

ROBERT-WICHARD-POHL-PREIS

Atome mit Licht zähmen

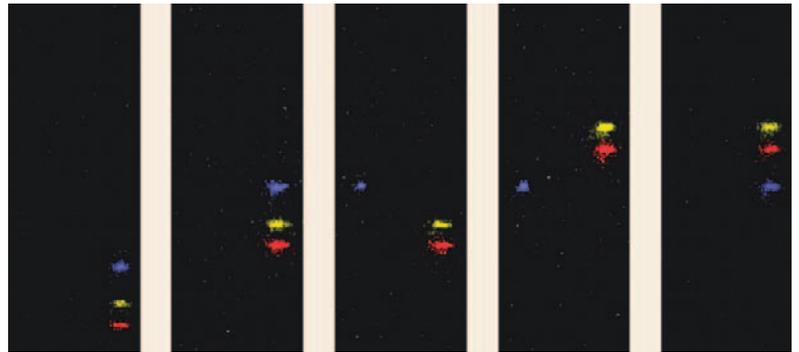
Auf einem Förderband aus Licht sortieren und manipulieren Laserstrahlen einzelne Atome.

Dieter Meschede

Bereits seit einigen Jahren vollzieht sich sowohl in der Atomphysik als auch in der Quantenoptik eine spürbare Wandlung, die von der reinen Beobachtung der Phänomene wegführt. Inzwischen ist vielmehr der Wunsch, ein System präzise beeinflussen zu können, in den Mittelpunkt wissenschaftlicher Forschung gerückt. Die gezielte Manipulation von Quantensystemen ist dabei ein wesentlicher Schritt auf dem Weg zur Quanteninformationstechnologie – hier mit neutralen Atomen.

Im Laufe des 20. Jahrhunderts hat die Quantenphysik unser physikalisches Verständnis der materiellen Welt grundlegend gewandelt. Die Quantenphysik hat uns nicht nur neue Einsichten über den Aufbau von Atomen und Molekülen verschafft, sie ist auch eine Grundlage der modernen Technik geworden, z. B. der allgegenwärtigen Mikroelektronik. Insbesondere deren Miniaturisierungskonzepte dringen heute in immer mehr Bereiche der Physik sowie der Technologie vor und erfordern ein tieferes quantenphysikalisches Verständnis. Die fortschreitende Miniaturisierung ist im Übrigen eine wichtige Triebfeder der wirtschaftlichen Dynamik moderner Industriegesellschaften. Für die Mikroelektronik spitzt sich dieser technologisch-wirtschaftliche Zusammenhang in dem berühmten Mooreschen Gesetz zu, nach welchem sich die Dichte der Transistoren auf elektronischen „Chips“ alle 18 Monate verdoppelt [1].

Seit etwa 1990 vollzieht sich auch in Atomphysik und Quantenoptik eine weitere Veränderung: Die Wissenschaft schwenkt vom Standpunkt des reinen Beobachters mehr auf den des Ingenieurs ein, der seine Systeme nach bekannten Regeln beherrschen und für bestimmte Aufgaben präparieren will. Die kontrollierte Manipulation von Quantensystemen gehört aus diesem Grund zu den aktivsten Gebieten der physikalischen Forschung. Einen besonderen Anstoß verdankt sie dem schon heute berühmten Algorithmus von Peter Shor zur Faktorisierung großer Zahlen, der auf der Manipulation solcher Quantensysteme beruht [2]. Der Shor-Algorithmus aus dem Jahr 1997 zeigt, dass die Gesetze der Quantentheorie eine ganz neue Klasse von Algorithmen zur Lösung mathematischer Probleme ermöglichen, die mit herkömmlichen Rechnern nicht zu bewältigen sind. Diese Entwicklungen haben in Physik, Mathematik und Informatik unter dem Namen



Die Mikroskopaufnahme in Falschfarben zeigt drei bei einer Wellenlänge von 852 nm fluoreszierende Cäsiumatome und ihr Umsortieren mit zwei gekreuzten optischen Förderbändern. Die

Atome sind im Abstand von etwa 10 μm in den Potentialmulden der Stehwellen gespeichert. Die Auflösung ist instrumentenbedingt begrenzt, ein Pixel entspricht ca. 1 μm .

