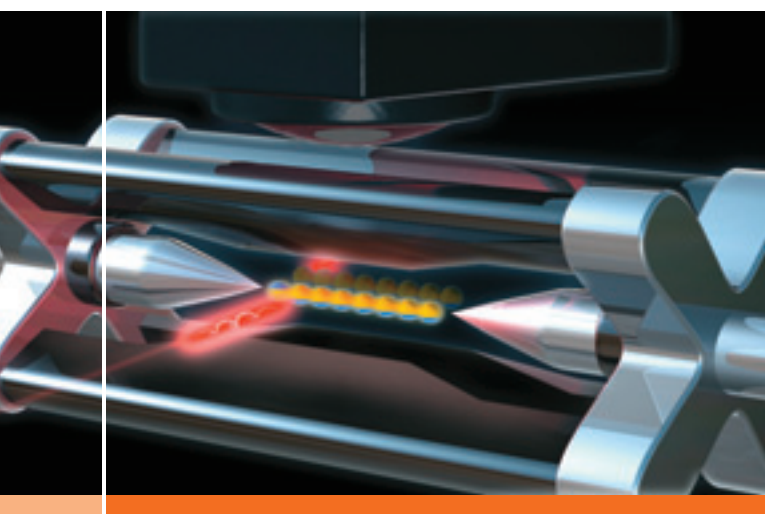


# Auf dem Weg zum Quantencomputer

## Quanten-Verschränkung mit gefangenen Ionen



Quanten-Verschränkung durchkreuzt auf einschneidende Weise alle Konzepte der klassischen Physik. Für den rasch an Bedeutung wachsenden Bereich der Quanten-Informationsverarbeitung stellt Verschränkung die wesentliche Ressource dar. Der Beitrag stellt am Beispiel des erfolgreichen Ansatzes eines Quantenprozessors mit gefangenen ultrakalten Ionen eine Reihe von Anwendungen zur Verarbeitung und zur Kommunikation von Quanteninformation vor.

### 1. Einleitung

Max Planck hat mit seinen Arbeiten aus dem Jahr 1899 die Quantentheorie begründet. Je näher die Forscher um Werner Heisenberg, Max Born, Erwin Schrödinger, Wolfgang Pauli und Niels Bohr in der Folge dieser kontrovers diskutierten neuen Theorie auf den Grund gingen, desto mehr stellte es sich heraus, dass lieb gewonnene Konzepte der klassischen Physik in der Welt der Quanten völlig versagten. So regte sich dann auch sofort vielfältiger Widerspruch gegen die neue Theorie, auch von prominenter Seite, denn Albert Einstein konnte sich mit den Vorhersagen und grundsätzlichen Eigenschaften der Quantentheorie nie anfreunden. Eine Reihe von experimentellen Tests hat inzwischen zweifelsfrei erwiesen, dass Einstein nicht Recht hatte und wir tatsächlich die Quantentheorie als vollständige und universell für die gesamte Natur gültige Beschreibung ansehen müssen, siehe Referenz [1]. Damit war eine neue Epoche angebrochen.

Seither steht im Mittelpunkt des wissenschaftlichen Interesses die Erforschung der Quanteneigenschaften, um diese für zukünftige Anwendungen nutzbar zu machen. Wie in wohl jedem neuen Forschungsfeld ist es am Anfang noch nicht klar, wo die wichtigsten Anwendungen in der Zukunft liegen werden. Zurzeit sehen wir die Hauptgebiete der Anwendung in der Übermittlung, der Speicherung und der Verarbeitung von Information. Anwendungen für hochgenaue Sensoren und für die hochgenaue Messung von Frequenzen werden ebenfalls diskutiert und untersucht. In allen diesen Fällen sind es vor allem die paradoxen Quanteneigenschaften, die völlig ungeahnte neue Möglichkeiten bieten. Es ist damit zu rechnen, dass wir in Zukunft mit unterschiedlichsten Quanten-Instrumenten zu rechnen haben, die unsere klassischen Instrumente weit in den Schatten stellen.

Träger der Quanteninformation sind einzelne Ionen, die von elektrischen Feldern im Ultra-Hochvakuum gehalten werden. Der

INFOBOX

Quantenbit, elementarer Träger von Quanteninformation

Aus unserem täglichen Leben sind Computer und der Austausch von Daten in digitaler Form nicht mehr wegzudenken. Alle Information wird dazu in Form von Bits gespeichert und verarbeitet, und jedes einzelne Bit nimmt entweder den Wert 0 oder 1 an. Im Gegensatz dazu können Quantenbits, die elementaren Träger von Quanteninformation, alle Überlagerungszustände (Superpositionen) der Quantenzustände 0 und 1 annehmen. Ganz allgemein ist der Zustand eines Quantenbits damit  $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$  mit komplexen Zahlen  $\alpha, \beta$ , sodass der Betrag beider Zahlen  $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$  ist. Bildliche Darstellung eines klassischen Bits (links) mit den Zuständen 0 oder 1, und eines Quantenbits (rechts) mit einem Überlagerungszustand aus 0 und 1. Ein Quantenbit lässt sich auf einer Kugel bildlich darstellen, z.B. findet sich der Zustand 0 am Südpol. Gemäß der Quantentheorie geht der Zustand eines Quantenbits erst bei seiner Messung in einen der klassischen Werte 0 oder 1 über. Ein Überlagerungszustand 0+1 wird in etwa 500 von 1000 Fällen als 0 und in der anderen Hälfte der Fälle als 1 ermittelt. Bei jeder einzelnen Messung ergibt sich völlig zufällig einer der beiden Werte.



