

Atom-Chips, optische Gitter und Mikrolinsen

Quantencomputer mit neutralen Atomen

Gerhard Birkel

Nach den großen Erfolgen in der Quanteninformationsverarbeitung mit gespeicherten Ionen zeichnen sich vergleichbare Ergebnisse auch mit neutralen Atomen ab. Wie Ionen lassen sich Atome fast vollständig von der Umgebung abschirmen, und die verschiedenen Ansätze zur Implementierung atomarer Quantenprozessoren wie „Atom-Chips“, Fallen aus Mikrolinsen oder optische Gitter versprechen eine hohe Flexibilität und Skalierbarkeit.

Die hoch entwickelten Techniken der Quanten- und Atomoptik erlauben es heutzutage, die inneren und äußeren Freiheitsgrade neutraler Atome im Detail zu kontrollieren. Dazu zählen insbesondere die Laserkühlung und die optische Speicherung von Atomen (Physik-Nobelpreis 1997) sowie die Erzeugung quantenentarteter Gase, insbesondere von Bose-Einstein-Kondensaten (BEC, Physik-Nobelpreis 2001). Heutzutage können wir im Labor neutrale Atome routinemäßig auf Temperaturen unter 100 nK abkühlen. In Speicher- und Fallengeometrien lassen sich Atome bis zu Minuten lang festhalten und langlebige innere Zustände mit nahezu beliebiger Präzision kontrolliert besetzen. Mit der optischen Präzisionsspektroskopie (u. a. Physik-Nobelpreis 2005) stehen uns zuverlässige Methoden für die kohärente Manipulation von Atomen und die Detektion von wenigen Teilchen bis hinunter zu einzelnen Atomen zur Verfügung.

Diese Fortschritte sind auch die treibende Kraft hinter den Bestrebungen, Quanteninformationsverarbeitung mit neutralen Atomen zu realisieren. Neben dem eigentlichen Ziel, also der Verwirklichung eines „Quantencomputers“ als neuartiges Rechenwerkzeug, liefert das Studium der Quanteninformationsverarbeitung mit neutralen Atomen wesentliche neue Erkenntnisse für das grundlegende Verständnis der Quantenphysik und die Anwendung von quantenphysikalischen Methoden in einem sich kontinuierlich erweiternden Einsatzfeld in Wissenschaft und Technik.

Die Realisierung von Quantenprozessoren mit neutralen Atomen bietet einige grundsätzliche Vorteile:

- **Implementierung von Qubits:**

KOMPAKT

- Qubits aus neutralen Atomen bieten den Vorteil, dass sie sich fast vollständig von den Einflüssen der Umgebung abschirmen lassen.
- Magnetische Mikrofallen, optische Mikrofallen aus mikrostrukturierten optischen Elementen sowie optische Gitter ermöglichen skalierbare und flexible Quantenregister mit vielen Atomen.
- Nachdem Ein-Qubit-Gatter bereits realisiert wurden, steht nun die Implementierung eines Zwei-Qubit-Gatters an.

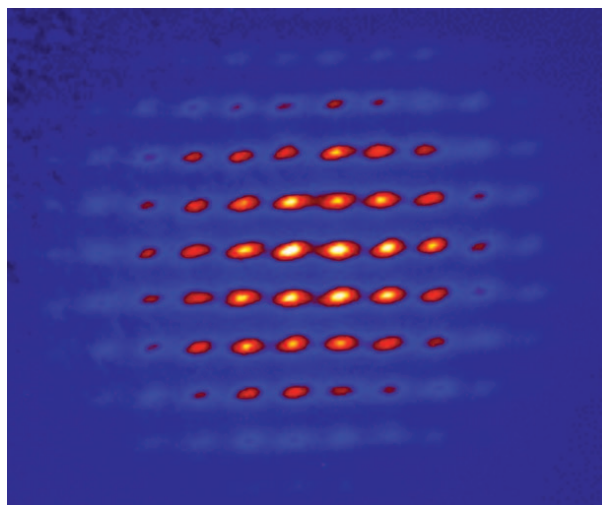


Abb. 1: Diese Anordnung von Atomen in Dipolfallen, die durch Mikrolinsen erzeugt werden, dient als zweidimensionales Register für atomare Qubits. Die Einzelfallen in dieser Fluoreszenzaufnahme haben einen lateralen Abstand von 125 Mikrometern.

Mit Atomen oder Molekülen als Träger der Quanteninformation stehen prinzipiell identische Qubit-Systeme zur Verfügung, die sich zudem weitgehend von der Umgebung entkoppeln lassen. Darüber hinaus gibt es mehrere Möglichkeiten, die Quanteninformation in Quasi-Spin-1/2-Systemen sehr flexibel zu kodieren. Dazu gehören bei gespeicherten Atomen neben den inneren auch äußere Freiheitsgrade, z. B. die Hyperfein-Unterstufen des atomaren Grundzustandes bzw. die Vibrationsmoden in einem externen Speicherpotential.

- **Skalierbarkeit:** Die prinzipielle Ununterscheidbarkeit der Atome und der Einsatz magnetischer oder optischer Mikrofallen (Abb. 1) ermöglichen es, hunderte oder tausende von atomaren Qubits zu implementieren. Mit sog. optischen Gittern lassen sich sogar bis zu 10^5 Qubits bereitstellen. Damit bieten neutrale Atome die einzigartige Möglichkeit, relevante Schemata für die Quanteninformationsverarbeitung auf großen Skalen zu entwickeln und experimentell zu testen.
- **Flexible Quantengatter:** In den letzten Jahren wurde eine Reihe von

Prof. Dr. Gerhard Birkel, Institut für Angewandte Physik, Technische Universität Darmstadt, Schlossgartenstr. 7, 64289 Darmstadt

vielversprechenden Vorschlägen für Zwei-Qubit-Quantengatter mit neutralen Atomen entwickelt. Die Mechanismen für die Kontrolle des Quantengatterprozesses lassen sich äußerst flexibel wählen, Beispiele sind

- Gatter auf Basis der Phasenverschiebung, die Atome bei ultrakalten Stößen erfahren,
- Tunnelprozesse, die vom externen Bewegungszustand der Atome abhängen,
- die Dipol-Dipol-Wechselwirkung zwischen hochangeregten Rydberg-Atomen,
- die Kopplung der Atome durch das Strahlungsfeld eines optischen oder Mikrowellen-Resonators.