„Quantencomputer“ große Faszination ausgelöst. Die Entdeckung des Shor-Algorithmus’ verdeutlicht aber auch, dass die revolutionärsten Perspektiven „gezügelter“ Quantensysteme nur dann physikalisch zu realisieren sind, wenn es gelingt, viele mikroskopische Teilchen synchron zu kontrollieren und zu manipulieren, ohne die möglichst perfekte Kontrolle über jedes Einzelsystem zu verlieren. Genau dieser Übergang vom wohl kontrollierten Einteilchen-System zum Vielteilchen-System stellt aber die vielleicht größte Herausforderung an die Experimentatoren dar.

Beginnend mit der Beobachtung eines einzelnen fluoreszierenden Barium-Ions im Jahr 1978 [3] hat die experimentelle Beherrschung von Ionen und Atomen durch die stürmische Entwicklung der Laserkühlung große Fortschritte gemacht. Perspektiven und Status

KOMPAKT

- Gespeicherte neutrale Atome haben das Potenzial, als Bausteine für künftige Quantencomputer zu fungieren.
- Mithilfe zweier gegenläufiger Laserstrahlen gelingt es, einzelne Cäsiumatome in einer Reihe von Potentialmulden zu fangen und gezielt zu manipulieren.
- In dem entstehenden Quantenregister ist die Information im magnetischen Moment (Pseudospin) der Atome gespeichert. Mithilfe eines gepulsten Mikrowellensignals lässt sich der Spin jedes Atoms individuell umklappen und damit eine „NOT“-Operation realisieren.
- Mit dieser Technik lassen sich Überlagerungszustände erreichen, die über eine längere Zeit von mindestens 0,6 ms kohärent bleiben.

Prof. Dr. Dieter Meschede, Institut für Angewandte Physik der Universität Bonn, Wegelerstr. 8, 53115 Bonn – Preisträgerartikel anlässlich der Verleihung des Robert-Wichard-Pohl-Preises 2007 auf der DPG-Frühjahrstagung in Düsseldorf.

von physikalischen Systemen, wie z. B. Ionen oder Atomen, für Quanteninformationsprozesse wurden in „roadmaps“ zusammengefasst [4]. Neutralen Atomen wird darin als einem von sieben physikalischen Systemen das Potenzial zugeschrieben, Kernbausteine für die experimentelle Realisierung eines Quantencomputers zu sein. Eine Besonderheit neutraler Atome besteht darin, dass es schon heute experimentelle Ergebnisse sowohl für einen „bottom-up“ als auch für einen „top-down“-Zugang gibt: Im Zentrum dieses Artikels steht der „bottom-up“-Zugang, bei dem einzelne, individuell präparierte Atome wie in einem Baukasten zu einem komplexeren Vielteilchen-System zusammengefügt werden. Grundlage für den „top-down“-Zugang ist der für ultrakalte Gase realisierte Mott-Isolator-Übergang, mit dessen Hilfe sich ein optisches Gitter so perfekt mit Atomen im gleichen Zustand füllen lässt, dass jeder Gitterplatz genau einfach besetzt ist [5].

Wenn ein System für die Quanteninformationsverarbeitung geeignet sein soll, muss der entscheidende „Rohstoff“ verfügbar sein. Das sind in erster Linie die sog. verschränkten Mehrteilchen-Zustände, d. h. nicht in Einteilchen-Zustände faktorisierbare Überlagerungszustände. Mit einem System aus ca. 10 000 Atomen in einem Mott-Isolator ist es Immanuel Bloch bereits gelungen, massiv parallele Verschränkung im Interferenzmuster der aus dem Gitter ausgeworfenen Materiewelle nachzuweisen [5]. Bislang ist es aber nicht möglich, in diesem System ein einzelnes Atom selektiv anzusprechen. Die Aussicht, diese beiden Zugänge zu kombinieren, macht die Forschung mit neutralen Atomen zu einem vielversprechenden Ansatz für die Wissenschaft von der Quanteninformation.