Klassisches Bit und Quantenbit im Vergleich

Information ist eine physikalische Größe. Sie wird auch in physikalischen Systemen gespeichert und verarbeitet. In einem herkömmlichen Computer, wie wir ihn täglich gebrauchen, benutzt man dafür die magnetische Festplatte und Halbleiterbauelemente. In einem Rechner, der Quanteninformation verarbeiten soll, müssen die erforderlichen Speicher und Prozessoren aber weit höheren Anforderungen genügen. Einerseits sollen die Quantenbits durch eine Abfolge logischer Gatteroperationen für Algorithmen exakt kontrolliert werden, andererseits ist eine nahezu perfekte Isolation der Quantenbits gegenüber der Außenwelt nötig, da sonst ihr Zustand zerstört wird. Unter den Systemen, die für einen zukünftigen Quantenrechner untersucht werden, ist der Ionen-Quanten-Prozessor am weitesten fortgeschritten.

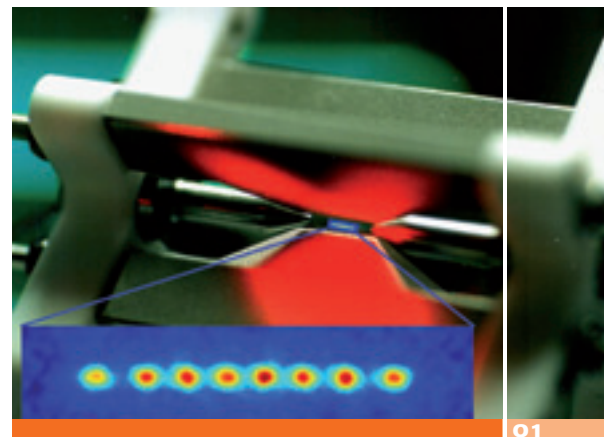
Beitrag beschreibt zunächst moderne Ionenfallen, in denen Ionen gespeichert, beobachtet und transportiert werden. Laserpulse erlauben es, den Zustand von Ionen in kontrollierter Weise zu manipulieren und damit Algorithmen zu demonstrieren. Wir beschreiben, wie verschränkte Zustände erzeugt werden und wie Verschränkung als Ressource für Teleportation genutzt wird. Schließlich skizzieren wir eine Quanten-Schnittstelle, ein Bauelement in dem Quantenbits aus den Ionen ausgelesen und direkt in Quantenbits in Form einzelner Photonen umgesetzt werden können. Dieses Bauteil ist wichtig als Zwischenverstärker in Glasfasernetzen für das Übertragen von geheimen Schlüsseln und für die Quanten-Kommunikation.

2. Ionenfalle: Aufbau und Funktion

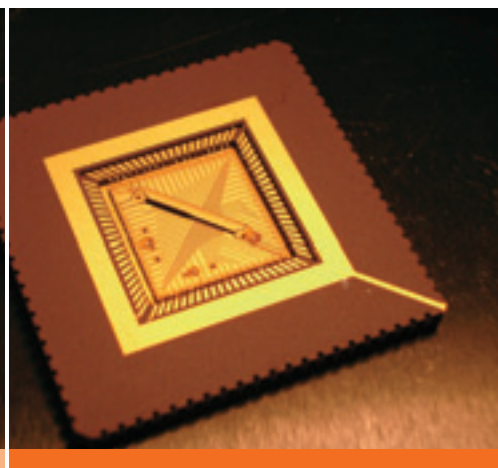
Ionen werden in einer Anordnung von Elektroden gespeichert, die auf Wolfgang Paul zurückgeht: Besonders vorteilhaft ist eine lineare Paulfalle, siehe 01, da sich hier die Ionen als Quantenbits in einer Perlschnur aufreihen. So können die einzelnen Quantenbits separat eingeschrieben, manipuliert und ausgelesen werden. Dazu wird ein Laser auf jeweils eines der Ionen fokussiert. Weit flexibler und damit auch skalierbar zu einer großen Anzahl von Quantenbits ist eine segmentierte lineare Mikrofalle, die in 02 und in einer Detailaufnahme in 03 zu sehen ist.