Gemeinsam ist diesen Mechanismen stets, dass die Wechselwirkung nur während der Gatteroperation in

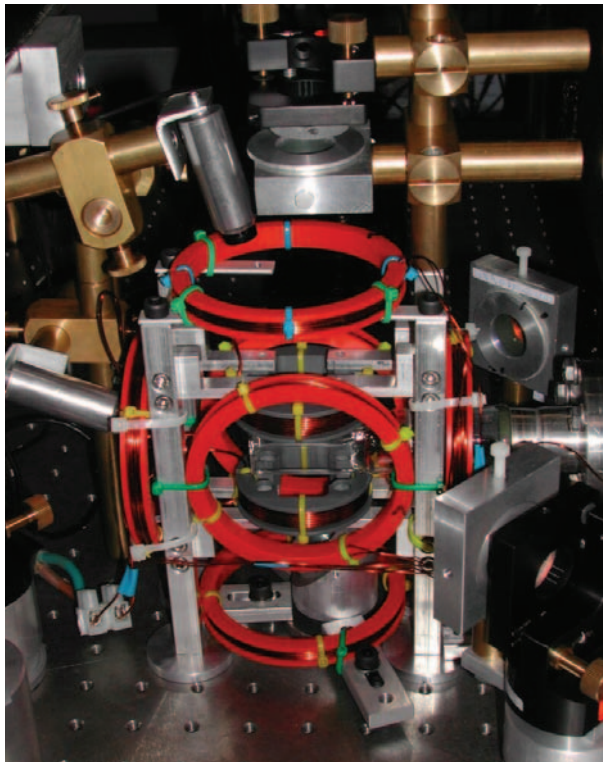


Abb. 2: In einer Glaszelle im Zentrum der dargestellten Spulenkonfiguration werden im Ultrahochvakuum neutrale Atome in einer magnetooptischen Falle eingefangen und durch Laserkühlung auf Temperaturen im Bereich von 10 bis 100 μK gekühlt. Sie stehen dann als Qubit-Systeme für weitere Experimente zur Verfügung

Kraft gesetzt wird und in der Regel von dem für die Speicherung der atomaren Qubits maßgebenden Prozess disjunkt ist. Intensive Forschungsarbeiten weltweit zielen derzeit darauf ab, erstmals ein vollständiges Zwei-Qubit-Quantengatter für einen Quantenprozessor zu realisieren.

Atome versus Ionen

Atomare Quantensysteme bieten den entscheidenden Vorteil, dass sie sich in modernen quantenoptischen Experimenten weitgehend von Umwelteinflüssen entkoppeln lassen. Bei neutralen Atomen gelingt dies zu einem hohen Grad mit inhomogenen Magnet- oder Lichtfeldern. Abbildung 2 zeigt einen typischen experimentellen Aufbau, wie er für die Quanteninformationsverarbeitung eingesetzt wird.

Wie auch in anderen Experimenten der modernen Atomphysik und Quantenoptik haben sich die durch Laserlicht besonders einfach zu manipulierenden Alkaliatome (vor allem Rubidium oder Cäsium) als die bevorzugten atomaren Systeme erwiesen. Unter typischen Vakuumbedingungen sind Speicherzeiten von mehreren Sekunden, bei optimierten Bedingungen von mehreren Minuten möglich. Besonders vorteilhaft ist dabei, dass die umgebende Vakuumapparatur selbst nicht gekühlt werden muss und auf Raumtemperatur verbleiben kann.

Die Kurzreichweitigkeit der Speicherkräfte begünstigt die Entkopplung der Atome von Umgebungsbedingungen zusätzlich. In diesem Punkt unterscheiden sich neutrale Atome von geladenen Ionen (vgl. dazu den Artikel von Rainer Blatt), die wegen der deutlich größeren Reichweite der Coulomb-Wechselwirkung wesentlich anfälliger für elektromagnetische und elektrostatische Störfelder sind. Andererseits ist es gerade diese langreichweitige Wechselwirkung, die bei Ionen die Kopplung zwischen den einzelnen Qubits ermöglicht und somit erheblich zu den großen Fortschritten bei der Implementierung von Quantenalgorithmen in Ionenfallen beigetragen hat.

Experimentelle Ansätze

In einem Quantenprozessor präpariert und initialisiert man zunächst die Qubits, bevor darauf Ein- und Zwei-Qubit-Operationen entsprechend dem zu implementierenden Algorithmus angewendet werden.¹⁾ Anschließend besteht die Aufgabe darin, die resultierenden Qubit-Zustände möglichst zuverlässig auszulesen. Voraussetzung dafür sind geeignete Register, in denen sich atomare Qubits mit hoher Zuverlässigkeit speichern und manipulieren lassen.