In unserem Labor haben wir einen Meilenstein auf dem Weg zur Quanteninformationstechnologie mit neutralen Atomen erreicht, indem wir ein Quantenregister aus neutralen Atomen konstruiert haben [6]. Ein Register ist der zentrale Arbeitsspeicher eines Computers und besteht aus einer Reihe von elementaren Informationszellen, die jeweils ein Bit an Information, d. h. eine logische „Null“ oder eine „Eins“, aufnehmen können. In unserem Quantenregister verwenden wir einzelne neutrale Atome, um Information zu speichern. Da ein Atom ein mikroskopisches Quantensystem ist, eignet es sich dazu, Quanteninformation zu speichern. In Anlehnung an das „Bit“ wird es daher „Qubit“ genannt und kann neben den klassischen Informationszuständen „Null“ und „Eins“ auch beliebige quantenmechanische Überlagerungszustände davon annehmen.

Atome auf dem Förderband

Unser Quantenregister besteht aus einer Kette von einzelnen Cäsiumatomen, die von Laserlicht innerhalb einer Ultrahochvakuumapparatur festgehalten werden. Zwei fokussierte gegenläufige Laserstrahlen gleicher Frequenz formen ein optisches Stehwellenfeld. Das

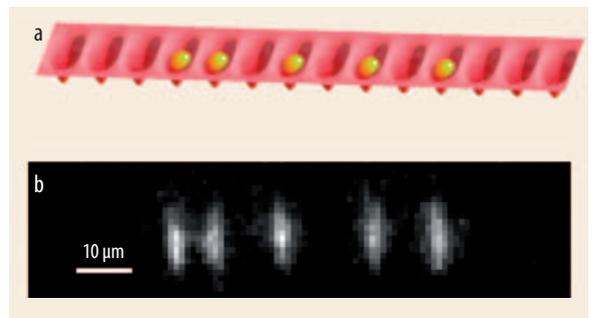


Abb. 1 a) Das Quantenregister besteht aus einer Kette von einzelnen Cäsiumatomen, die in den Potentialmulden einer Atomfalle aus Laserlicht gehalten werden. b) Auf dem Foto des Quantenregisters sind fünf Atome zu sehen, die durch einen Laserstrahl zur Fluoreszenz angeregt wurden.

Interferenzmuster bildet für die Atome eine Reihe von Potentialmulden, in denen sie sich speichern lassen (Abb. 1a). Das technologische Konzept dieser Atomfalle ist angelehnt an das der optischen Pinzette, die sich als Werkzeug in der Biologie, Photochemie und Nanofabrikation bewährt hat.

Die Tiefe der Potentialmulden entspricht einer Temperatur von 1 Millikelvin. Um Atome darin halten zu können, kühlen wir sie zunächst in einer magneto-optischen Falle (MOT) auf eine Temperatur unter 100 Mikrokkelvin ab. Ihr Funktionsprinzip beruht auf einer Weiterentwicklung von Methoden der Laserkühlung, die seit 20 Jahren routinemäßig in vielen Labors verwendet werden. Durch Einsatz hoher Magnetfelder ist unsere magneto-optische Falle imstande, ein einzelnes Atom oder eine kleine, abzählbare Anzahl von Atomen zu fangen. Anschließend transferieren wir die gekühlten Atome verlustfrei in die Potentialmulden, in denen sie ca. 30 s gespeichert bleiben [7].

