

■ Jonglieren mit Atomen

Mit einzelnen Photonen lässt sich die Bahn eines Atoms beobachten und mittels der Lichtkraft eines Laserstrahls für einige Millisekunden speichern.

Für jeden Jongleur ist es entscheidend, die Bälle immer genau im Auge zu behalten und die Bewegung der Hände flink zu steuern. Ein solches Experiment – jedoch mit einem einzelnen Atom – hat die Arbeitsgruppe von Gerhard Rempe kürzlich vorgestellt [1]. Die Forscher demonstrierten, wie sie die Bewegung einzelner Atome ständig beobachten und reaktionsschnell auf jede Auslenkung mit einer angepassten Rückstellkraft reagieren können. Mit Atomen ist dieses Jonglier-Experiment ungleich schwieriger als für einen Straßenkünstler, der mit Bällen hantiert. So gilt es zunächst, ein einzelnes Atom zu beobachten und seine Position auf einige Mikrometer genau zu bestimmen. Schließlich muss man sehr genau und schnell auf jede Bewegung des Atoms reagieren, da es sich meist mit hohen Geschwindigkeiten bewegt. Diese Probleme haben die Forscher gelöst, indem sie bekannte Techniken der Quantenoptik [2, 3] verbesserten und in einem Experiment zusammenführten.

Atome lassen sich mithilfe der Streuung von Photonen beobachten: Ein Atom wird in einen angeregten Zustand versetzt, der nach wenigen Nanosekunden unter Emission eines Photons zerfällt. Das Problem ist aber, dass sich ein spon-

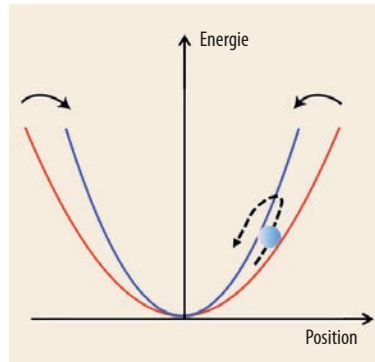


Abb. 1 Um das Atom am Entkommen zu hindern, wird das Lichtpotential von niedrigeren Werten (rot) zu höheren (blau) verändert. So stößt die Lichtkraft das entkommende Atom wieder zurück.

tan ausgesendetes Photon in eine völlig zufällige Richtung bewegt und es daher sehr schwierig ist, das Licht aufzusammeln – die meisten Photonen würden nicht registriert. Hier kommt der erste Trick zur Anwendung: Die Wissenschaftler verwenden einen optischen Resonator mit zwei höchstreflektierenden Spiegeln, in dem sich das Atom befindet. Sie schicken Licht auf den Einkoppelspiegel – nicht auf das Atom – und beobachten hinter dem Auskoppelspiegel die Transmission. Diese ist hoch, wenn die optische Länge des Resonators ein ganzzahliges Vielfaches der verwendeten Wellenlänge beträgt. Wenn sich jedoch ein Atom im Resonator befindet, wirkt es wie eine

kleine Glaskugel. Es verändert die optische Länge des Resonators, sodass die Transmission auf null sinkt. Der Lichtstrahl für diesen Transmissionstest lässt sich problemlos auf einen hochempfindlichen Detektor fokussieren. Bei geschickter Wahl der Parameter heizen sich die Atome bei diesem Nachweis nicht auf, wie es bei der spontanen Streuung von Photonen an einem Atom unvermeidlich wäre.

In ihrem Experiment messen die Forscher das Transmissionssignal Photon für Photon und erkennen so schon nach wenigen Mikrosekunden, ob das Atom aus dem Lichtfeld heraus fliegen will. Im Resonator bildet sich eine stehende Welle mit einer Strahltaile von $29\ \mu\text{m}$. Entweicht das Atom radial aus dieser Strahltaile, sinkt seine Kopplung mit dem Resonator und dadurch auch seine Fähigkeit, die Transmission effektiv zu blockieren. Immer wenn das Transmissionssignal von einem niedrigen Wert ansteigt, ist somit eine schnelle Reaktion gefragt.