SUMMARY

Entanglement is one of the phenomena that make the quantum world most radically different from our classical intuition. It means of a sort of correlation that cannot be imagined, that is, represented like we usually do with physical reality around us. However, recent progress in the engineering of quantum systems has made possible to produce and to control it in a way that the founding father of quantum mechanics only considered possible in Gedanken experiments. Not only the foundations of the theory can now be probed with unprecedented accuracy, but also revolutionary applications are emerging that exploit entanglement to push forward technological capabilities beyond what was imaginable only a few years ago. A range of fields is affected, from computation to secure telecommunications as well as metrology and sensing. At the heart of these new entanglement technologies lies the ability to create and manipulate quantum correlations between single quantum objects. Among the most advanced systems for these applications are trapped ions, where entanglement has recently been achieved with very high fidelity (error smaller than one percent). The biggest challenge scientists are now facing is to scale this technology up to a high number of controlled ions. In this context a very promising approach is to use microscopic traps, up to a thousand times smaller than those already used in first generation experiments. We describe here the ongoing work in this direction, and we outline different technological applications.



Lineare Ionenfalle. Die Ionen werden durch elektrische Radiofrequenz-Felder auf der Fallenachse gehalten. Zusätzlich legt man eine Hochspannung von 1000V an die beiden Spitzen, die sich im Abstand von 5mm befinden. Die Ionen arrangieren sich dann zu einem linearen Kristall, dessen Fluoreszenz auf einer CCD Kamera beobachtet wird. Einzelne Ionen (hier sichtbar als hohe Lichtintensität kodiert in rot) positionieren sich bei Abständen von etwa 5 µm.



02

Segmentierte Mikro-Ionenfalle. Mit einer Schlitzbreite von  $500\mu\text{m}$  und  $250\mu\text{m}$  und laser-geschnittenen Elektrodensegmenten von einer Breite von  $100\mu\text{m}$  ist diese lineare Ionenfalle um etwa zwei Größenordnungen kleiner als die in 01 gezeigte konventionelle lineare Falle. Durch die große Zahl von einzelnen Elektroden, ist ein in dieser Falle realisierter Quantenprozessor skalierbar hin zu einer größeren Anzahl von Quantenbits, siehe Referenz [7].



03

Elektronenmikroskopische Detailaufnahme des Prozessorbereichs der Mikro-Falle. Die einzelnen Elektroden der Breite  $100\mu\text{m}$  werden mit Spannungen angesteuert, um Ionen in maßgeschneiderten Potentialen zu halten und zu bewegen.

### 2.1. Beobachtung einzelner Ionen

Ein großer Vorteil bei der Verwendung von einzelnen Ionen für einen Quantencomputer ist das hocheffiziente Nachweisverfahren, mit dem der Quantenzustand ausgelesen werden kann. Um die von einem einzelnen Ion abgestrahlte Fluoreszenz beobachten zu können, sind zwei physikalische Errenschaften notwendig. Einmal die Paulifalle, die ein einfach positiv geladenes Atom, ein

Ion, auf praktisch unbegrenzte Zeit speichert und andererseits die Methoden der modernen Laserspektroskopie und der Laserkühlung. Wird die Wellenlänge des Laser-Lichtes etwas rot verstimmt gegenüber der Resonanzwellenlänge des elektronischen Überganges im Ion, dann absorbiert das Ion vorzugsweise, wenn es sich in Richtung des Laser-Strahls bewegt. So überträgt man Impuls auf das Ion, sodass die Bewegung auf Temperaturen von weniger als  $1/1000\text{ K}$  gekühlt wird. Das gestreute Licht wird auf einer CCD Kamera und auf einem Photomultiplier, einem hochempfindlichen Einzelphotonenzähler, nachgewiesen (01 zeigt das gestreute Licht von acht Ionen). Innerhalb von nur  $1/1000$  Sekunde sammeln wir mit unserer Abbildungsoptik typischerweise pro Ion 50 Photonen. Man kann ohne Mühe einzelne Atome mit dem bloßen Auge sehen. Wenn das Ion bei einer gut sichtbaren Wellenlänge streut, leuchtet es heller als ein Stern am Himmel (02, 03).

Der Zustand des in einem Ion eingespeicherten Quantenbits – nach Ablauf des gewünschten Quantenalgorithmus – wird durch zustandsabhängige Fluoreszenz ausgelesen. Wird das Quantenbit in  $|1\rangle$  gemessen, beobachten wir Fluoreszenzphotonen, wird das Quantenbit durch die Messung auf den Zustand  $|0\rangle$  projiziert, beobachten wir kein gestreutes Licht. Die Zustandsmessung erreicht in  $1/1000$  Sekunde schon 99 Prozent Wahrscheinlichkeit.

