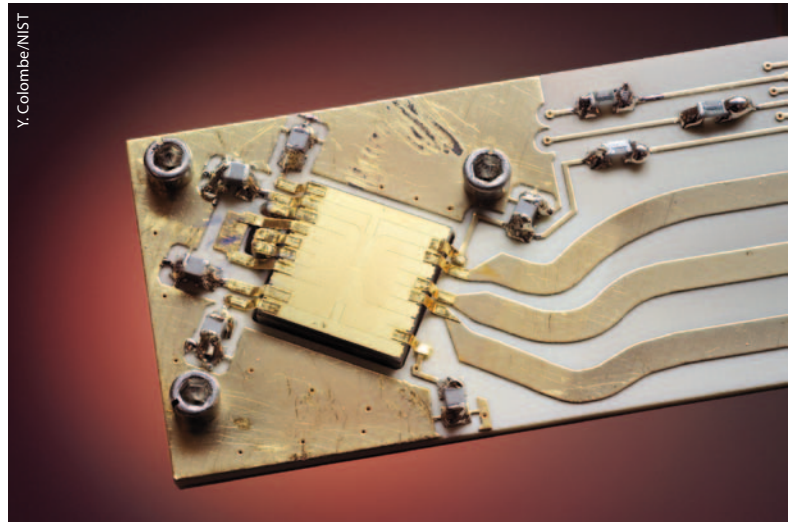


## ■ Mit Mikrowellen rechnen

In Fallen gespeicherte Ionen lassen sich statt mit Laserlicht auch mit Mikrowellen manipulieren. Dies verspricht große Vorteile für die Quanteninformationsverarbeitung.

Längst sind die kontraintuitiven Phänomene der Quantenphysik wie die Tatsache, dass sich ein einzelnes Atom an zwei Orten gleichzeitig befinden kann, keine theoretische Kuriosität mehr. Vielmehr bilden sie die Grundlage für ein junges angewandtes Gebiet der Quantenphysik, das sich in den vergangenen zehn Jahren besonders dynamisch entwickelt hat und das Computing revolutionieren könnte. Obwohl mit unterschiedlichsten physikalischen Systemen versucht wird, diese Quanteninformationsverarbeitung zu realisieren, haben sich in Fallen gespeicherte Ionen bislang zweifellos als der erfolgreichste Weg erwiesen. Kürzlich haben zwei Arbeitsgruppen hierfür einen neuen Ansatz präsentiert, der das enorme Potenzial für große Quantencomputer unterstreicht. Die Idee besteht darin, Quantengatter mithilfe von Mikrowellen anstelle des bislang verwendeten Laserlichts zu realisieren. Dazu ist jedoch auch ein Magnetfeld notwendig – entweder nutzt man das oszillierende Magnetfeld der Mikrowellenstrahlung selbst oder ein äußeres statisches Feld. Eine Arbeitsgruppe am NIST in Boulder (USA) hat erfolgreich ein Quantengatter mittels der ersten Methode erzeugt [1]. Zeitgleich ist es Physikern der Universitäten Siegen und Ulm gelungen zu zeigen, wie man Quantengatter, die mithilfe eines statischen äußeren Feldes implementiert werden würden, sehr robust gegen Störungen schützen kann [2].

Quantengatter, das Analogon der klassischen logischen Gatter, sind notwendig, um Rechenoperationen mit einem Quantenprozessor durchzuführen. Ihre Funktion beruht auf der Verschränkung, das heißt auf den nicht intuitiven Korrelationen zwischen den Eigenschaften verschiedener Systeme. So resultiert normalerweise aus der Messung einer spezifischen Eigenschaft eines Ions ein vollständig



Im NIST-Experiment schweben zwei Ionen über der Mitte der quadratischen Gold-Ionenfalle, deren Seiten 7,4 mm lang sind. Die Wissenschaftler manipu-

zufälliges Ergebnis. Misst man aber die gleiche Eigenschaft bei mehreren miteinander verschränkten Ionen, so sind die Ergebnisse korreliert. Bei unverschränkten Ionen tauchen solche Korrelationen nicht auf. Äußere Störungen können die Verschränkung zerstören – sie führen zur Dekohärenz – und beeinträchtigen die Funktion eines Quantenprozessors.

