ringelektroden (b) gelingt es, Ionen entlang der Fallennachse speichern. Die Ringe lassen sich durch Segmente (c) oder durch Spitzen (d) ersetzen. Kombinationen von Segmenten und Schneiden (e) sind ebenfalls möglich.

den oder mit einem umgebenden Gas stoßen, sodass sich sehr schmale optische Resonanzen beobachten lassen. Daher werden solche Systeme schon seit vielen Jahren für die Anwendung in Atomuhren untersucht, wo die ungestörte zeitliche Entwicklung von atomaren Überlagerungszuständen als „Präzisionspendel“ zur Realisierung der Sekunde dient. Solche Systeme eignen sich auch bestens, um Quanteninformation zu speichern, da diese in der Regel als Überlagerungszustand vorliegt. Einzelne gespeicherte Ionen sind darüber hinaus für Experimente wieder und wieder verfügbar. Damit war es in den 80er-Jahren erstmals möglich, die lange vorhergesagten Quantensprünge nachzuweisen. In einem solchen Experiment beobachtet man die Resonanzfluoreszenz auf einem stark strahlenden Übergang zwischen zwei Zuständen. Falls das streuende Elektron des einzelnen Ions allerdings in einen anderen (dritten) nichtstrahlenden Zustand gelangt, steht es für die Lichtstreuung nicht mehr zur Verfügung: Die

KOMPAKT

- ▶ In linearen Paul-Fallen lassen sich Ionen in einer Kette anordnen und mit Lasern einzeln adressieren.
- ▶ Die für ein Qubit nötigen Zwei-Niveau-Systeme werden dabei meist durch Zeeman- oder Hyperfeinübergänge definiert. Die Schwerpunktsbewegung im Fallpotential koppelt die Qubits aneinander.
- ▶ Mit diesem System gelang es bereits, die Grundbausteine eines Quantencomputers, Ein- und Zwei-Qubit-Gatter (CNOT), zu implementieren.
- ▶ Darüber hinaus erlaubt ein rudimentärer Quantencomputer die Verschränkung dreier Teilchen sowie die Teleportation von Ionen.

Prof. Dr. Rainer Blatt, Institut für Experimentalphysik, Universität Innsbruck, Technikerstr. 25 und Institut für Quantenoptik und Quanteninformation, Österreichische Akademie der Wissenschaften, Technikerstr. 21a, A-6020 Innsbruck

Resonanzfluoreszenz endet abrupt und beginnt erst wieder, sobald das Elektron in einen Zustand zurückkehrt, der angeregt werden kann (siehe auch Abb. 2). Damit zeigt die beobachtete Fluoreszenz charakteristische Sprünge, welche die Projektion des Elektrons in und aus dem dritten Zustand anzeigen. Ein einzelnes absorbiertes Photon, das in einen nichtstrahlenden Zustand übergeht, verursacht damit das Fehlen vieler Photonen

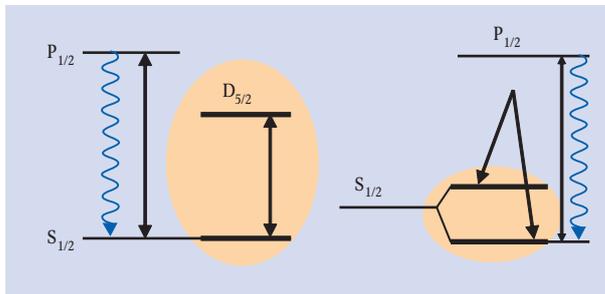


Abb. 2: Zwei-Niveau-Systeme (orange) können in gespeicherten Ionen als Quantenbits verwendet werden, etwa
 ► a) verbotene optische Übergänge (Quadrupolübergänge, Interkombinationslinien) wie S-D-Übergänge in den Erdalkali-Ionen Ca^+ , Sr^+ , Ba^+ , Yb^+ , Hg^+ etc., oder
 ► b) Mikrowellenübergänge (Hyperfein- und Zeeman-Übergänge) z. B. in $^9\text{Be}^+$, $^{25}\text{Mg}^+$, $^{43}\text{Ca}^+$, $^{87}\text{Sr}^+$, $^{111}\text{Cd}^+$, $^{137}\text{Ba}^+$, $^{171}\text{Yb}^+$, die durch Raman-Übergänge getrieben werden.
 Der jeweils angeregte Zustand des Zwei-Niveau-Systems koppelt dabei nicht an einen strahlenden Übergang und lässt sich damit zur Beobachtung von Quantensprüngen nutzen.

auf dem sonst streuenden Übergang und ermöglicht es damit, den atomaren Quantenzustand mit einer Effizienz von nahezu 100 % zu bestimmen. Diese Technik, nach Dehmelt auch „electron shelving“ oder die „Quantensprungmethode“ genannt, beruht auf der Tatsache, dass hier Experimente mit nur einem Atom durchgeführt werden, und ist eine der ganz entscheidenden Methoden für die Quanteninformationsverarbeitung.