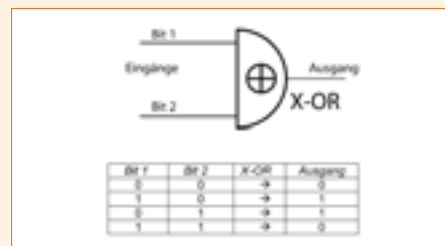
### 2.2. Manipulation einzelner Ionen in Fallen

Die Positionen und Bewegungen der Ionen in der linearen Kette (siehe Bild) sind durch Coulomb-Wechselwirkungen unter den positiv geladenen Ionen bestimmt. Die

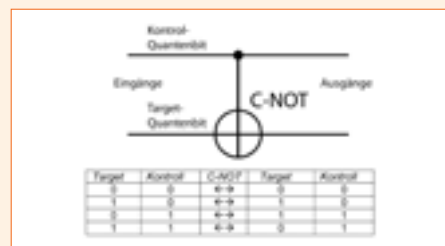
### INFOBOX

#### Klassische und quantenlogische Gatter

Klassische Rechner verwenden das X-OR Gatter, welches auch exklusives Oder genannt wird. Es entspricht einer bitweisen Addition beider Eingänge modulo 2, also immer wenn die Eingänge mit ungleichen Bits belegt sind, gibt das Gatter eine logische Eins aus, bei gleichen Eingängen eine logische Null. Eine typische Anwendung ist ein Addierer für binär kodierte Zahlen. Das quantenlogische C-NOT Gatter erweitert die Charakteristik des X-OR, denn das quantenlogische Gatter hat zwei Eingänge und ebenfalls auch zwei Ausgängen. In der Wertetabelle sieht man, dass der Zustand des ersten Quantenbits, des Kontrollbits, nach der Operation unverändert bleibt, der Wert des zweiten Eingangs, des Target-Quantenbits, der klassischen Logik des X-OR folgt. Er wird genau dann invertiert, wenn das Kontrollbit auf 1 gesetzt ist.

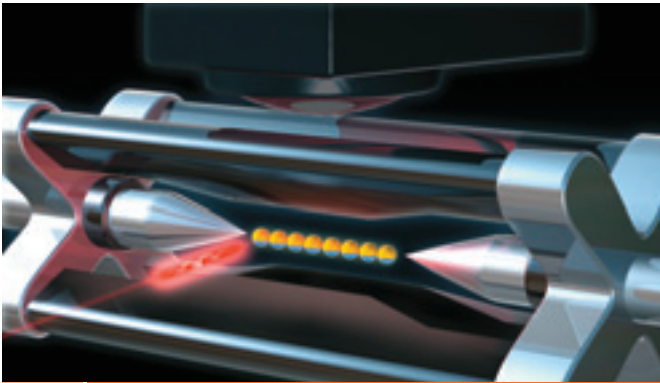


a) Klassisches Gatter und

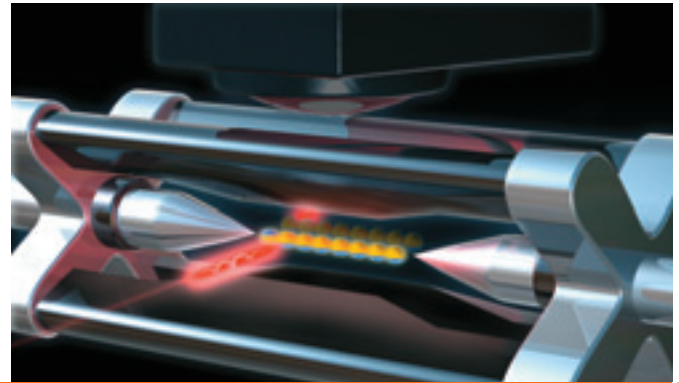


b) Quantengatter im Vergleich

Beim quantenlogischen C-NOT sieht man, dass die Operation vorwärts genauso wie rückwärts ablaufen kann. Diese Zeit-Umkehrbarkeit ist charakteristisch für Rechenprozesse in einem Quantencomputer. Der zweite wichtige Unterschied des C-NOT Quantengatters gegenüber seinem klassischen Analog X-OR ist die Möglichkeit, Superpositionszustände von Quantenbits als Kontroll- und als Target-Qubit zu verwenden. Wenn z.B. das Kontrollbit im Zustand  $1/\sqrt{2} (|0\rangle + |1\rangle)_{\text{Kontroll}}$  und das Targetbit in  $|0\rangle_{\text{Target}}$  gesetzt sind, erzeugt ein C-NOT einen Bell-Zustand  $1/\sqrt{2} (|0\rangle_{\text{Kontroll}} |0\rangle_{\text{Target}} + |1\rangle_{\text{Kontroll}} |1\rangle_{\text{Target}})$ . Zwei Quantenbits sind damit in einem verschränkten Zustand.



04 |



05

Ionen hängen dabei gleichsam wie mit Federn zusammen. Nie schwingt nur ein einzelnes Ion, sondern die Schwingungsbewegungen werden von allen Ionen geteilt (sogenannten Schwingungsmoden). Mit Laserpulsen wird einerseits der Quantenbit-Zustand jedes einzelnen Ions manipuliert, andererseits kann Impuls auf die lineare Kette übertragen werden und damit eine Schwingungsmode gezielt angeregt werden. Um verschränkte Quantenzustände zu erzeugen, werden die Ionen mit Laserpulsen angeregt, sodass es unter Beteiligung der Schwingungsmode zu einem gemeinsamen Quantenzustand kommt. Um z.B. einen Bell-Zustand  $|1_a, 1_b\rangle + |0_a, 0_b\rangle$  zu präparieren, wird zunächst das Ion a in eine Überlagerung der Quantenbit-Zustände 0 und 1 gebracht. Die Schwingungsmode befindet sich ebenfalls in einer Superposition, sodass der Zustand  $|1_a, 1_{\text{Mode}}\rangle + |0_a, 0_{\text{Mode}}\rangle$  vorliegt. Mit einem zweiten Laserpuls wird diese in der Schwingungsmode zwischengespeicherte Information auf das zweite Quantenbit umgeschrieben; nun sind beide Ionen in einem maximal quantenkorrelierten Bell-Zustand  $\Phi$ . Dieser Zustand kann als Ressource für die Teleportation eingesetzt werden.