In den vergangenen Jahren gab es bahnbrechende Fortschritte bei der Quanteninformationsverarbeitung mit gespeicherten Ionen [3]. So ist es gelungen, 14 Ionen zu verschränken [4] und verschiedene Quantenalgorithmen sowie Teleportation zu realisieren [5]. Das Quantenbit wird normalerweise in den Hyperfein- oder Feinzustand des Ions kodiert. Über die kollektiven Bewegungszustände von mehreren Ionen im Fallenpotential lassen sich die Quantenbits koppeln und somit Quantengatter implementieren. Bei den entsprechenden Experimenten dienten Laserstrahlen dazu, die Verschränkungsoperationen auszuführen.

Im Jahr 2001 hatten Mintert und Wunderlich die visionäre Idee, anstelle von Lasern Mikrowellen zu verwenden [6]. Denn bei Lasern

lieren und verschränken die Ionen mittels Mikrowellen, die über Drähte von den drei Elektroden rechts in die Falle eingespeist werden.

ist es erforderlich, sie sorgfältig auszurichten, damit sie mit den Ionen interagieren. Dagegen lassen sich Mikrowellen über Wellenleiter einspeisen. Diese kann man auf dem Chip integrieren, der auch die Ionenfalle enthält [7]. Darüber hinaus sind sehr stabile Mikrowellengeneratoren, die viel einfacher und billiger sind als derzeit übliche Lasersysteme, leicht verfügbar. Der Ansatz mit Mikrowellen könnte es insbesondere ermöglichen, einen Quantencomputer auf Millionen von Quantenbits mit entsprechend vielen Ionen zu skalieren, während der technische Aufwand enorm wäre, die notwendige Zahl von Laserstrahlen zu erzeugen. Auch beim Mikrowellenansatz wird das Quantenbit in Hyperfeinzuständen gespeichert. Quantengatter entstehen wiederum unter Ausnutzung des gemeinsamen Bewegungszustands von mehreren Ionen. Während der Impuls von Laserphotonen groß genug ist, solche Bewegungszustände anzuregen, reicht er bei Mikrowellen nicht aus. Daher muss man die Kraft nutzen, die Atome in gewissen Zuständen in dem Gradienten eines Magnetfeldes erfahren. Bei der Lasermethode werden oft Raman-Übergänge benutzt, die

einen Umweg über einen virtuellen dritten Zustand mit einbeziehen. Mit Mikrowellen lassen sich die beiden Quantenbitzustände hingegen direkt koppeln.

Der ursprüngliche Vorschlag von Mintert und Wunderlich benötigt neben den Mikrowellen auch statische Magnetfelder. Mithilfe dieses Ansatzes haben Timoney et al. einzelne Ionen gefangen und diese mehreren Mikrowellenpulsen ausgesetzt. Damit gelang es ihnen, das Ion in einen Zustand zu bringen, in dem es von äußeren Störungen entkoppelt und somit effizient vor Dekohärenz geschützt ist. Dazu kodierten sie das Quantenbit in „dressed states“ anstatt der normalerweise benutzten Hyperfeinzustände. Solche „dressed states“ entstehen durch die kohärente Manipulation von Hyperfeinzuständen und sind Überlagerungen von Hyperfein- und Mikrowellenphotonenzuständen. Diese Entwicklung verspricht robuste Quantengatter mit Mikrowellen und statischen Magnetfeldern.

Das nun am NIST realisierte Quantengatter von Ospelkaus et al. beruht dagegen darauf, die oszillierenden Magnetfelder zu verwenden, die ohnehin mit der Mikrowellenstrahlung einher gehen [8]. Dazu haben die Wissenschaftler

einen Wellenleiter in den Mikrochip integriert, der die Elektroden für die Falle enthält. Diese Elektroden erzeugen elektrische Felder, die zwei Ionen über der Oberfläche des Chips festhalten. Über den Wellenleiter wirken dann mehrfach Mikrowellenpulse auf die Ionen, um diese zu verschränken und das Quantengatter auszuführen.

Die beiden Gruppen haben einige schwierige Aufgaben bewältigt, um diese Ergebnisse zu erzielen: So musste die NIST-Gruppe z. B. hohe oszillierende Magnetfeldgradienten erzeugen und die Ionen sehr nahe an der Chipoberfläche fangen. Die nächste Herausforderung auf diesem Gebiet ist es, die Fehlerraten der Quantengatter zu reduzieren. Die beiden Gruppen haben gezeigt, dass beide Methoden (mit und ohne statische magnetische Felder) vielversprechend sind. Welche davon am erfolgreichsten sein wird, lässt sich heute noch nicht abschätzen und hängt unter Umständen auch von der Wahl des Ions ab (Ytterbium, Calcium und Beryllium sind oft benutzte Elemente). Die beiden Forschungsergebnisse unterstreichen auf jeden Fall ganz deutlich, dass Mikrowellen-Quantengatter mit niedrigen Fehlerraten in greifbare Nähe gerückt sind.