Zur Beobachtung beleuchten wir die Atome mit einem weiteren Laserstrahl, der die Atome zur Fluoreszenz anregt und sie gleichzeitig kühlt. Das von den Atomen gestreute Licht hat eine Leistung von nur wenigen zehn Femtowatt. Ein lichtstarkes Objektiv

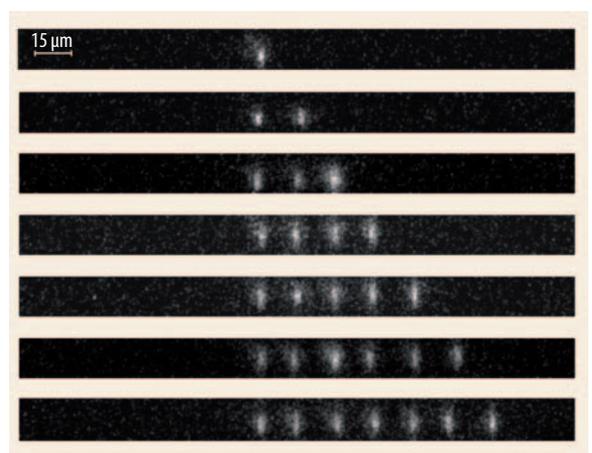


Abb. 2 Mithilfe eines orthogonal angebrachten optischen Förderbandes lassen sich die Atomabstände regularisieren. Die sortierten Ketten zeigen ein bis sieben gespeicherte Cäsiumatome, zwischen denen sich jeweils ca. dreißig unbesetzte Potentialmulden befinden.

bildet das Fluoreszenzlicht auf eine photonenzählende CCD-Kamera ab. Auf diese Weise lassen sich die gespeicherten Atome kontinuierlich und mit hohem Kontrast beobachten. **Abb. 1b** zeigt eine Kette von fünf gespeicherten Atomen mit einem Abstand von jeweils etwa 10 Mikrometern. Jeder Lichtfleck entspricht einem einzelnen Atom, das sich in einer Potentialmulde befindet.

Verstimmt man die Frequenz eines der gegenläufigen Laserstrahlen geringfügig, wandert das Interferenzmuster wie ein optisches Förderband langsam nach links oder rechts, abhängig vom Vorzeichen der Verstimmung. Auf diese Weise lassen sich die Atome über Zentimeter lange Strecken transportieren und dabei sogar filmen [8]. Die Installation eines zweiten, orthogonal montierten optischen Förderbandes ermöglicht auch die Regularisierung der Atomabstände, die nach dem Transfer aus der MOT zunächst zufällig wie in **Abb. 1b** ausfallen. **Abb. 2** zeigt die „sortierten“ Atomketten [9].

Quanteninformation schreiben und auslesen

Die Information der einzelnen Atom-„Qubits“ des Quantenregisters ist im magnetischen Moment (Pseudospin) der Atome gespeichert. Zeigt der Spin nach oben, entspricht dies einer logischen „Null“, zeigt er nach unten, einer logischen „Eins“. In unserem Experiment verwenden wir als Pseudospinsystem die Hyperfeinzustände des Cäsiumatoms, die auch Grundlage der Atomuhr sind (**Abb. 3**). Durch Einstrahlen eines gepulsten Mikrowellensignals bei der Resonanzfrequenz der Atome klappen wir den Spin der Atome um (Pi-Puls). Dabei kehrt sich eine logische „Eins“ in eine „Null“ und umgekehrt. Dieser Prozess entspricht der logischen Operation „NOT“ in der Informationstechnologie.

Um orts aufgelöst auf die einzelnen Qubits des Quantenregisters zuzugreifen, legen wir in Analogie zur Kernspintomographie in der medizinischen Bildgebung außerdem einen Magnetfeldgradienten an. Da die Resonanzfrequenz der Atome in diesem Feld

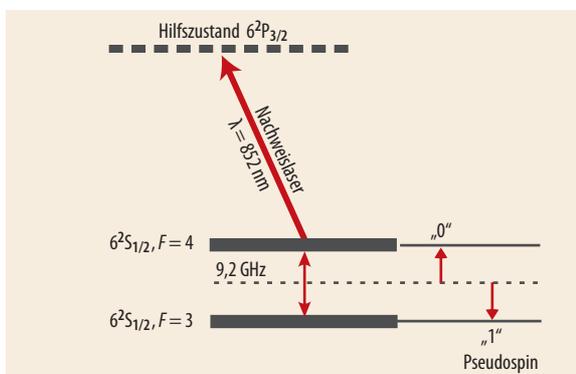


Abb. 3 Die Hyperfeinzustände des Cäsiumatoms mit den Spinquantenzahlen $F = 3$ und $F = 4$ dienen als Qubit-Zustände „0“ und „1“. Der Nachweislaser regt die Atome im Zustand „0“ bzw. $F = 4$ zur Fluoreszenz an. Bei hoher Intensität werden sie durch Strahlungsdruck selektiv aus der Dipolfalle entfernt.