Klassische Information lässt sich mit einem *Bit* in 0 oder 1 kodieren. Für die Speicherung von Quanteninformation benötigt man zwei langlebige Energieniveaus $|0\rangle$, $|1\rangle$, mit deren Hilfe sich das quantenmechanische Analog, das *Quantenbit* (*Qubit*) realisieren lässt:

$$|\psi\rangle = c_0|0\rangle + c_1|1\rangle \quad (1)$$

In einzelnen Ionen geschieht das entweder mit langlebigen optischen Zuständen, wie z. B. den durch einen Quadrupolübergang verbundenen $|S\rangle$ -Grundzustand und den metastabilen $|D\rangle$ -Zustand der Erdalkali-Ionen (Abb. 2a) oder aber mit zwei magnetischen Unterzuständen des Grundzustandes, z. B. mit zwei Hyperfein-Zuständen ungerader Isotope (Abb. 2b).

Mit linearen Paul-Fallen (Abb. 1) lassen sich die Ionen-Qubits zu linearen Ketten anordnen und damit als Quantenregister nutzen. Aufgrund der Coulomb-Abstoßung unterscheidet sich der Abstand der Ionen allerdings geringfügig, da jedes Ion eine unterschiedlich starke Ladung der anderen Ionen sieht. Die Quanteninformation kann nun in jedem einzelnen Ion abgelegt werden (Abb. 3). Mit Hilfe eines fokussierten Laserstrahles lassen sich so die einzelnen Speicherzellen des Registers individuell ansprechen, d. h. Operationen an einzelnen Qubits werden damit ermöglicht. Diese sog. Ein-Qubit-Gatter werden durch die kohärente Wechselwirkung eines Lichtfeldes mit den einzelnen Qubits repräsentiert, die Dynamik der individuellen Zwei-Niveau-Systeme wird entsprechend mit Rabi-Oszillationen

zwischen dem Grundzustand $|g\rangle$ und dem angeregten Zustand $|e\rangle$ beschrieben.

Konzept des Ionenfallen-Quantencomputers

Für einen universellen Quantencomputer ist es allerdings notwendig, Gatteroperationen zwischen zwei beliebigen Qubits durchführen zu können. (Das ist eine der DiVincenzo-Bedingungen für die Implementierung eines Quantencomputers, vgl. den Infokasten im einleitenden Artikel.) Eine solche Operation ist das sog. CNOT-Gatter, die kohärente Version des elektronischen XOR-Gatters klassischer Computer. Entsprechend der Wahrheitstabelle einer XOR-Operation wird die Amplitude eines Ziel-Qubits dann und nur dann verändert, wenn das kontrollierende Qubit eine angeregte Amplitude hat. Man beachte, dass dies auch für Superpositionen und nicht nur für Besetzungen gelten muss. Ein Verfahren für ein CNOT-Gatter mit gespeicherten Ionen haben I. Cirac und P. Zoller von der Universität Innsbruck bereits 1995 vorgeschlagen [1] (vgl. ihr Artikel in diesem Heft). Die Schlüsselidee dabei ist, dass die Ionen in einer Ionenkette über die Coulomb-Wechselwirkung miteinander wechselwirken und damit über die Ionenbewegung ein zusätzlicher Freiheitsgrad existiert, der Quanteninformation tragen kann. Genauer müssen die Zustände der einzelnen Ionen nämlich als Zwei-Niveau-Systeme in einem harmonischen Oszillator (der Ionenfalle) beschrieben werden, sodass jeder Zustand durch eine innere Anregung ($|g\rangle$, $|e\rangle$) und durch eine äußere Anregung (Quantenzahl $|n\rangle$ des harmonischen Oszillators) bestimmt ist (Abb. 4).

Zur Nutzung dieses Freiheitsgrads haben Cirac und Zoller vorgeschlagen, das Quantenregister zunächst vollständig zur Ruhe zu bringen, d. h. die harmonische Bewegung der Ionenkette entlang der Fallenachse vollständig auszufrieren. Quantenmechanisch ausgedrückt, muss die Ionenkette im Grundzustand des zugehörigen harmonischen Oszillators präpariert werden:

$$|\Psi\rangle = \sum_{\underline{x}} c_{\underline{x}} |x_{L-1}, \dots, x_0\rangle \otimes |0\rangle_{\text{CM}} \quad (2)$$

Hier steht der Vektor \underline{x} für alle internen elektronischen Zustände des Quantenregisters, und die Schwerpunktbewegung (*center of mass*, CM) des harmonischen Oszillators ist $|n\rangle_{\text{CM}} = |0\rangle_{\text{CM}}$. Mit Hilfe eines Laserimpulses auf das kontrollierende Qubit (das kann irgendeines aus der Kette sein) kann dann dessen interne angeregte Amplitude auf die Bewegungsmode, d. h. auf eine Anregung des harmonischen Oszillators, umgeschrieben werden.

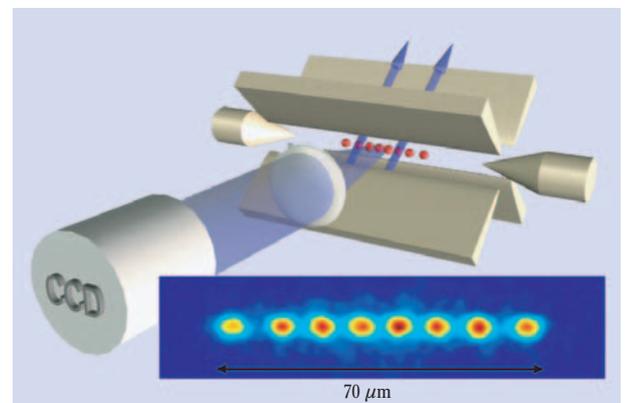


Abb. 3: Acht Ca^+ -Ionen bilden in einer linearen Paul-Falle ein Quantenregister, dessen Resonanzfluoreszenz mit einer CCD-Kamera aufgenommen wurde.