Die Entwicklung von Qubit-Registern mit typischen Abmessungen der einzelnen Speicherzellen im Mikrometer-Bereich ist ein wesentlicher Schritt hin zur Quanteninformationsverarbeitung mit neutralen Atomen. Wichtige Beispiele sind magnetische Mikrofallen [1], optische Mikrofallen basierend auf mikrostrukturierten optischen Elementen [2] und optische Gitter [3]. Wesentliche Merkmale dieser Fallen sind eine (Energie-)Tiefe im Bereich von $k_B \times 1$ Millikelvin, also etwa zwei Größenordnungen über den durch Laserkühlung erreichbaren Temperaturen, und Vibrationsfrequenzen der gespeicherten Atome im Bereich von 10 bis einige 100 kHz. Durch Laserkühlung, aber auch durch die Ausnutzung des Übergangs zu einem Bose-Einstein-Kondensat, lässt sich der Vibrations-Grundzustand dieser Fallen zu einem hohen Grade besetzen. Die typische Ausdehnung der Grundzustandswellenfunktion der Atome in diesen Potentialen beträgt nur noch wenige 10 Nanometer.

Aus dem breiten Spektrum der derzeit verfolgten Ansätze zur Realisierung eines Quantenprozessors mit neutralen Atomen möchte ich im Folgenden einige Beispiele vorstellen.²⁾ Gemeinsam ist diesen Ansätzen eine gute Skalierbarkeit des Systems. Bei den optischen Gittern ist das offensichtlich. Magnetische und optische Mikrofallen hingegen sind deshalb gut skalierbar, weil sie auf modernen Fertigungsmethoden basieren, wie sie in der Mikro- und Nanostrukturierung entwickelt worden sind. Diese sind dafür prädestiniert, Einzelstrukturen zu vervielfachen, aber auch größere funktionale Einheiten zu integrieren.

Atom-Chips

In räumlich inhomogenen Magnetfeldern wirkt auf Atome mit einem nichtverschwindenden magnetischen Moment eine ortsabhängige Energieverschiebung aufgrund des Zeeman-Effektes. Diese Verschiebung entspricht einem rein konservativen Speicherfeld mit einer Tiefe von einigen $k_B \times$ Millikelvin. Allerdings ist dabei zu beachten, dass sich aufgrund der topologischen Eigenschaften der Magnetfelder zwar dreidimensionale Magnetfeldminima erzeugen lassen, aber keine Feldmaxima. Daher können Atome nur in denjenigen

1) Im Artikel von I. Cirac und P. Zoller werden die verschiedenen Quantengattermechanismen für neutrale Atome und Aufbau und Funktionsweise eines Quantenprozessors beschrieben.

2) Eine umfassende Darstellung der derzeit durchgeführten Aktivitäten findet sich in [4] und unter www.cordis.lu/ist/jet/qipc-sr.htm

inneren Zuständen gespeichert werden, die in einem Magnetfeldminimum eine Energieminimierung erfahren. Das schränkt die Auswahl der zu speichernden Zustände ein. Bisher ist es jedoch immer gelungen, eine prinzipielle Begrenzung zu umgehen, etwa durch eine geeignete Wahl der Zustände oder durch die Kombination mit zusätzlichen Speicherfeldern (z. B. optische Felder oder Mikrowellenfelder).

Für die Quanteninformationsverarbeitung haben sich miniaturisierte und mikrostrukturierte Magnetfeldgeometrien als besonders vorteilhaft erwiesen. Dabei werden Techniken aus der Mikro- und Nanoelektronik eingesetzt, um komplexe integrierte Leiterstrukturen auf der Oberfläche eines Trägersubstrates zu erzeugen (Abb. 3). Je nach der Form der Leiterbahnen sind verschiedene Magnetfallentypen möglich, in denen sich Atome nahe an der Oberfläche des Trägersubstrates speichern lassen. Aufgrund der Analogie zu Strukturen aus der integrierten Elektronik heißen diese Anordnungen gängigerweise „Atom-Chips“ [1].

Deutschland nimmt bei diesen Entwicklungen eine führende Rolle ein. Im Kontext der Quanteninformationsverarbeitung führen u. a. die Gruppen von J. Schmiedmayer (Heidelberg), J. Reichel und T. Hänsch (München/Paris) und C. Zimmermann (Tübingen) entsprechende Arbeiten durch. Ein in der experimentellen Umsetzung etwas abweichender Weg wird mit integrierten Magnetfallengeometrien verfolgt, die auf mikro- und nanostrukturierten Permanentmagneten basieren. Gemeinsames Ziel dieser Arbeiten ist es, durch die Kombination verschiedener auf dem Chip integrierter Magnetfallengeometrien und der für die Laserkühlung erforderlichen Strahlen ein kompaktes Gesamtsystem für die Präparation von kalten Atomen und deren Transfer in Magnetfallen mit möglichst steilen „Wänden“ zu erzielen. Auf diesem Weg sind in den letzten Jahren erhebliche Erfolge erzielt worden. Herausgehoben sei hier die erstmalige Bose-Einstein-Kondensation in Atom-Chips in München und Tübingen, eine Technik, die jetzt routinemäßig auch von anderen Gruppen eingesetzt wird. In einer ganzen Serie von Experimenten ließen sich die Funktionsbestandteile für einen auf magnetischen Mikrofallen beruhenden Quantenprozessor demonstrieren. So ist es möglich, Atome wie auf einem Förderband über den Atomchip zu transportieren, Atomensembles in mehrere Fallen aufzuteilen, zu verschieben und wieder zusammenzuführen [1], oder die kohärente Aufspaltung in einem Doppelmuldenpotential zu erzielen [5].