variiert, können wir durch die Wahl der Mikrowellenfrequenz bestimmen, welches spezielle Qubit angesprochen werden soll (**Abb. 4**).

Zur Illustration beschreiben wir ein Fünf-Qubit-Quantenregister mit der Information (01010). Dies bedeutet, dass die einzelnen Qubits abwechselnd die Information „Null“ und „Eins“ erhalten sollen. Zunächst fotografieren wir die fünf gespeicherten Atome und bestimmen deren genaue Position (**Abb. 5a**). Anschließend initialisieren wir das Quantenregister im Zustand (00000). Zu diesem Zweck strahlen wir einen Laserstrahl ein, der die Pseudospins aller gespeicherten Atome polarisiert, sodass sie nach oben orientiert sind (**Abb. 5b**). Um den Zielzustand (01010) zu erreichen, führen wir eine „NOT“-Operation auf dem zweiten und vierten Atom des Quantenregisters durch. Jeweils ein Pi-Puls bei den Resonanzfrequenzen dieser beiden Atome klappt deren Spins um (**Abb. 5c**). Schließlich lesen wir die Information des Quantenregisters aus, indem wir zunächst Atome im Zustand „0“ durch Strahlungsdruck entfernen. Die verbleibenden Atome, die eine logische „Eins“ speichern, werden zum Nachweis wieder in den $F = 4$ -Zustand befördert und fluoreszieren. **Abb. 5d** zeigt den gewünschten Zielzustand (01010), da das zweite und das vierte Atom leuchten, während die anderen Plätze, die die „0“ repräsentieren, dunkel bleiben.

In unserem Quantenregister sind alle Atom-Qubits individuell adressierbar, das heißt, die gespeicherte Information jedes Qubits lässt sich unabhängig manipulieren. Die Ortsauflösung unserer Adressiertechnik beträgt 2,5 Mikrometer [6]. Ein Atom des Quantenregisters kann daher lokal mit Information beschrieben werden, während die Wirkung auf ein mehr als 2,5 Mikrometer entfernt gespeichertes Atom vernachlässigbar ist. Danach wird es nominell möglich sein, in einer einen Millimeter langen Stehwelle mehrere hundert Qubits zu speichern und selektiv zu verarbeiten.

Die Besonderheit eines Qubits gegenüber einem klassischen Bit besteht in seiner Fähigkeit, neben den klassischen Zuständen „Null“ und „Eins“ auch quantenmechanische Überlagerungszustände zu speichern.

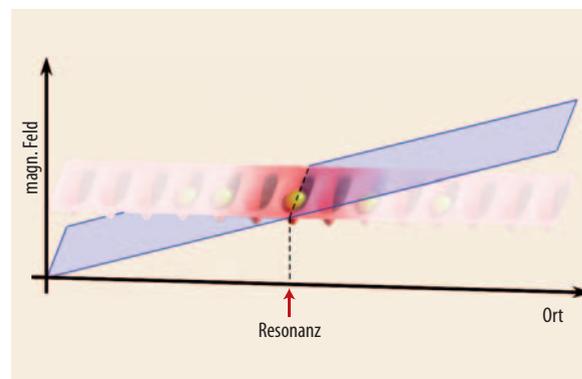


Abb. 4 Das Quantenregister befindet sich in einem Magnetfeldgradienten (blau), damit die Resonanzfrequenz der Qubits ortsabhängig ist. Auf diese Weise können wir orts aufgelöst auf jedes einzelne Qubit zugreifen, um es mit Information zu beschreiben.