Dies geschieht durch Einstrahlen einer Frequenz, die sowohl einen Übergang des inneren als auch des äußeren Freiheitsgrades beinhaltet (Seitenbänder in Abb. 4). Aufgrund der Coulomb-Abstoßung wird die gesamte Ionenkette in Schwingung versetzt, d. h. das Bewegungsquant (Phonon) wird von allen Ionen „gesehen“. Daher ist der neue Zustand des Quantenregisters ein verschränkter Zustand der internen und des externen (vibronischen) Zustandes. Mit einem adressierten und frequenzmäßig entsprechend abgestimmten Laserimpuls auf ein Ziel-Qubit (das irgendein Ion der Kette sein kann) ist es dann möglich, nur den internen Zustand des Ziel-Ions dann und nur dann zu ändern, wenn sich die Kette in Bewegung befindet. Schließlich kann die Ionenbewegung durch Anwendung eines weiteren Laserimpulses auf das kontrollierende Ion wieder auf den Ausgangszustand gesetzt werden, sodass damit die CNOT-Operation abgeschlossen ist.

Für die Implementierung dieses Quantengatters wurden nach 1995 eine Reihe von Ionen untersucht, sowohl mit schmalen optischen Übergängen als auch mit Zeeman-Unterstufen und Hyperfeinzuständen. Obwohl die jeweilige technische Realisierung entsprechend stark variiert, ist das Cirac-Zoller-Konzept aber allgemein anwendbar. In den zurückliegenden zwei Jahren haben insbesondere die Experimente der Boulder-Gruppe um David Wineland und unserer Gruppe an der Universität Innsbruck die Möglichkeiten zur Quanteninformationsverarbeitung mit gespeicherten Ionen unter Nutzung verschiedener Methoden aufgezeigt. Das Innsbrucker Experiment orientiert sich eher an dem ursprünglichen Vorschlag von Cirac und Zoller, unter Verwendung einzelner Ca^+ -Ionen, optischer Übergänge und individueller Ionenadressierung. Das Boulder-Experiment arbeitet mit einzelnen Be^+ -Ionen, kodiert die Qubits in Hyperfein-Niveaus und verwendet für die kohärente Manipulation Raman-Übergänge mit begrenzter Adressierbarkeit.¹⁾ Obwohl beide Experimente konzeptionell stark verschieden sind, ist es in den vergangenen Jahren beiden Gruppen gelungen, Quanteninformationsverarbeitung erfolgreich durchzuführen. Im Folgenden werden einige Beispiele des Innsbrucker Experiments präsentiert, die Ergebnisse in Boulder sind aber sehr ähnlich, und zu diesem Zeitpunkt ist die Frage, welches Ion am besten geeignet sei, keinesfalls geklärt.

Das Werfen einer Quantenmünze

Einer der einfachsten Quantenalgorithmien lässt sich bereits mit nur zwei Qubits ausführen. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, mit nur einem einzigen Ion Quanteninformationsverarbeitung zu demonstrieren, denn damit sind bereits ein internes und ein externes (Bewegungs-)Qubit verfügbar. Dazu betrachten wir ein einfaches, klassisches Problem: Münzwerfen ist üblicherweise ein faires Spiel zur zufälligen Entscheidungsfindung, denn als Ergebnis werden im Mittel jeweils zu 50 % aller Würfe Kopf bzw. Zahl zu finden sein. Dies ist allerdings nur richtig, wenn keine (gefälschte) Münze mit zwei gleichen Seiten verwendet wird. Daher ist es stets angebracht, etwa vor einer anstehenden Wette die Münze zu prüfen. Allerdings braucht man, um die Frage nach einer *fairen* oder *unfairen* Münze zu beantworten, mindestens zwei Messungen, d. h. auf jede Seite ist ein Blick notwendig. In einer Quantenwelt ist dies aber nicht notwendig, denn hier sind Überlagerungen möglich. Wenn also die Münze als eine *Quantenmünze* verfügbar wäre, dann könnte man eine Superposition

der Zustände der beiden Seiten präparieren, und ein entsprechender Algorithmus sollte in der Lage sein, mit einer Messung die Frage zu beantworten, ob beide Seiten gleich oder verschieden sind. Das dazugehörige Programm ist bekannt als der Deutsch-Josza-Algorithmus und benötigt in der Tat nur genau zwei Qubits. Klarerweise löst die Implementierung eines solchen Algorithmus kein fortgeschrittenes Problem, allerdings ist man damit in der Lage, Quanteninformationsver-