Eine Herausforderung liegt darin, dass sich (infolge der Skalierungsgesetze von Magnetfeldern) besonders hohe Magnetfeldgradienten und -krümmungen nur in der Nähe der Oberfläche erzielen lassen. Doch gerade die Nähe zu den zumeist leitenden Oberflächen bewirkt eine störende Wechselwirkung und somit Dekohärenz. Ein entscheidender Schritt auf dem Weg zu einem funktionalen Quantenprozessor und damit auch eine erste Eingrenzung dieser Dekohärenzproblematik ist J. Reichel und T. Hänsch gelungen, die die kohärente Evolution von Rubidiumatomen des Isotops ^{87}Rb in einem Atom-Chip durch Ramsey- und Spin-Echo-Experimente eingehend untersuchten. Diese Experimente haben erstmals gezeigt, dass auch in Atom-Chips lange Kohärenzzeiten für die Superposition von Hyperfein-Zuständen möglich sind [6].

Auf dem Weg zu einem Quantenprozessor mit Atom-Chips bestehen die nächsten wichtigen Schritte darin,

einzelne gespeicherte Atome nachzuweisen und Zwei-Qubit-Gatter zu implementieren. Der Nachweis der Atome, aber auch das zustandsselektive Auslesen des Ergebnisses einer Quantenoperation geschieht in den meisten Fällen optisch, z. B. durch resonante Absorption oder Streuung von Licht. Daher arbeiten verschiedene Arbeitsgruppen daran, magnetische Mikrostrukturen zur Speicherung mit optischen Mikrostrukturen, z. B. Mikroresonatoren, Faserresonatoren, oder Mikrolinsen [2], zur Detektion zu kombinieren.

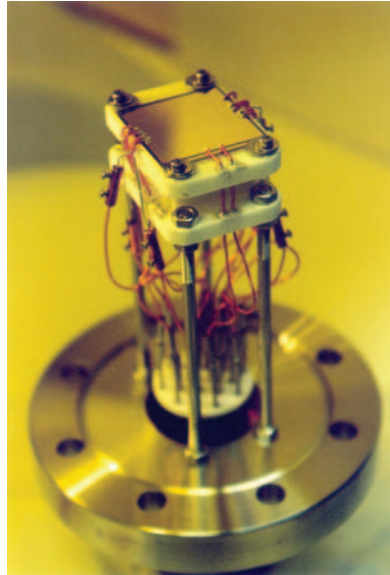


Abb. 3: Experimentell lassen sich Atom-Chips in Form integrierter Leiterbahnstrukturen auf der Oberfläche eines Trägersubstrats für verschiedene Magnetfallen herstellen (oben, Foto: J. Reichel, München/Paris). Links sieht man einen Gesamtaufbau mit dem am oberen Ende auf einem Vakuumflansch montierten Atom-Chip. (Foto: J. Schmiedmayer, Heidelberg)

Für die Implementierung von Zwei-Qubit-Gattern mit magnetisch gespeicherten Atomen ist es in der Regel erforderlich, die zunächst getrennten Speicherpotentiale zusammenzuführen. Je nach der Kodierung der Qubits ergeben sich jedoch unterschiedliche Anforderungen an den dabei auftretenden Wechselwirkungsmechanismus zwischen den Atomen. Für eine Qubit-Kodierung in inneren Zuständen der Atome wurden Zwei-Qubit-Phasengatter basierend auf der Stoßwechselwirkung vorgeschlagen. Hierbei ist eine Zustandsabhängigkeit der Wechselwirkung und damit in der Regel die zeitweilige Implementierung von zustandsabhängigen Speicherpotentialen erforderlich. Die Einschränkungen an die speicherbaren Zustände in einer Magnetfalle sind für reine Magnetfallen eine große Herausforderung. Durch Kombination von Magnetfeldern mit elektrostatischen, optischen oder Mikrowellenfeldern ist es jedoch möglich, eine entsprechende Zustandsabhängigkeit für typische Qubit-Zustände zu erzielen.

Optische Gitter

Eine zweite Klasse von mikroskopischen Speicherpotentialen ist durch optische Dipolpotentiale gegeben. Handelt es sich dabei um Potentialstrukturen, die durch die Interferenz von mehreren Lichtstrahlen entstehen, so spricht man von optischen Gittern [3]. Die Interferenz der Lichtfelder geht dabei mit periodischen Intensitäts- oder Polarisationsmodulationen einher, die über die jeweilige Abhängigkeit der Energieverschiebung der induzierten atomaren Dipole zu einer periodischen Modulation der Potentialtiefe führen. Es entstehen periodisch angeordnete Potentialmulden mit einem typischen Abstand von einer halben Wellenlänge des Lichtfeldes und einer typischen Tiefe von $k_B \times 1 \text{ mK}$.

Darin können lasergekühlte Atome eingelagert und bis nahe an den Vibrationsgrundzustand gekühlt werden.

Nach einer ersten intensiven Forschungsphase Mitte der 1990er-Jahre erleben optische Gitter seit einigen Jahren im Zusammenhang mit Bose-Einstein-Kondensaten eine Renaissance. Für die Quanteninformationsverarbeitung ist dies vor allem auf die Erzeugung des Mott-Isolator-Übergangs durch I. Bloch und T. Hänsch (München/Mainz) zurückzuführen [7]. Entscheidend ist dabei, dass über den Mott-Isolator-Übergang die definierte Besetzung von bis zu 10^5 Speicherpotentialen mit genau einem Atom im Vibrationsgrundzustand erreicht wird. Damit sind hervorragende Ausgangsbedingungen für die Quanteninformationsverarbeitung in einem hochgradig skalierbaren System gegeben. Entsprechende Experimente werden derzeit in den Gruppen von I. Bloch (Mainz) und W. Phillips (NIST, USA) durchgeführt. So ist I. Bloch und T. Hänsch eine massive Verschränkung von gespeicherten Atomen gelungen [8], die sich in dem Verschwinden des Interferenzmusters der atomaren Teilwellen aus verschiedenen Gittertöpfen manifestiert, wenn man das optische Gitter nach einer geeignet gewählten Wechselwirkungszeit abschaltet (Abb. 4). Dieses Experiment liefert den Beweis, dass sich die stoßinduzierte kurzreichweitige Wechselwirkung von ultrakalten neutralen Atomen heranziehen lässt, um die Phase kontrolliert und zustandsabhängig zu verschieben – ein Meilenstein auf dem Weg zu einem auf neutralen Atomen basierenden Quantenprozessor.