### 3. Verschränkte Quantenzustände

Für eine größere Zahl von Ionen lassen sich Bell-Zustände zu einem Greenberger-Horne-Zeilinger (GHZ)-Zustand verallgemeinern. Dabei werden in einer Kette von Ionen alle Quantenbits in Zustand 1 überlagert mit dem Zustand, wo alle in 0 sind,  $|1_a, 1_b, \dots, 1_y, 1_z\rangle + |0_a, 0_b, \dots, 0_y, 0_z\rangle$ . Bei einer Messung dieses Zustandes beobachtet man entweder Fluoreszenz aller oder keines Ions. Beide Ergebnisse treten zufällig und mit gleicher Wahrscheinlichkeit

auf. **04** und **05** zeigen schematisch, wie ein quantenverschränkter Zustand hergestellt wird. Die Referenzen [3] und [4] erläutern die Messungen im Detail.

### 4. Teleportation

Klassische Information kann nach Belieben kopiert werden. Soll z.B. eine klassische Fax-Nachricht übermittelt werden, so legt man das Papier auf die Maschine und beim Empfänger wird ein Papier mit der identischen Nachricht bedruckt. Im Idealfall hat die Kopie genau die gleiche Qualität wie das Original. Nicht so beim Transport von Quanteninformation, der sogenannten Teleportation. Jedes Quantenbit wird bei einer Messung in seinem Zustand zerstört. Die Quanteninformation der Superposition geht über in die klassische Information Null oder Eins. Für die Übermittlung von Quantenbits wäre es daher eine falsche Strategie, die Quantenbits zu messen und diese klassische Information zu verschicken.

Jedoch gibt es einen Quanten-Algorithmus, der zum gewünschten Ziel führt – einen Quantenzustand  $|\Psi\rangle$ . Als Ressource werden maximal quantenkorrelierte Zustände, Bell-zustände  $\Phi$  an beide Partner für den Informationsaustausch, also Sender und Empfänger verteilt. Der Sender ermittelt das Ergebnis einer Bell-Messung, indem er die Quantenkorrelationen zwischen dem zu teleportierenden Quantenbit und seinem Quantenbit des Bellzu-

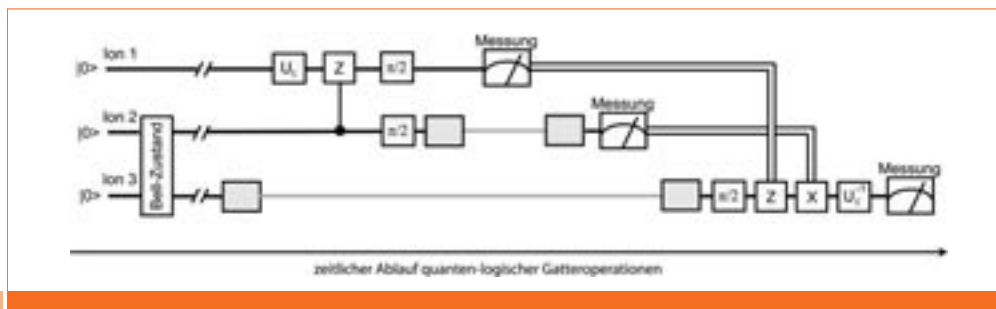
*Erzeugen eines GHZ-Zustandes. Erster Schritt: Die Ionen befinden sich in der linearen Falle als linearer Ionenkristall, hier z.B. acht Ionen. Alle Ionen sind zunächst in den Quantenbitzustand  $|0\rangle$  gebracht worden. Ein Laserpuls wird auf das erste der Ionen geschossen und regt beides, die gemeinsame Schwingungsbewegung und den Quantenbitzustand des ersten Ions an, sodass ein Superpositionszustand entsteht. Dieser Zustand ist in **05** skizziert.*

*Erzeugen eines GHZ-Zustandes. Zweiter Schritt: Ein zweiter Laserpuls trifft auf das Ion am zweiten Platz des linearen Kristalls ein und wird den in Schritt eins erzeugten Superpositionszustand weiter verarbeiten. Um einen GHZ-Zustand aus acht Ionen zu erzeugen, sind etwa zehn Laserpulse notwendig.*