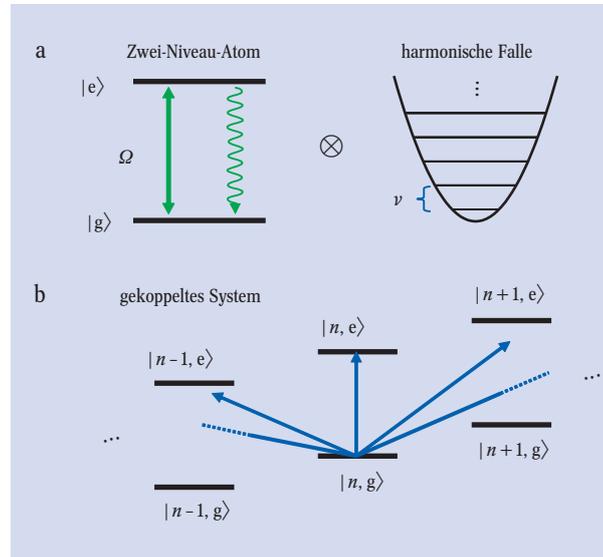


Abb. 4: Gespeichertes Zwei-Niveau-Atom in einer harmonischen Falle mit der Schwingungsfrequenz ν (a). Das gekoppelte System besteht aus vielen Niveaus, die mit $|n, x\rangle = |n\rangle|x\rangle$ bezeichnet werden, wobei $|x\rangle$ für die internen atomaren Zustände und $|n\rangle$ für das Schwingungsniveau des harmonischen Oszillators steht. Anregungen, die die Schwingungsquantenzahl $|n\rangle$ nicht ändern, nennt man Trägerübergänge, alle anderen Seitenbandübergänge (b).

arbeitung und deren grundsätzliche Möglichkeiten auf einfache Art und Weise zu demonstrieren.

Die Implementierung des Deutsch-Josza-Algorithmus' gelang mit Hilfe eines Ions und dessen inneren und äußeren Freiheitsgraden [2]. Die gesamte Prozedur erfordert mehrere kohärente Zustandsmanipulationen, die wiederum mit einer Sequenz von Laserimpulsen kodiert wurde. Anschließend wurde die Besetzung eines der inneren Zustände gemessen und das Ergebnis, entweder „0“ oder „1“, gab darüber Auskunft, ob eine falsche oder eine richtige Münze vorgelegen hat. Natürlich musste vorher die Münzinformation in Form einer Überlagerung kodiert werden und die Ergebnisse sind mit einer gewissen Unsicherheit²⁾ behaftet. Allerdings war die Prozedur ganz allgemein programmiert und zeigte klar, dass Quanteninformationsverarbeitung schneller abläuft, d. h. es war eine geringere Anzahl von Schritten (Messungen) erforderlich als in einer entsprechenden klassischen Berechnung.

Zwei-Qubit-Gatter mit Ionen

Ein Quantenprozessor für die universelle Quanteninformationsverarbeitung benötigt Zwei-Qubit-Gatter, um kohärent bedingte Operationen zwischen zwei beliebigen Qubits eines Quantenregisters durchführen zu können. Entsprechend dem Cirac-Zoller-Vorschlag wurden in den Innsbrucker Experimenten zwei Ionen geladen und durch Seitenbandkühlung im Grundzustand des harmonischen Oszillators präpariert. Ein Ion diente als das kontrollierende und das zweite als das

1) vgl. D. Leibfried und T. Schätz, Physik Journal, Januar 2004, S. 25

2) Im Experiment sind dies wenige Prozent.

Ziel-Qubit für die Gatteroperation. Zur Bestimmung der Wahrheitstabelle wurde danach das kontrollierende Ion durch Ein-Qubit-Operationen im entsprechenden Anfangszustand initialisiert. Mit einem Laserimpuls auf das erste Ion wird dann die angeregte interne Amplitude mit einer Seitenbandfrequenz auf die Ionenbewegung umgeschrieben, sodass das Kontroll-Qubit sich im (elektronischen) Grundzustand befindet, während der Bewegungszustand die entsprechende Amplitude eines Schwingungsquants erhält. Danach wird mit einer CNOT-Sequenz von Laserimpulsen auf das Ziel-Qubit der Zustand des Ziel-Qubits dann und nur dann verändert, wenn die Bewegungsamplitude nicht verschwindet. Schließlich wird mit einem weiteren Laserimpuls wiederum auf das erste Ion die Bewegungsamplitude in die innere Anregung des kontrollierenden Qubits zurückgeschrieben, sodass dessen Ausgangszustand wiederhergestellt wird. Abb. 5 zeigt diese Abfolge und die damit realisierte Wahrheitstabelle.

3) Auch als EPR-Zustände (nach Einstein, Podolsky und Rosen) bezeichnet. Vgl. dazu auch den einleitenden Artikel in diesem Heft.

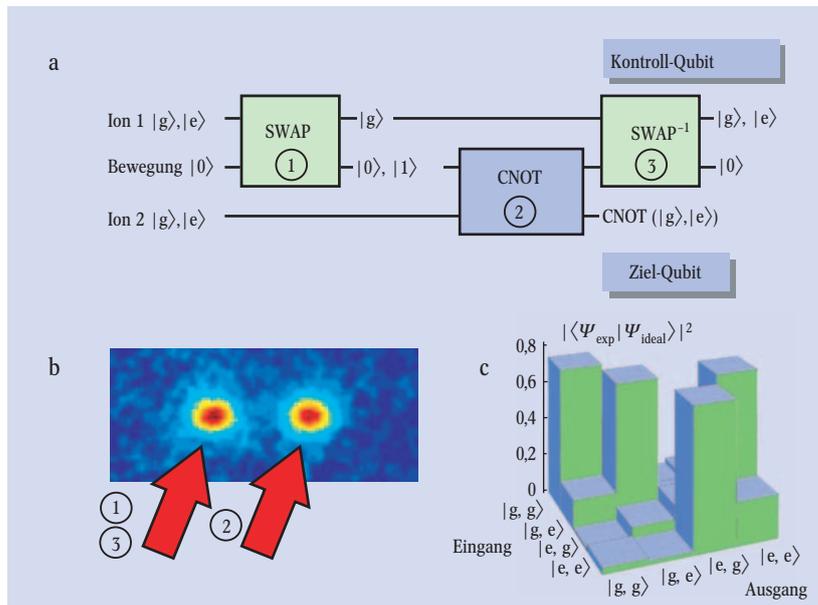


Abb. 5: Wenn man die Cirac-Zoller-CNOT-Gatter-Operation (a) mit Ionen-Qubits umsetzt, wird das kontrollierende Qubit mit einem Laserimpuls (b, 1) adressiert und die Anregungsamplitude in ein Schwingungsquant der Ionenbewegung umgeschrieben. Danach wird das Ziel-Qubit mit einer CNOT-Pulssequenz