Trotz der Vorteile von optischen Gittern für die Quanteninformationsverarbeitung begrenzt die mangelnde Adressierbarkeit der einzelnen Qubit-Speicherzellen diesen Zugang. Drei Lösungsmöglichkeiten bieten sich dafür an:

- ▶ geeignete Implementierungen von Gatteroperationen, bei denen eventuell auf die Einzeladressierbarkeit verzichtet werden kann;
- ▶ zusätzliche ortsabhängige Wechselwirkungen (z. B. Magnetfeldgradienten), die eine Einzeladressierung gewährleisten oder
- ▶ die Integration einer weiteren Speichergeometrie, welche die Eigenschaften des optischen Gitters durch zusätzliche Möglichkeiten für die Adressierbarkeit ergänzt. Dieser Zugang wird in einer Kollaboration der Gruppe von W. Phillips (NIST, USA) und unserer Arbeitsgruppe verfolgt.

Einen anderen Zugang, um das Adressierungsproblem zu lösen, untersucht D. Meschede (Bonn) (s. V. Gomer et al. in [4]): Atome werden mit wechselseitigen Abständen von mehreren Gitterperioden aus einer magneto-optischen Falle so in eine eindimensionale Stehwelle geladen, dass es gelingt,

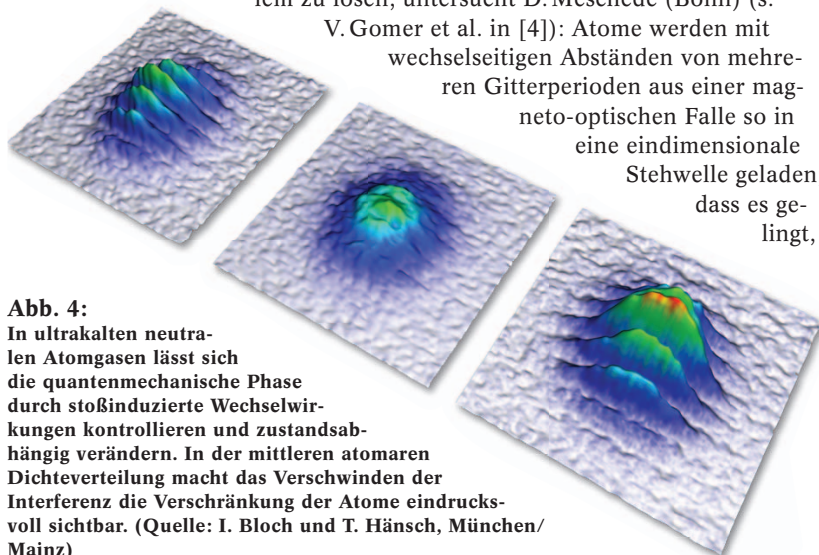


Abb. 4: In ultrakalten neutralen Atomgasen lässt sich die quantenmechanische Phase durch stoßinduzierte Wechselwirkungen kontrollieren und zustandsabhängig verändern. In der mittleren atomaren Dichteverteilung macht das Verschwinden der Interferenz die Verschränkung der Atome eindrucksvoll sichtbar. (Quelle: I. Bloch und T. Hänsch, München/Mainz)

die Position der einzelnen Atome optisch aufzulösen. In einer Reihe von Arbeiten wurde gezeigt, dass sich so einzelne Atome im optischen Gitter nachweisen lassen, dass die Atome in einem laufenden optischen Gitter verschoben werden können und dass es durch die Kombination von zwei aufeinander senkrecht stehenden Stehwellen möglich ist, die Anordnung der Atome in der Stehwelle flexibel zu ändern.

Quantenprozessoren mit mikrostrukturierten optischen Elementen

Der von uns verfolgte Ansatz für die Entwicklung eines Quantenprozessors beruht darauf, die optische Speicherung und Kontrolle von neutralen Atomen mit der Mikro- und Nanostrukturierung von optischen Systemen zu kombinieren. Mit Hilfe von zweidimensionalen Registern aus refraktiven und diffraktiven Mikrolinsen erzeugen wir zweidimensionale Systeme von Dipolfallen (Abb. 5). Jede einzelne Dipolfalle kann mit einem Ensemble oder im Grenzfall mit einem einzelnen Atom besetzt werden. Somit erhält man ein zweidimensionales Register von atomaren Qubits, das sich hervorragend skalieren lässt. Schon jetzt stehen uns Linsensysteme für tausende Registerplätze zur Verfügung, eine Zahl, die bei weitem noch nicht die Möglichkeiten des Herstellungsprozesses ausschöpft. Zudem ist jeder Registerplatz infolge des großen lateralen Abstands der Fallen einzeln adressierbar. Dabei können – je nach benötigter Operation – auch Reihen, Spalten oder das Gesamtregister zugleich angesprochen werden.