#### INFOBOX

#### Quanten-Verschränkung

Quantenzustände, z.B. Quantenbits können Überlagerungszustände annehmen. Bei Systemen aus mehreren Quantenbits beobachtet man Verschränkung, die hier für ein System aus nur zwei Quantenbits a und b erklärt wird, aber ebenso verallgemeinert für Vielteilchen-Quantensysteme gilt. Mathematisch beschreibt  $\Phi = |1_a, 1_b\rangle + |0_a, 0_b\rangle$  einen verschränkten Quantenzustand, bei dem eine Messung an dem Teilchen a den Zustand auf eine der beiden Anteile der Wellenfunktion reduziert. Damit tauchen die Resultate  $0_a$  und  $1_a$  gleich häufig und völlig zufällig auf. Jedes Messergebnis am Sub-System a ist mit einem Ergebnis an b korreliert, denn immer wenn hier ein Ergebnis 1 vorliegt wird dort auch 1 gemessen. Die Eigenschaften der Sub-Systeme sind damit völlig unbestimmt, die des Gesamt-Systems dagegen vollständig bestimmt.



06

Quantenschaltkreis für eine Teleportation: Gesendet wird das Quantenbit, welches auf Ion 1 gespeichert ist. Ein Bellzustand wird als Ressource verwendet, der vorher in den Ionen 2 und 3 eingeschrieben wurde. Der Sender führt eine Bellmessung an seinen Quantenbits 1 und 2 durch und schickt klassische Information an den Empfänger. Der rotiert das dritte Ion und erhält den originalen Quantenzustand, was durch eine abschließende Messung an Ion 3 nachgewiesen wird.

stands feststellt. Diese Messung erzeugt zwei Bit klassische Information, d.h. 00, 01, 10 oder 11. Dieses Bitmuster sendet er zum Empfänger, der nun an seinem Quantenbit des Bellzustands eine Rotation durchführt, die davon abhängt, welches Bitmuster er empfangen hat. Nun erhält er  $|\Psi\rangle$ , die Teleportation hat stattgefunden. Interessant ist es zu sehen, dass der Sender tatsächlich keine Information über den Quantenzustand  $|\Psi\rangle$  behält, der Zustand wurde ja gemäß den Gesetzen der Quantentheorie nicht kopiert, sondern unzerstört teleportiert. 06 zeigt den zeitlichen Ablauf der Einzelschritte, im Experiment müssen dazu etwa 40

äußerst genaue Laserpulse auf die drei Ionen geschossen werden, wobei z.B. die Frequenz des Laserlichtes um nicht mehr als einen fast unvorstellbar kleinen Bruchteil von  $10^{-12}$  schwanken darf, damit die Teleportation gelingt. Details der Teleportation sind in Referenz [5] dargestellt.

## 5. Quanten-Atomuhren und Quantensensoren

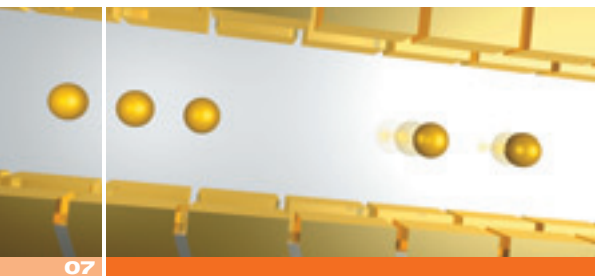
Quanten-korrelierte Zustände mehrerer Quantenbits ergeben bei einer Messung korrelierte Ergebnisse. Damit ist das Messrauschen geringer als bei einer klassischen Messung an unkorrelierten Teilchen. Die modernen Atomuhren, die zurzeit verwendet werden, erreichen die fast unvorstellbare Ganggenauigkeit von etwa  $10^{-16}$ . Über das Alter des Universums wäre eine solche Uhr weniger als eine Sekunde falsch gegangen. Um hier noch höhere Genauigkeit zu erreichen, werden quanten-korrelierte Zustände eingesetzt, mit denen man die systematischen Fehler und Rauschquellen unterdrücken kann. Auch andere hochgenaue Quanten-Sensoren, z.B. für magne-

tische Felder, elektrische Ströme und mechanische Vibrationen sind möglich und können eine Vielzahl von Anwendungen hervorbringen. Die prominenteste Anwendung, die jedoch auch mit den größten Schwierigkeiten bei der Realisierung verbunden ist, stellt der Quantencomputer da.

## 6. Auf dem Weg zu einem skalierbaren Quantencomputer

Während Systeme aus wenigen Quantenbits in Laborexperimenten schon für rudimentäre Algorithmen eingesetzt worden sind, wie etwa die experimentelle Realisierung der Teleportation mit drei gefangenen Ionen, stellen sich für einen zukünftigen Quantencomputer zwei Probleme: Einmal sind die quantenlogischen Operationen noch nicht perfekt genug, da selbst durch kleine einzelne Fehler nach einer Reihe von Rechenoperationen das Endergebnis fehlerhaft wird. Dies ist keineswegs ein grundsätzliches Problem, denn schon heute können Rechenoperationen mit einer Treue von über 99 Prozent durchgeführt werden, siehe Referenz [6]. Der technische Fortschritt ist hier schnell, vieles lässt sich weiter optimieren. Das Ziel wird es sein, eine Genauigkeit von 99.99 Prozent zu erreichen, denn bei dieser Qualität kann man die restlichen Fehler aktiv korrigieren, d.h. die Fehler detektieren und dann die entsprechenden Quantenbits wieder in ihren richtigen Zustand versetzen. In jedem klassischen Computer laufen ständig ähnliche Prozesse. Der zweite entscheidende Durchbruch wird sein, wenn es gelingt, einen skalierbaren Quantenprozessor zu realisieren. Denn es sind je nach Aufgabe und Algorithmus zwischen 40 und 1.000 Quantenbits nötig – aktuelle Experimente arbeiten noch mit weniger als 10 Quantenbits.