angesprochen (b, 2) und schließlich die Anregungsamplitude des kontrollierenden Ions aus der Bewegung zurückgeschrieben. Die Wahrheitstabelle (c) zeigt, dass nur dann, wenn sich das kontrollierende Ion (das zuerst notierte) im Zustand $|e\rangle$ befindet, die Zustände des Ziel-Ions invertiert werden.

Die Verwendung von Superpositionszuständen hatte schon bei der Realisierung des Deutsch-Jozsa-Algorithmus zu einer Beschleunigung geführt. Das wirkliche Potenzial entwickeln Quantenrechner aber erst, wenn nicht-lokale Operationen verwendet werden. Damit ist es nämlich möglich, in einem einzigen Schritt kohärente Superpositionen verschiedener Qubits an verschiedenen Orten zu erzeugen und so den gesamten Rechenraum (Hilbert-Raum der Qubits) kohärent anzusprechen. Überlagerungen von Quantensystemen an verschiedenen Orten sind klassisch nicht vorstellbar, da der Begriff „verschiedene Orte“ bereits eine Lokalisierung enthält, die aber gerade hier nicht gegeben ist. Solche nicht-lokalen, d. h. *verschränkten* Zustände sind charakteristisch für die Quantennatur der hier vorliegenden Informationsverarbeitung und lassen sich nun mit der Gatter-Operation nach Cirac und Zoller rechnerisch realisieren. Das wird deutlich, wenn als

Eingangszustand für das Gatter ein klassisch nicht möglicher Überlagerungszustand verwendet wird. Man erhält dann (ohne Amplitudenfaktoren)

$$|g+e\rangle|g\rangle \xrightarrow{\text{CNOT}} |gg+ee\rangle, \quad (3)$$

d. h., falls im kontrollierenden Qubit die Superposition $|g+e\rangle$ steht, wird als Ausgangszustand durch die CNOT-Operation die Überlagerung $|gg+ee\rangle$ erzeugt. Dies ist einer der sog. Bell-Zustände³⁾, dessen Messung entweder beide Qubits im Zustand $|g\rangle$ oder beide im Zustand $|e\rangle$ anzeigt, und damit eine nicht-lokale Korrelation enthält. Damit lässt sich der Zustand nicht mehr mit der Vorstellung unabhängiger Teilchen an verschiedenen Orten beschreiben. Mathematisch genauer betrachtet, wird es unmöglich, die Teilchen überhaupt als unabhängig voneinander zu beschreiben: Sie sind „verschränkt“ in einem Zustand, der nicht mehr die Form eines Produktzustandes hat.

Die Bell-Zustände sind von besonderer Natur: Sie können nicht klassisch erzeugt werden, denn sie benötigen gerade nicht-lokale Quantenoperationen. Mit einem Ionenfallen-Quantenprozessor kann man diese quasi auf Knopfdruck erzeugen, sodass sie nun routinemäßig verfügbar sind als Ressource für die Quanteninformationsverarbeitung. Damit sind verschränkte Informationsspeicher verfügbar, die anders als verschränkte Photonenpaare nicht flüchtig sind und für aufeinander folgende Rechnungen verwendet werden können. Erst kürzlich ist es gelungen, die Verschränkung zweier Ionen sogar für mehr als 20 s aufrecht zu erhalten [3].

Rechenoperationen mit drei Qubits

Bereits mit drei Qubits ist man in der Lage, Rechenoperationen auszuführen, mit denen schon komplexe quantenmechanische Zustände deterministisch und in programmierter Weise erzeugt werden können. Gerade die damit mögliche Verschränkung von drei Teilchen hat in der Vergangenheit große Aufmerksamkeit erlangt, denn damit lassen sich Fragen nach den Grundlagen der Quantenmechanik und der Vielteilchenverschränkung beantworten und sie sind von Bedeutung für die Quantenkommunikation.

Der maximal verschränkte Zustand

$$|\Psi\rangle_{\text{GHZ}} = (1/\sqrt{2})(|ggg\rangle + |eee\rangle) \quad (4)$$

ist bekannt geworden als *GHZ-Zustand* (nach Greenberger, Horne und Zeilinger, [4]) und impliziert, dass in einer Messung stets alle Ionen entweder im Grundzustand $|g\rangle$ oder aber im angeregten Zustand $|e\rangle$ beobachtet werden. Seine Bedeutung liegt darin, dass die (erfolgreiche) Verschränkung von mehr als zwei Teilchen zu einem Konflikt mit lokal realistischen Theorien für nichtstatische Vorhersagen der Quantenmechanik führt, während Experimente mit zwei verschränkten Teilchen und Tests der Bellschen Ungleichungen nur Konflikte mit statistischen Voraussagen beobachten. Mit einem Drei-Qubit-Quantenprozessor ist es damit zum ersten Mal möglich geworden, solche Zustände zu „berechnen“ und damit für Untersuchungen zur Verfügung zu halten. Insbesondere lassen sich so die Dekohärenz der Zustände und deren zeitliches Verhalten unter dem Einfluss einer Messung untersuchen.