Die von uns derzeit eingesetzten Mikrolinsensysteme bestehen aus einer Anordnung von 50×50 refraktiven oder diffraktiven Mikrolinsen mit Durchmesser und Abstand von 125 Mikrometern und einer Brennweite von 625 Mikrometern, lithographisch in einem Quarzsubstrat hergestellt (Abb. 5a–b). Durch Beleuchtung eines Ausschnittes dieses Linsensystems mit einem rotverstimmten Laserstrahl erhalten wir ein zweidimensionales System von beugungsbegrenzt fokussierten Einzelstrahlen (Abb. 5c). In der Brennebene können Atome durch die Wirkung der Dipolkraft gespeichert werden. Durch eine erneute Abbildung der Brennebene ergeben sich weitere Möglichkeiten, um Fallensysteme flexibel bereitzustellen. So können wir durch die Abbildung einen Transfer der Fokalebene in die Vakuumkammer erzielen, ohne das mikrooptische Element selbst in die Vakuumkammer einbringen zu müssen. Somit lassen sich verschiedene optische Komponenten flexibel und in schneller Abfolge testen. Zudem ist es möglich, durch eine verkleinernde Abbildung die lateralen Abstände der Dipolfallen und die Fokusgröße der Einzelfallen weiter zu verringern oder die Lichtfelder von verschiedenen optischen Systemen in der Abbildung zu überlagern. Beide Techniken haben wir in unseren Experimenten bereits angewandt; so arbeiten wir derzeit mit Registern mit einem lateralen Abstand von 56 Mikrometern und einem Radius der Strahltaile im Fokus von unter 2 Mikrometern.

Das Ziel unserer Arbeiten ist der sukzessive Aufbau eines skalierbaren Quantenprozessors für neutrale Atome mit Qubit-Registern auf der Basis von Mikrolinsen. In einer ersten Reihe von Experimenten haben wir die prinzipielle Realisierbarkeit dieses Ansatzes nachgewiesen und bis zu 80 Registerplätze mit Atomensembles gefüllt [9].³⁾ Abb. 1 zeigt eine zweidimensionale Anordnung von Ensembles von Rubidiumatomen. Die Helligkeitsverteilung und Farbkodierung spiegeln die Atom-

zahlverteilung wider. Im Zentrum der Anordnung sind etwa 1000, am Rand etwa 100 Atome pro Registerplatz gefangen. Ausgehend von dieser Anordnung gelang es uns in weiterführenden Experimenten, die Einzeladressierbarkeit der Registerplätze, die zustandsselektive Präparation und das zustandsselektive Auslesen der Qubit-Zustände zu zeigen.

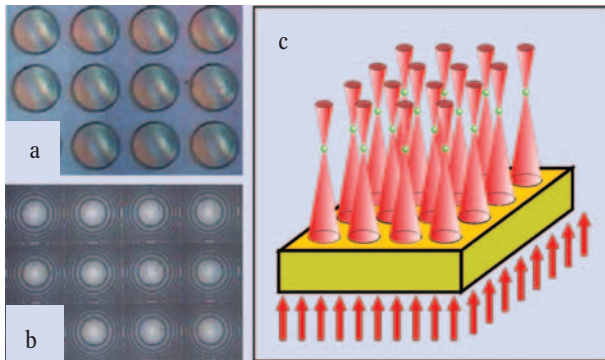


Abb. 5: Mit refraktiven (a) oder diffraktiven (b) Mikrolinsensystemen und einem nahresonanten Laserstrahl lassen sich zweidimensionale Anordnungen von Dipolfallen für neutrale Atome erzeugen (c), die als Quantenregister nutzbar sind.

Die nächste Etappe auf dem Weg zu einem Quantenprozessor ist das Ein-Qubit-Gatter, das sich in der Regel durch die extern gesteuerte kohärente Evolution der Qubit-Zustände realisieren lässt. Zum Beweis der Skalierbarkeit unseres Ansatzes führten wir diese Messungen an mehreren Atomensembles in zweidimensionalen Dipolfallenregistern gleichzeitig durch (Abb. 6). Entscheidend ist hierbei, dass das Auslesen der Qubit-Zustände am Ende der kohärenten Evolution über die ortsauflösende Detektion des Fluoreszenzlichts erfolgt, die eine gleichzeitige Analyse von vielen Registerplätzen erlaubt. In Abb. 6 ist dies exemplarisch für drei Registerplätze gezeigt.

Für die von uns gewählte Qubit-Implementierung in Hyperfein-Untersystemen steht uns ein Raman-Lasersystem zur Verfügung, das ein phasenstarr aneinander gebundenes Strahlenpaar mit variabler Differenzfrequenz in der Nähe des Frequenzabstandes der beiden Qubit-Zustände erzeugt. Durch Einstrahlen von Laserpulsen geeigneter Dauer (hier typisch $250 \mu\text{s}$) können wir eine kohärente Superposition der beiden Qubit-

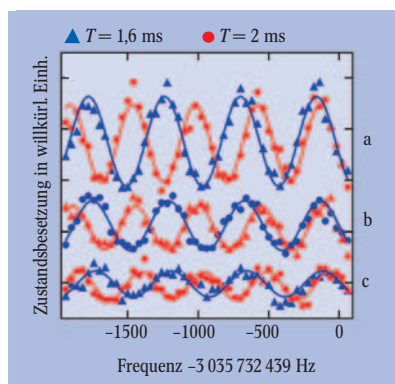
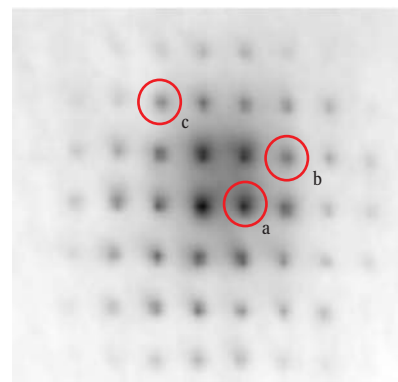


Abb. 6: Die kohärente Evolution von Qubit-Zuständen in den einzelnen Dipolfallen eines zweidimensionalen Registers lässt sich simultan beobachten. In einem parallelisierten Ramsey-Experiment misst man dafür die periodische Populationsände-



rung eines der beiden Qubit-Zustände als Funktion der Anregungsfrequenz für verschiedene Dunkelzeiten T (links), hier für drei verschiedene Atomensembles (a, b, c im rechten Teilbild) dargestellt.