Die Erzeugung einer symmetrischen Überlagerung von „Null“ und „Eins“ wird in der Quanteninformationstechnologie als „Hadamard“-Gatter bezeichnet. Wir haben eine solche Hadamard-Operation mit einzelnen neutralen Atomen bei einer Schaltzeit von acht Mikrosekunden realisiert.

Ein wichtiges Merkmal der Qualität des Quantenregisters ist seine Kohärenzzeit. Sie gibt an, wie lange die empfindlichen quantenmechanischen Überlagerungszustände bestehen, bevor sie aufgrund von Störeinflüssen aus der Umgebung zerfallen und die gespeicherte Quanteninformation verloren geht. Um die Kohärenzzeit zu messen, bedienen wir uns wieder Techniken aus der Kernspinresonanz, sog. Spin-Echo-Sequenzen, die wir auf einzelne Atome anwenden. Die Atome sind dabei mittels einer Hadamard-Operation in einer symmetrischen Überlagerung aus „Null“ und „Eins“ präpariert. Nach einer bestimmten Zeit wird ein Pi-Puls auf diese Superposition angewendet, und nach derselben Wartezeit sowie einem weiteren Hadamard-Puls ist dann ein oszillierendes Spin-Echo-Signal zu beobachten. Die Kohärenzzeit gibt an, nach welcher Zeit der Kontrast auf $1/e$ des Anfangswertes abgefallen ist.

Unsere Messungen an gespeicherten Atomen zeigen, dass die Kohärenzzeiten stets größer sind als

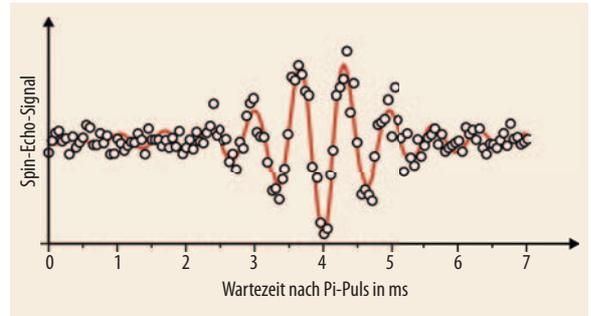


Abb. 6 Das Spin-Echo-Signal wurde an einzelnen gespeicherten Atomen gemessen. Der Kontrast der Oszillation dieses Signals ist ein Maß für die Kohärenz des Quantenregisters – die Quanteninformation bleibt erhalten.

$600 \mu\text{s}$, also viel länger als die gemessenen Schaltzeiten von $8 \mu\text{s}$ für die Manipulation der Information (Abb. 6) [6, 7]. Innerhalb dieser Kohärenzzeit lassen sich daher mehrere Operationen auf dem Quantenregister durchführen. Die Kohärenzzeiten waren immer durch technische Einflüsse begrenzt und können experimentell deutlich verlängert werden.

Vom Quantenregister zum Quantencomputer

Neutrale Atome sind ein attraktives physikalisches System, um Komponenten zur Quanteninformationsverarbeitung zu konstruieren. Unser Quantenregister ist ein Meilenstein, den wir sogar vor der in den „roadmaps“ [4] anvisierten Zeit realisiert haben. Eine wichtige Eigenschaft, die sich auch unser Quantenregister zunutze macht, ist die einfache Struktur der atomaren Quantenzustände. Sie erlaubt es, Quantenbits auf technisch unkomplizierte Weise zu speichern. Die Skalierbarkeit der Qubit-Operationen ist ein weiterer Vorteil gegenüber anderen Quantensystemen. Da sich benachbarte Atome in unserem Quantenregister nicht gegenseitig beeinflussen, bietet es die Möglichkeit, viele hundert Atom-Qubits aufzunehmen und damit Rechenoperationen durchzuführen. Darüber hinaus lassen sie sich aufgrund ihrer fehlenden Ladung auch hervorragend von ihrer physikalischen Umgebung isolieren. Diese Eigenschaft ermöglicht es, die empfindliche Quanteninformation relativ lange zu speichern, was die gemessenen Kohärenzzeiten unseres Quantenregisters bestätigen.