Aufgrund der freien Programmierbarkeit ist es nun auch möglich geworden, mit diesem Drei-Ionen-System maximal verschränkte Zustände der Art

$$|\Psi\rangle_{\text{W}} = (1/\sqrt{3})(|gee\rangle + |ege\rangle + |eeg\rangle) \quad (5)$$

zu erzeugen. Solche Zustände sind bekannt geworden als *W-Zustände* und bilden eine andere Klasse von verschränkten Zuständen. Ganz allgemein lässt sich zeigen, dass man GHZ-Zustände nicht mit nur lokalen Operationen (das sind Operationen, die nur einen inneren Zustand einzelner Qubits betreffen) und klassischer Kommunikation (*local operations and classical communication*, LOCC) in *W-Zustände* umwandeln kann und umgekehrt. Daher spricht man hier von zwei Verschränkungsklassen.

W-Zustände haben daher auch ganz andere Eigenschaften als GHZ-Zustände. Insbesondere reagieren sie anders auf eine Messung an einzelnen Qubits. Da ein GHZ-Zustand eine Überlagerung von allen drei Teilchen im Grund- und angeregten Zustand ist, wird bei einer Messung die dazugehörige Kohärenz zerstört. Nach einer Messung etwa eines Teilchens in einer entsprechenden lokalen Basis findet man daher die drei Qubits anschließend in einem Zustandsgemisch. Hingegen wird bei *W-Zuständen* lediglich die Kohärenz zerstört, die zwischen dem gemessenen Teilchen und den jeweils anderen beiden Teilchen existiert, die Kohärenz zwischen den nichtgemessenen Teilchen bleibt erhalten [5]. Dies hat Konsequenzen für die Quantenkommunikation: Sind z. B. drei Parteien an der Kommunikation beteiligt und verwenden etwa GHZ-Zustände, dann wird eine Verschränkung vollständig zerstört, wenn an einer Stelle gemessen wird. Bei Verwendung von *W-Zuständen* lässt sich dagegen bei einer Messung einer Partei die Verschränkung der beiden anderen Partner immer noch aufrecht erhalten.

Solche Untersuchungen sind nur der Anfang für grundlegende Experimente zum Studium der Verschränkung vieler Teilchen. Bereits mit vier Qubits gibt es unendlich viele Verschränkungsklassen, und es ist derzeit auch völlig ungeklärt, wie man Verschränkung in Mehrteilchen-Systemen etwa quantitativ erfassen soll, es gibt bislang kein eindeutiges „Verschränkungsmaß“ dafür. Mit den nun zur Verfügung stehenden Quantenregistern auf der Basis gespeicherter Ionen steht erstmals ein ideales Werkzeug zur Verfügung, diese Fragen experimentell zu untersuchen.

Teleportation mit Atomen

Neben der Möglichkeit, mit einem kleinen Quantencomputer spezielle quantenmechanische Zustände quasi „berechnen“ zu können, bietet sich an, auch quantenmechanische Protokolle zu realisieren und auszutesten. Eines der wichtigsten Verfahren zur Übertragung von Quanteninformation ist die Teleportation, ursprünglich vorgeschlagen von C. Bennett und seinen Mitarbeitern als ein Protokoll zur Übertragung der vollständigen quantenmechanischen Information zwischen zwei Partnern [6].

Informationsübertragung im klassischen Sinne findet üblicherweise durch Lese- und Schreibvorgänge statt, die als Messprozesse realisiert sind. Diese üblichen klassischen Prozesse sind für die Quanteninformationsübertragung ausgeschlossen, da sie ja die zu sendende Information ändern würden. Gemäß dem Protokoll von Bennett et al. kann man allerdings Verschränkung nutzen, um zusammen mit klassischer Kommunikation einen Quantenzustand vollständig zu übertragen. Dieses, als Teleportation bezeichnete Verfahren wurde bereits vor einigen Jahren mit korrelierten Photonen demonstriert [9], allerdings ist dieses Verfahren probabilistisch und erfordert im Allgemeinen, Photonen zu detektie-

ren, weil erst durch diese Postselektion klar wird, ob Teleportation stattgefunden hat.

Mit einem Quantencomputer lässt sich nun dieses Protokoll auf folgende Art und Weise implementieren (Abb. 6): Üblicherweise werden bei der Quantenkommunikation die beiden Partner als Alice und Bob bezeichnet. Zum Informationsaustausch via Teleportation benötigen sie dazu zwei Kanäle, einen klassischen Kanal und einen Quantenkommunikationskanal, auf dem Alice und Bob sich zu Beginn einen Bell-Zustand teilen. Sender Alice erhält irgendeinen Quantenzustand $|\psi\rangle$ und manipuliert diesen in kohärenter Weise zusammen mit ihrem Teil des Bell-Zustandes so, dass sie mit einer anschließenden (Bell-)Messung eine Aussage darüber machen kann, welchen Bell-Zustand sie