Zustände initialisieren und ihre zeitliche Evolution abfragen. Die beobachteten Oszillationen als Funktion der Raman-Laser-Differenzfrequenz (Abb. 6 links) spiegeln die kohärente Evolution des Qubit-Systems und damit die prinzipielle Bereitstellung von Ein-Qubit-Gatteroperationen wider. Mit Ramsey- und Spin-Echo-Experimenten lassen sich dabei Dephasierung und Dekohärenz der Qubit-Superposition untersuchen. Ein wichtiges Ergebnis dabei ist, dass die beobachtete Kohärenzzeit von 50 ms in voller Übereinstimmung mit der inversen Photonenstreurate aus dem Fallenlaser ist. Dies bedeutet zum einen, dass bereits jetzt Kohärenzzeiten vorliegen, die um mehr als einen Faktor 100 über der typischen Zeitdauer für eine Quantengatteroperation liegen, und zum anderen, dass die Kohärenzzeit durch den Einsatz von weiter verstimmteter Laserstrahlung für die Dipolfalle weiter erhöhbar ist.

Derzeit arbeiten wir an der Implementierung von Zwei-Qubit-Gattern, denen ein Phasengatter, das auf kontrollierten kalten Stößen beruht, zugrunde liegen soll. Funktionales Kernelement ist dabei die räumliche Überlagerung von zwei Qubits aus verschiedenen Registerplätzen, etwa durch die Verschiebung der entsprechenden Dipolpotentiale. Beleuchtet man ein Linienregister mit zwei Laserstrahlen unter einem endlichen Relativwinkel (Abb. 7 links), so werden zwei ineinander verschachtelte Dipolfallen-Register erzeugt. Eine Variation des Winkels zwischen den beiden Strahlen kann den Abstand der Dipolfallen verändern. Abbildung 7 rechts zeigt atomare Ensembles in zwei Dipolfallen-Registern mit unterschiedlichen statischen Fallenabständen. Man kann erkennen, dass auf diese Weise der Übergang von räumlich getrennt auflösbaren Fallenpositionen zu einem vollständigen Überlapp der Fallen möglich ist. Vor kurzem gelang es uns, dieses Funktionselement in einem dynamischen Aufbau zu realisieren und die Position von Fallenregistern in Echtzeit zu variieren. Für einen funktionalen Prozessor müssen nun noch die zuverlässige Nachweisbarkeit einzelner Atome, die Kühlung der Atome in den Vibrationsgrundzustand der Fallenpotentiale und ein effizientes Ladeschema für großzahlige Registersysteme gewährleistet werden.

Zusätzliche Flexibilität in der Realisierung zukünftiger Generationen von Quantenprozessoren erwarten wir durch die sich kontinuierlich weiterentwickelnde Mikro- und Nanooptik. Exemplarisch soll hier lediglich der Einsatz von ortsauflösenden Lichtmodulatoren erwähnt werden. Damit lassen sich flexibel Vielfachrealisierungen von Lichtfeldern, wie z. B. Laserfoki generieren, die zudem dynamisch modifizierbar sind. Mit einer solchen Anordnung sollte es möglich sein, Atome in Dipolfallen flexibel zu verschieben, Fallen zusammenzuführen und zu trennen sowie komplexe Operationen zu implementieren. Erste Ansätze hierzu wurden von P. Grangier und anderen bereits realisiert. Einen Überblick über das hohe Potenzial, das der Einsatz von mikrooptischen Systemen für die Quanteninformationsverarbeitung bietet, findet sich in [2].

3) Weitere Informationen finden sich unter www.physik.tu-darmstadt.de/apq/

Komplementäre Ansätze

Vervollständigen möchte ich diese Darstellung mit einer kurzen Diskussion von komplementären Ansätzen zur Erzeugung von verschränkten Atompaaaren. Diesen kommt eine fundamentale Bedeutung in der Untersuchung der zugrundeliegenden quantenphysikalischen Mechanismen, wie Verschränkung und Dekohärenz, aber auch spezieller Implementierungsmöglichkeiten von Quantenprozessoren und des Austausches zwischen stationären und fliegenden Qubits

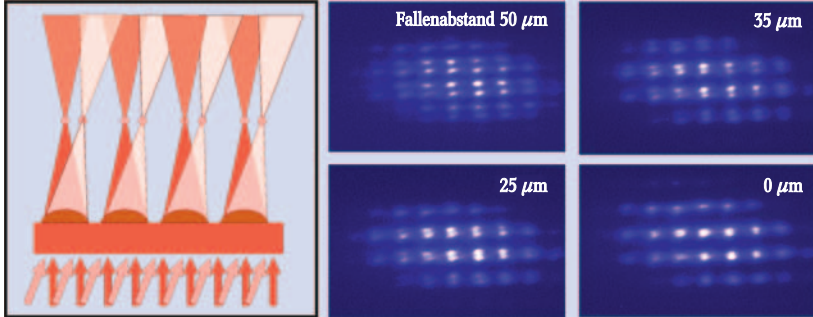


Abb. 7 Atomregister lassen sich verschieben, indem man ein Mikrolinsensystem mit zwei Laserstrahlen unter variablen Relativwinkeln beleuchtet (links). Im Experiment sind Atomensembles zu erkennen, die entweder räumlich getrennt adressiert (Mitte oben) oder zu einem vollständigem Überlapp gebracht werden (rechts unten).