Um einen skalierbaren Prozessor mit Ionen zu untersuchen, haben wir eine segmentierte Mikro-Ionenfalle gebaut, in der Ionen und damit die in ihnen gespeicherte Quanteninformation bewegt werden kann, siehe Referenz [7]. So wird es mit einer solchen segmentierten Falle möglich, Operationen immer nur an einer kleinen – daher beherrschbaren – Zahl von Ionen durchzuführen. Verschränkte Zustände



07

Schema für einen skalierbaren Quantencomputer basierend auf einer segmentierten Mikrofalle: Ionen, in diesem Fall zwei der fünf Ionen, werden jeweils für die nächste quantenlogische Operation transportiert, wo Laser die Information einschreiben, verarbeiten und schließlich auslesen. Wichtig ist es, die elektrischen Spannungen an den einzelnen Fallensegmenten für einen schnellen und kontrollierten Transport der Ionen perfekt maßzuschneidern.

werden dann zu Speicherregionen transportiert und neue Quantenbits, ähnlich wie bei einem Abakus, für die nächsten quantenlogischen Operationen in die Prozessorregion geschoben. **07** und **08** zeigen den schematischen Ablauf.

## 7. Quanten-Schnittstellen und Quantenkorrelationen über weite Distanzen

Das wohl wichtigste Anwendungsgebiet für Quanten-Informationsverarbeitung ist eine durch die Prinzipien der Physik gewährleistete abhörsichere Kommunikation. Wie am Beispiel der Teleportation dargestellt, kann man Quantenbits nicht kopieren, daher fällt jeder Abhörversuch sofort auf und gewährleistet damit die in vielen Anwendungen gewünschte Sicherheit. Quantenkanäle über eine Entfernung von etwa 100 Kilometer sind auch schon mit Photonen, die über konventionelle Glasfasernetze geschickt wurden, realisiert worden und erste Firmengründungen vermarkten diese Anwendung. Das entscheidende Problem ist die begrenzte Reichweite von maximal 100 Kilometern, die viele Anwendungen ausschließt. Der Grund dafür liegt darin, dass durch die restliche Absorption in Glasfasern das Signal einzelner Photonen „nachverstärkt“ werden müsste. Dieser Verstärker darf jedoch kein klassischer Verstärker sein, sondern er muss Quanteninformation verarbeiten können. In der einfachsten Version bestünde solch ein Bauteil aus drei Ionen, die durch Laserpulse kontrolliert werden. Zwei mikro-optische Faserresonatoren erlauben es, das in einem Ion gespeicherte Quantenbit in ein einzelnes Photon „umzuschreiben“ und über die angeschlossene Glasfaser zum Empfänger zu transportieren, **09**. Selbst wenn diese Operationen nicht in 100 Prozent der Fälle erfolgreich sind, funktioniert das Schema trotzdem, denn die Messung an einem dritten Ion verrät, ob ein Fehler unterlaufen ist und daher der Schritt wiederholt werden muss. In dieser Weise können quantenkorrelierte Zustände auch über weite Distanzen erzeugt werden und eine Ressource für Kommunikationsprotokolle darstellen. Für die Realisierung eines solchen Quanten-Netzwerkes sind die technologischen Hürden geringer als für den Quantencomputer, da nur eine vergleichsweise geringe Zahl von Quantenbits beherrscht werden muss.

## 8. Ausblick

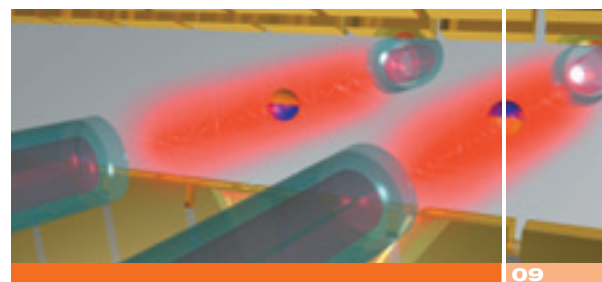
Quantenkorrelationen können an kleinen Systemen erzeugt und beobachtet werden. Bei diesen aus mehreren Einzelobjekten zusammengesetzten Quantensystemen sind die Eigenschaften der Subsysteme unbestimmt, während die des Gesamtsystems vollständig bestimmt sind. Die sehr spezifischen Eigenschaften solcher nichtklassischen Zustände sind nicht nur für zukünftige Anwendungen entscheidend, sondern auch für den Grundlagenforscher von fundamentalem Interesse. • F. Schmidt-Kaler, T. Calarco