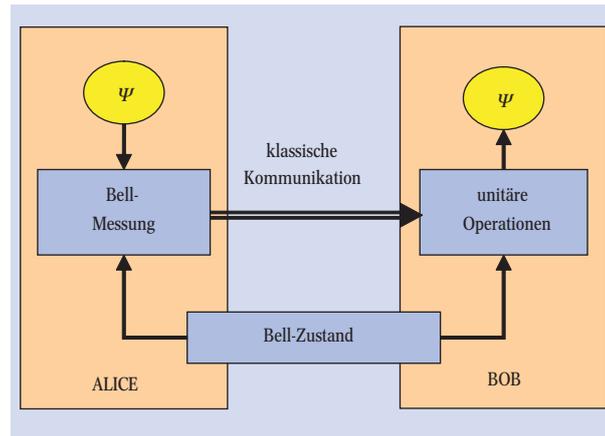


Abb. 6: Eines der wichtigsten Verfahren für die Übertragung von Quanteninformation ist die Teleportation eines quantenmechanischen Zustands ψ . Das Kommunikationsprotokoll besteht aus Anweisungen für die Messung und Manipulation des Bell-Zustandes, den sich die beiden Partner Alice und Bob anfangs teilen. (vgl. Text).

beobachtet hat. Diese Information teilt sie Bob auf dem klassischen Kanal mit, und Bob kann dann seinen Teil des ursprünglichen Bell-Zustandes (den er ja über den Quantenkanal von Alice erhalten hatte) wiederum über kohärente Manipulationen so rotieren, dass er den ursprünglichen Quantenzustand wieder erhält. Aufgrund der Messung auf Alices Seite geht dabei aber der Quantenzustand bei ihr verloren, die Quanteninformation ist an Bob übertragen worden.

Solche Experimente wurden kürzlich mit drei Ionen in Innsbruck und Boulder erfolgreich durchgeführt [7,8]. Dabei gelang es zum ersten Mal, die Information von einem Atom zu einem anderen vollständig und deterministisch, also quasi „auf Knopfdruck“, zu übertragen. In diesen Experimenten wurde nur eine Distanz von 10 bzw. einigen 100 μm überbrückt, allerdings ist das nur ein technisches, aber kein prinzipielles Problem. Diese Art der Teleportation wird voraussichtlich eine bedeutsame Rolle spielen bei der Informationsübertragung zwischen vielen Qubits eines zukünftigen Quantencomputers, der möglicherweise mit miniaturisierten Ionenfallen auf einem Chip realisiert werden kann.

Skalierbarkeit

Gerade die Skalierbarkeit ist einer der Hauptvorteile der Ionenfallentechnik für Quantencomputer. Die einfachste Möglichkeit besteht z. B. darin, zu den jeweiligen Ionenketten in den linearen Fallen immer noch ein weiteres Ion hinzuzufügen. Dadurch ändert sich die fundamentale Schwingungsfrequenz der vibrierenden Kette nicht und das Cirac-Zoller-Schema funktioniert in der gleichen Weise wie mit nur wenigen Ionen. Der Nachteil dabei ist aber, dass durch das Hinzufügen von Ionen die Kette natürlich immer schwerer wird. Dadurch benötigt man für die Manipulation des gesamten Registers mit

der Seitenbandanregung immer mehr Zeit, sodass die Rechenoperationen immer langsamer werden. Ebenso wird es immer schwieriger, eine große Ionenkette zu Beginn in den Grundzustand des harmonischen Oszillators zu kühlen. Obwohl die Skalierbarkeit im Prinzip erhalten bleibt, wird dieses Konzept voraussichtlich nur Quantencomputer mit einigen zehn Ionen ermöglichen.

Aus diesem Grund gibt es eine ganze Reihe von weiteren Vorschlägen zur Skalierung von Ionenfallen-Quantencomputern. Zur ungestörten Speicherung und zur optimalen Manipulation der in den Ionen eingeschriebenen Quanteninformation wäre es ideal, die Ionen in individuellen Fallen zu haben und zwischen ihnen einen Quantenkanal zu etablieren, mit dem Quanteninformation ausgetauscht werden kann. Eine Möglichkeit dazu ist, die statische Quanteninformation in den Zuständen der Ionen auf Photonen umzuschreiben, die dann wiederum über eine Glasfaser auf ein anderes Ionen-Qubit übertragen werden kann. Dazu wurde bereits vor einigen Jahren von Cirac, Zoller, Kimble und Mabuchi ein vollständiges Transmissionsprotokoll über einen „photonischen Kanal“ vorgeschlagen und entwickelt [10]. Ein entsprechendes Experiment dazu wird in Innsbruck gerade aufgebaut. Hier sind die einzelnen Ionen innerhalb eines optischen Resonators hoher Güte gespeichert. Mit optimierter Kopplung der Ionen an den Resonator lässt sich die Quanteninformation auf Photonen übertragen, mit deren Hilfe auch weite Entfernungen überbrückbar sind. Das Protokoll und dazugehörige Techniken liefern eine ideale Schnittstelle, allerdings stellt die Kombination von Ionenfallen und Resonatortechnologie hohe experimentelle Anforderungen.

Eine andere Möglichkeit, Quanteninformation zu übertragen, ergibt sich, indem man ein einzelnes Ion als Lese- und Schreibkopf verwendet und damit die Verschränkung auf ein ganzes Feld einzelner gespeicherter Ionen überträgt [11]. Die technischen Schwierigkeiten dieses Konzeptes sind aber gegenwärtig noch ungelöst.