Wir haben mit unserem Quantenregister eine Grundlage geschaffen, um die nächsten Herausforderungen auf dem Weg zum Quantencomputer anzugehen. Ein entscheidender Schritt wird die Realisierung von Rechenoperationen zwischen zwei Qubits sein – ein Quantengatter. Dazu muss gezeigt werden, dass kohärente Wechselwirkungen zwischen zwei einzelnen gefangenen Atomen, die sich in einem stabilen Zustand befinden, kontrolliert ein- und ausgeschaltet werden können und zu verschränkten Zuständen führen. Auch hier bietet unser Quantenregister hervorragende Perspektiven. Mindestens zwei Techniken kommen für Gatteroperationen in unserem System

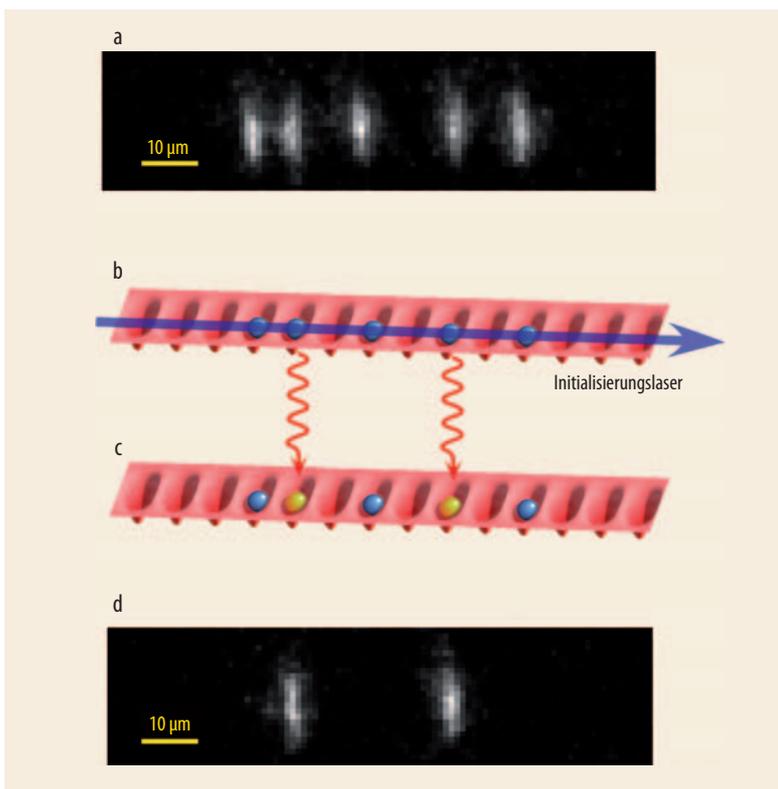


Abb. 5 Anhand eines Quantenregisters aus fünf Atomen (a) soll das Schreiben und Auslesen von Information illustriert werden. Ein Initialisierungslaser beschreibt alle Qubits mit der Information „Null“, hier in blau angedeutet (b). Das Quantenregister befindet sich im Ausgangszustand (00000). Mikrowellenpulse bei der Resonanzfrequenz des zweiten bzw. vierten Atoms klappen den Spin

dieser Atome um (c), die nun die Information „Eins“ tragen (gelb). Das Quantenregister befindet sich nun im gewünschten Zielzustand (01010). Ein weiteres Foto bestätigt das Erreichen des Zielzustands (d). Die Atome im Zustand „Eins“ leuchten, während die Plätze im Zustand „Null“ dunkel bleiben, weil die Atome durch Strahlungsdruck entfernt wurden.

in Frage. Die eine besteht darin, die Gatteroperation durch eine direkte Stoß-Wechselwirkung zwischen den zwei Atomen zu induzieren, welche hierfür in perfekt kontrollierter Weise in Kontakt gebracht werden – in Anlehnung an Experimente mit optischen Gittern [5]. Bei der anderen wechselwirken die Atome durch Austausch eines einzelnen Lichtteilchens über einen optischen Resonator extrem hoher Güte. In einem ersten Schritt in Richtung kontrollierter, zunächst noch inkohärenter Wechselwirkungen haben wir kürzlich zwei Atome gezielt in ein und dieselbe Potentialmulde befördert. Mit Laserlicht wurde dann eine stark exergische Reaktion induziert, die zum Verlust der Atome führte [10].