Die neuen Ergebnisse sind ein Meilenstein auf dem Weg zu skalierbaren Quantencomputern mit gespeicherten Ionen. Sie zeigen, dass sich neben Laserstrahlen auch Mikrowellen dazu eignen, Quantengatter zu realisieren. Diese Errungenschaft lässt hoffen, dass Ionenfallen in naher Zukunft große Quantencomputer ermöglichen können. Das Quantencomputing wird voraussichtlich viele Wissensschaftsgebiete revolutionieren – wir haben erst damit begonnen, unser wahres Potenzial bewusst zu machen.

Winfried K. Hensinger

Dr. Winfried Hensinger, Department of Physics and Astronomy, University of Sussex, Falmer, Brighton, East Sussex, BN1 9QM, Großbritannien

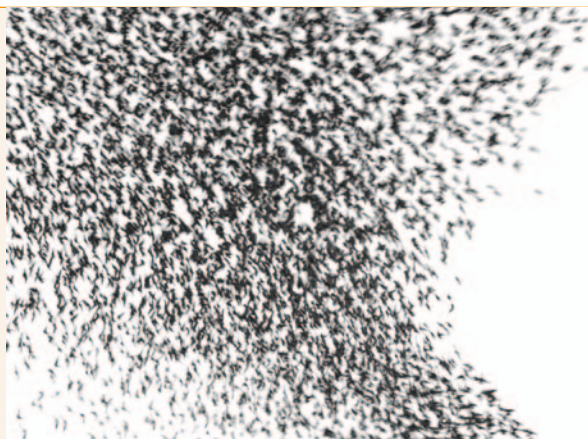
- [1] C. Ospelkaus et al., *Nature* **476**, 181 (2011)
- [2] N. Timoney et al., *Nature* **476**, 185 (2011)
- [3] J. I. Cirac und P. Zoller, *Phys. Rev. Lett.* **74**, 4091 (1995); D. J. Wineland et al., *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.* **103**, 259 (1998); H. Häffner, C. F. Roos und R. Blatt, *R. Phys. Rep.* **469**, 155 (2008)
- [4] T. Monz et al., *Phys. Rev. Lett.* **106**, 130506 (2011)
- [5] D. Leibfried et al., *Nature* **422**, 412 (2003); F. Schmidt-Kaler et al., *Nature* **422**, 408 (2003)
- [6] F. Mintert und C. Wunderlich, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 257904 (2001)
- [7] M. D. Hughes, B. Lekitsch, J. A. Broersma und W. K. Hensinger, *Contemp. Phys.* <http://dx.doi.org/10.1080/00107514.2011.601918>; preprint available at arXiv:1101.3207v2 [quant-ph] (2011)
- [8] C. Ospelkaus et al., *Phys. Rev. Lett.* **101**, 090502 (2008)

## FLUCHT SCHLÄGT WELLEN

Zu den beeindruckendsten Beispielen für kollektives Verhalten im Tierreich gehören Schwärme von Insekten, Fischen oder Vögeln. Beobachtungen zeigen, dass sich auch Wellen in solchen Schwärmen bilden können, insbesondere wenn sie von Beutetieren angegriffen werden.

Nun ist es einem italienisch-niederländischen Team aus Biologen und Physikern erstmals gelungen, diesen Zusammenhang auch quantitativ nachzuweisen. Dafür analysierten sie hochaufgelöste Filmaufnahmen von Staren Schwärmen, die von Falken angegriffen wurden. Als Wellenereignis definierten die Forscher aufeinanderfolgende Dichteschwankungen, die sich innerhalb des Schwarms in eine bestimmte Richtung ausbreiten und denen für mindestens zehn Sekunden kein weiterer Wellenzug folgte.

Dabei zeigte sich, dass die angreifenden Falken deutlich häufiger leer



Manuel Presti

Ein Schwarm von Staren flieht vor einem angreifenden Falken.

ausgingen, wenn im Schwarm Wellen entstanden (86 Prozent im Vergleich zu 70 Prozent ohne Wellen). Die Wellen bewegten sich dabei immer vom Angreifer weg und erreichten Geschwindigkeiten von bis zu 25 m/s, schneller als der Schwarm selbst. Die Wellen-

geschwindigkeit, so vermuten die Forscher, hängt davon ab, wie stark die einzelnen Stare im Flug durch ihre Nachbarn im Schwarm eingeschränkt sind. (AP) *A. Procaccini et al., Animal Behaviour*, **82**, 759 (2011)