## Literatur

- 1: Eine schöne, allgemeinverständliche Darstellung der Gedankenwelt der Quantenphysik findet sich in „Einsteins Schleier – die neue Welt der Quantenphysik“, A. Zeilinger, C.H. Beck Verlag (2003).
- 2: „Quanteninformationsverarbeitung: Segmentierte Mikrochip-Falle für kalte Ionen“, S. Schulz, F. Schmidt-Kaler, Physik in unserer Zeit, Vol. 38, Issue 4, 162 (2007).
- 3: „Tomography of entangled massive particles“, C.F. Roos, G.P.T. Lancaster, M. Riebe, H. Häffner, W. Hänsel, S. Gulde, C. Becher, J. Eschner, F. Schmidt-Kaler, R. Blatt, Phys. Rev. Lett. 92, 220402 (2004).
- 4: „Control and Measurement of Three-Qubit Entangled States“, C. Roos, M. Riebe, H. Häffner, W. Hänsel, J. Benhelm, G. Lancaster, C. Becher, F. Schmidt-Kaler, R. Blatt, Science 304, 1478 (2004).
- 5: „Deterministic quantum teleportation with atoms“, M. Riebe, H. Häffner, C. F. Roos, W. Hänsel, J. Benhelm, G. P. T. Lancaster, T. W. Körber, C. Becher, F. Schmidt-Kaler, D. F. V. James, R. Blatt, Nature 429, 734 (2004).
- 6: „Towards fault-tolerant quantum computing with trapped ions“, J. Benhelm, G. Kirchmair, C. F. Roos, R. Blatt, Nature Physics 4, 463 (2008).
- 7: „Sideband cooling and coherent dynamics in a microchip multi-segmented ion trap“, S. Schulz, U. Poschinger, F. Ziesel and F. Schmidt-Kaler, New Journal of Physics 10, 045007 (2008).



Die zwei Ionen befinden sich in der Prozessor-Region, wo sie mit Laserlichtfeldern wechselwirken und durch eine Abfolge von Laserpulsen ein verschränkter Bell-Zustand erzeugt wird. Später können weitere Ionen aus der Speicherregion (links) in die Wechselwirkungsregion weiterbefördert werden.



Quanten-Schnittstelle, aufgebaut mit zwei Ionen und zwei faser-optischen Mikroresonatoren. Im ersten Schritt werden quantenkorrelierte Zustände, wie z.B. Bell-Zustände, mit Hilfe von Laserpulsen erzeugt. Zwei Ionen werden in die optischen Mikroresonatoren geschoben um die Quantenbits in Photonen über die Glasfasern zu transportieren. Verschränkte Photonen können so an die Partner der Quantenkommunikation verteilt werden.

## DIE AUTOREN



## FERDINAND SCHMIDT-KALER

(l.) studierte an den Universitäten Bochum, Bonn und München und schloss mit dem Diplom in Physik an der TU München ab. In seiner Doktorarbeit bei T. W. Hänsch am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching beschäftigte er sich mit Präzisionsspektroskopie an Wasserstoff. Nach einer Post-Doc Zeit bei S. Haroche an der Ecole Normale Supérieure in Paris wurde er Assistent bei R. Blatt im Institut für Experimentalphysik Innsbruck und forschte dort an ultrakalten gespeicherten Ionen für einen Quantenprozessor. Seit 2004 ist er Leiter des Instituts für Quanten-Informationsverarbeitung an der Universität Ulm. Er erhielt den Helmholtz-Preis der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig, den Rudolf-Kaiser Preis, und ist seit 2008 stellvertretender Vorsitzender der Fachgruppe Quantenoptik und Photonik der DPG.

## TOMMASO CALARCO

hat in Padua und Ferrara studiert und mit einer Dissertation über Modelle der Quantenchromodynamik promoviert. Danach arbeitete er bei P. Zoller in Innsbruck innerhalb der Quanteninformationsverarbeitung, insbesondere zur Theorie einer physikalischen Implementierung von skalierbaren Quantenprozessoren. Nach Anstellungen als Post-Doc an der Universität Innsbruck, dem ECT in Trient und dem NIST in Gaithersburg, USA, wurde er 2004 Senior Researcher beim BEC-Zentrum in Trient und war 2005 bis 2007 Visiting Scholar an der Universität Harvard. Seit 2007 gehört er zum Institut für Quanten-Informationsverarbeitung der Universität Ulm. Er war zweimal Marie-Curie Fellow der Europäischen Kommission sowie einmal Fulbright Fellow des US Department of State. 2002 erhielt er den Wallnöfer Preis der Tiroler Industriellenvereinigung.

**Kontakt**

Institut für Quanten-Informationsverarbeitung, Universität Ulm  
Albert-Einstein-Allee 11, 89069 Ulm, Tel.: 0731/50-22830, Fax: 0731/50-22839  
E-Mail: [nawi.qiv@uni-ulm.de](mailto:nawi.qiv@uni-ulm.de), Internet: [www.quantenbit.de](http://www.quantenbit.de)