zu. Allerdings ist die Frage nach der Skalierbarkeit dieser Zugänge noch nicht abschließend geklärt. Verschränkte Atompaaare lassen sich z. B. durch die Kopplung von Atomen über das Feld eines Resonators mit hoher Güte erzeugen, entsprechend sind diese Arbeiten eng mit allgemeineren Untersuchungen zur Resonator-Quantenelektrodynamik verknüpft. Wegbereiter dafür sind H. Walther (München) und S. Haroche (Paris), die durch den Einsatz von Mikrowellenresonatoren entscheidende Beiträge zum Verständnis der Resonator-Quantenelektrodynamik, aber auch der Verschränkung und der Dekohärenz von Atomen liefern konnten. J. Kimble (Pasadena) hat ähnliche Untersuchungen mit Atomen in optischen Resonatoren initiiert, welche derzeit im Kontext der Quanteninformation auch von anderen weiterverfolgt werden. Genannt seien hier die Gruppen von G. Rempe (München), L. Orosco (University of Maryland) und M. Chapman (Georgia Institute of Technology). Durch die starke Kopplung an die optische Feldmode und die entsprechend schnelle Dynamik lassen sich auf diese Weise Zwei-Qubit-Operationen mit hoher Effizienz implementieren. Komplementär zu diesen Arbeiten verfolgt T. Walther (Darmstadt) die Erzeugung von verschränkten Atompaaaren über die Dissoziation von Quecksilberdimeren. Diese Realisierung sollte zudem neue Beiträge zur Untersuchung solcher fundamentaler Fragestellungen wie dem Einstein-Podolsky-Rosen-Experiment liefern.

Ausblick

Aufgrund der Skalierbarkeit und der hohen Flexibilität möglicher Speicher- und Wechselwirkungsmechanismen bilden neutrale Atome einen vielversprechenden Ansatz für die Realisierung von Quantenprozessoren. Ein besonders attraktiver Zugang ist durch die Kombination von quantenoptischen und atomphysikalischen Systemen mit ihren weitentwickelten Manipulationsmöglichkeiten und der technologischen Basis moderner Mikro- und Nanostrukturierung gegeben, wie er in den dargestellten Ansätzen mit Atom-Chips

und optischen Mikrostrukturen erzielt wird. Hier findet gewissermaßen eine Verschmelzung des Besten aus den beiden Welten Quantenoptik und Atomphysik einerseits und Mikro- und Nanotechnologie andererseits statt. Zwei der anerkannten Wachstumstechnologien für das 21. Jahrhundert – Nanotechnologie und optische Technologie – werden hier zusammengeführt. Wir erwarten in den nächsten Jahren von diesem Zugang erhebliche Fortschritte für die Quanteninformationsverarbeitung und für unser fundamentales Verständnis der Quantenphysik.

Danksagung

Die beschriebenen eigenen Arbeiten wurden zusammen mit W. Ertmer (Uni Hannover) durchgeführt. Unsere Doktoranden und Diplomanden R. Dumke, A. Lengwenus, T. Mütter, N. Ubbelohde und M. Volk haben entscheidend zu den dargestellten Ergebnissen beigetragen. Besonderer Dank gilt unseren Theorie-Kollegen D. Bruß, K. Eckert, M. Lewenstein, J. Mompart und A. Sanpera. Finanzielle Unterstützung erhielten wir von der DFG (SFB 407, SPP Quanteninformationsverarbeitung), der Europäischen Kommission (Projekte Acquire und ACQP), der ESF (QUDEDIS), von ARDA und NIST (USA) und durch das Innovationsbudget des Landes Hessen.

Literatur

- [1] R. Folman, P. Krüger, J. Schmiedmayer, J. Denschlag und C. Henkel, *Adv. Atom. Mol. Opt. Phys.* **48**, 263 (2002) und darin zitierte Arbeiten
- [2] G. Birkel, F. B. J. Buchkremer, R. Dumke und W. Ertmer, *Optics Communications* **191**, 67 (2001); F. B. J. Buchkremer, R. Dumke, M. Volk, T. Mütter, G. Birkel und W. Ertmer, *Laser Physics* **12**, 736 (2002)
- [3] P. S. Jessen und I. H. Deutsch, *Adv. Atom. Mol. Opt. Phys.* **37**, 95 (1996); G. Grynberg und C. Robilliard, *Phys. Reports* **355**, 335 (2001)
- [4] T. Beth und G. Leuchs (Hrsg.), *Quantum Information Processing*, 2. Aufl., Wiley-VCH, Weinheim (2005)
- [5] T. Schumm et al., *Nature Physics* **1**, 57 (2005)
- [6] P. Treutlein, P. Hommelhoff, T. Steinmetz, T. W. Hänsch und J. Reichel, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 203005 (2004)
- [7] M. Greiner, O. Mandel, T. Esslinger, T. W. Hänsch und I. Bloch, *Nature* **415**, 39 (2002)
- [8] O. Mandel, M. Greiner, A. Widera, T. Rom, T. W. Hänsch und I. Bloch, *Nature* **425**, 937 (2003)
- [9] R. Dumke, M. Volk, T. Mütter, F. B. J. Buchkremer, G. Birkel und W. Ertmer, *Phys. Rev. Lett.* **89**, 097903 (2002)

Der Autor

Die Faszination, die von der Quantenphysik atomarer Systeme ausgeht, hat **Gerhard Birkel** seit seinem Studium nicht mehr losgelassen. Seine derzeitigen Forschungsgebiete umfassen Quanteninformationsverarbeitung, Bose-Einstein-Kondensation und integrierte Atomoptik. Nach Forschungsaufenthalten in den USA, Frankreich und an der Universität Hannover leitet er das Fachgebiet „Atome – Photonen – Quanten“ an der Technischen Universität Darmstadt. Zusammen mit seinen Kollegen am Institut für Angewandte Physik arbeitet er derzeit daran, dort einen Forschungsschwerpunkt „Quanteninformationsverarbeitung“ zu etablieren.