Als weiterer Schritt auf dem Weg zu Quantenprozessoren muss die schon genannte Skalierung der verwendeten Techniken, d. h. deren Anwendung auf eine größere Zahl (mindestens 100) Qubits, unterstützt werden. Im Laufe der nächsten zehn Jahre können nach heutiger Vorstellung mithilfe von Registern aus etwa 100 bis 1000 neutralen Atomen erste Quantenrechnungen oder Quantensimulationen, insbesondere zur Überprüfung von physikalischen Theorien, realisiert werden, welche sich mit größter Sicherheit auch zu diesem zukünftigen Zeitpunkt noch nicht auf den mächtigsten Großrechnern durchführen lassen.

*

Zu guter Letzt ist es mir eine Freude, mich an dieser Stelle bei allen Mitarbeitern, stellvertretend bei Arno Rauschenbeutel, Wolfgang Alt und Victor Gomer, dafür zu bedanken, dass sie die Begeisterung an unseren Experimenten teilen und mit ihrer Einsatzfreude und stetigen Arbeit die experimentellen Fortschritte möglich gemacht haben.

Literatur

- [1] G. E. Moore, *Electronics* **38**, 8 (1965)
- [2] P. Shor, *SIAM J. Comp.* **26**, 1484 (1997)
- [3] W. Neuhauser, M. Hohenstatt, P. Toschek und H. Dehmelt, *Phys. Rev. A* **22**, 1137 (1980)
- [4] ARDA roadmap: <http://qist.lanl.gov>; EU QIPC Strategic Report: <http://qist.ect.it/Reports/reports.htm>
- [5] I. Bloch, *Nature Physics* **1**, 23 (2005)
- [6] D. Schrader, I. Dotsenko, M. Khudaverdyan, Y. Miroshnychenko, A. Rauschenbeutel und D. Meschede, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 150501 (2004)
- [7] D. Meschede und A. Rauschenbeutel, in: *Adv. At. Mol. Phys.* **53**, hrsg. von G. Rempe und M. O. Scully, S. 76-105 (2006)
- [8] Y. Miroshnychenko, D. Schrader, S. Kuhr, W. Alt, I. Dotsenko, M. Khudaverdyan, A. Rauschenbeutel und D. Meschede, *Optics Express* **11**, 3498 (2003)
- [9] Y. Miroshnychenko, W. Alt, I. Dotsenko, L. Förster, M. Khudaverdyan, D. Meschede, D. Schrader und A. Rauschenbeutel, *Nature* **442**, 151 (2006)
- [10] Y. Miroshnychenko, W. Alt, I. Dotsenko, L. Förster, M. Khudaverdyan, D. Meschede, S. Reick und A. Rauschenbeutel, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 243003 (2006)

DER AUTOR

Dieter Meschede hat Physik in Hannover, Köln und Boulder studiert und anschließend in München promoviert. Sein weiterer Weg führte ihn über eine Stelle als Assistant Professor an der Yale University sowie über München und Hannover an seine aktuelle Wirkungsstätte in Bonn. Dort befasst er sich hauptsächlich mit der Manipulation einzelner neutraler Atome. Besonders am Herzen liegt ihm die Vermittlung seines Wissens über Fachkreise hinaus. So wurde die Neuherausgabe des Klassikers „Gerthsen – Physik“ wesentlich von Dieter Meschede geprägt. Auch seine federführende Rolle in Veranstaltungen zur Schulphysik zeichnen ihn aus.



Paul Esser