Daher hat die Boulder-Gruppe um D. Wineland schon vor einigen Jahren ein *quantum-charged-coupled-device* (QCCD), d. h. einen „Ionen-Chip“ vorgeschlagen, der aus vielen Segmenten besteht, die alle einzelne Ionenfallen darstellen [12]. Die Idee ist, damit Ionen zwischen verschiedenen Orten und Speicherstellen hin- und herzubewegen und damit die Quanteninformation zwischen verschiedenen Registern zu übertragen. Damit ist es vorstellbar, verschiedene Speicherbereiche miteinander zu verknüpfen, ähnlich wie das mit herkömmlichen Prozessoren geschieht, nun allerdings auf kohärente Weise. Derzeit wird dieser Ansatz von mehreren Gruppen (D. Wineland in Boulder, C. Monroe in Ann Arbor, R. Blatt und W. Hänsel in Innsbruck, A. Steane in Oxford, und F. Schmidt-Kaler in Ulm) intensiv verfolgt, denn damit erscheint die Skalierung eines Ionenfallen-Quantencomputers in Reichweite.

Ausblick

Für die weitere zukünftige Entwicklung von Quantencomputern wird es unerlässlich sein, Verfahren zur Fehlerkorrektur zu implementieren. In der klassischen Informationsverarbeitung ist Fehlerkorrektur ein gut bekanntes und entwickeltes Gebiet, im Bereich der Quanteninformationsverarbeitung war es lange Zeit nicht klar, ob eine Fehlerkorrektur überhaupt möglich ist. Der Grund liegt darin, dass Quanteninformation nicht kopiert werden kann und deshalb klassische Fehlerkor-

rekturprotokolle, die ja alle auf redundanter Kodierung beruhen, nicht möglich sind. Überraschenderweise ist es seit einigen Jahren bekannt, wie man dies auch für Quantencomputer mit Hilfe verschränkender Operationen tun kann [13]. Erste Experimente dazu wurden bereits mit NMR-basierten Apparaturen und kürzlich auch mit einem Ionenfallen-Quantencomputer der Boulder-Gruppe durchgeführt [14].

Für den zuverlässigen Betrieb eines Quantencomputers wird es notwendig sein, routinemäßig solche Protokolle in großem Ausmaß zu betreiben. Dazu wird man sog. logische Qubits mit Hilfe von fünf oder sieben physikalischen Qubits (z. B. Ionen) und einigen Quantengatter-Operationen kodieren. Damit sollte es möglich sein, ein Qubit für lange Zeit kohärent und verlustfrei zu erhalten – ein Traum für Quantencomputer, aber auch für die Messtechnik im Allgemeinen und für Frequenznormale im Besonderen.

Die derzeit verfügbaren Quantencomputer sind noch in den Kinderschuhen, aber die gegenwärtige Technik mit gespeicherten Ionen zeigt gangbare Wege zu einem größeren Quantenrechner, mit dessen Hilfe das neue Gebiet der Quanteninformation weiter ausgebaut und untersucht werden kann.

Danksagung

An dieser Stelle sei allen meinen Mitarbeitern und Kollegen gedankt, die in hervorragender Weise die Innsbrucker Experimente mitkonzipiert und durchgeführt haben. Insbesondere danken möchte den langjährigen Assistenten F. Schmidt-Kaler, J. Eschner, C. Becher, H. Häffner, C. Roos, W. Hänsel und T. Körber für die gute Zusammenarbeit und die Arbeit vieler Nächte.

Literatur

- [1] J. I. Cirac und P. Zoller, Phys. Rev. Lett. **74**, 4091 (1995)
- [2] S. Gulde et al., Nature **421**, 48 (2003)
- [3] H. Häffner et al., Appl. Phys. B **81**, 151 (2005); C. Langer et al., quant-ph/0504076
- [4] D. M. Greenberger, M. A. Horne und A. Zeilinger, Physics Today, August 1993, S. 22
- [5] C. F. Roos, et al., Science **304**, 1478 (2004)
- [6] C. Bennett et al., Phys. Rev. Lett. **70**, 1895 (1993)
- [7] M. Riebe et al., Nature **429**, 734 (2004)
- [8] M. D. Barrett et al., Nature **429**, 737 (2004)
- [9] D. Bouwmeester et al., Nature **390**, 575 (1997)
- [10] J. I. Cirac et al., Phys. Rev. Lett. **78**, 3221 (1997)
- [11] I. Cirac und P. Zoller, Nature **404**, 579 (2000)
- [12] D. Kielpinski et al., Nature **417**, 709 (2002)
- [13] A. R. Calderbank et al., Phys. Rev. A **54**, 1098 (1996); A. Steane, Proc. R. Soc. Lond. A **452**, 2551 (1996)
- [14] J. Chiaverini et al., Nature **432**, 602 (2004)

Der Autor

Rainer Blatt studierte Physik an der Universität Mainz, wo er 1981 promovierte. Nach Postdoc-Aufenthalten in Mainz, am JILA (Joint Institute for Laboratory Astrophysics) in Boulder (Colorado) und an der FU Berlin habilitierte er 1988 an der Universität Hamburg, wo er als Heisenberg-Stipendiat bis 1994 arbeitete, unterbrochen durch Forschungsaufenthalte am JILA. Nach einer Professur an der Universität Göttingen erhielt Rainer Blatt einen Lehrstuhl an der Universität Innsbruck. Seit 2003 ist er Direktor des neu gegründeten Instituts für Quantenoptik und Quanteninformation der Österreichischen Akademie der Wissenschaften.