An dieser Stelle kommt ein zweiter Trick ins Spiel, der die Lichtkraft auf Atome ausnutzt (Abb. 1). Liegt die Frequenz des Lichtstrahls oberhalb der atomaren Resonanzfrequenz, werden die Atome aus Bereichen hoher Intensität herausgedrückt. Die Forscher nutzen einen Hohlstrahl, in dessen Mitte die Intensität null ist. Zum Rand hin steigt sie an. Schalten sie den Laser auf die hohe Leistung von $0,8\ \mu\text{W}$, können sie das Atom über längere Zeit speichern (Abb. 2a).

Wenn sich das Atom nicht perfekt in der Mitte befindet, können innerhalb von $10\ \mu\text{s}$ etwa drei Photonen den Resonator verlassen. Dieses geringe Transmissionssignal muss den Forschern reichen, um rechtzeitig zu reagieren. Denn in $180\ \mu\text{s}$ kann das Atom einmal quer durch den Strahldurchmesser des Lichts im Resonator oszillieren. Auch die Elektronik muss das Schaltsignal sehr schnell und ohne

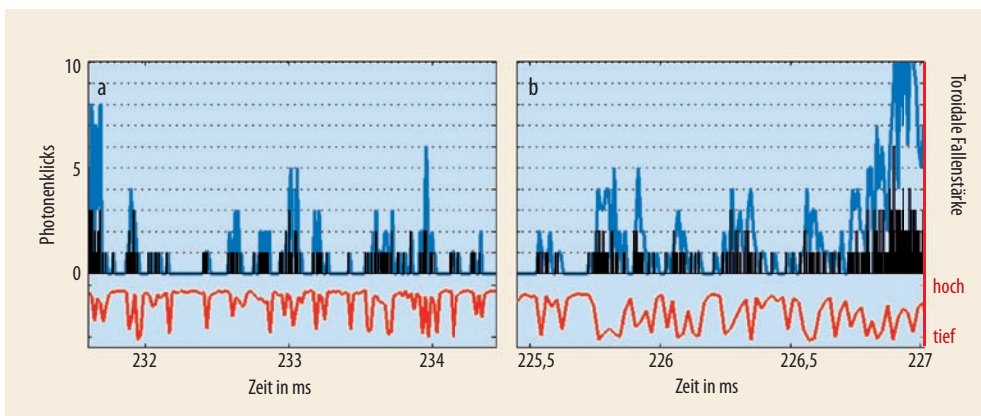


Abb. 2 Die Photonenklicks (schwarz) werden über eine Zeit von $10\ \mu\text{s}$ detektiert (blau) und sind ein Maß für die Transmission. Wird das Potential immer hochgeschaltet (rote Kurve), wenn ein Atom ent-

kommen will, bleibt die Transmission gering (a). Umgekehrt können die Lichtkräfte das Atom auch aus dem Resonator heraustreiben. Dann steigt das Transmissionssignal (b).

zusätzliche Verzögerungen weitergeben. Das Team am Max-Planck-Institut für Quantenoptik hat diese Verzögerung auf $3 \mu\text{s}$ drücken können. So schnell geregelt, lässt sich das Atom innerhalb von einem Viertel einer Schwingungsperiode in seiner Bewegung einschränken, also kühlen. Die Speicherzeit des Atoms vervierfacht sich durch diese Tricks. Senken die Forscher dagegen das Potential, wenn sich das Atom aus der Mitte entfernt, verlieren sie es schnell. Die Transmission des optischen Resonators steigt an (Abb. 2b). Schließlich stoßen die Lichtkräfte das Atom aus dem Beobachtungsvolumen heraus.

Eine Reihe künftiger Anwendungen ergibt sich aus diesem erfolgreichen Experiment: So ist zu erwarten, dass sich die Speicherzeit durch sorgfältige Verbesserungen aller Komponenten weiter verlängert und die Atome sich nicht nur für einige Millisekunden, sondern für Sekunden fangen lassen. Interessant wird es zudem sein, diese

Methode auf Moleküle, vielleicht sogar größere Objekte wie Buckeyballs oder auch mikromechanische Oszillatoren, anzuwenden.

Dieses sehr spezielle Kühlverfahren unterscheidet sich deutlich von herkömmlichen Methoden, wie dem Doppler-Kühlen von Atomen: Um ein Atom mittels Rückkopplung zu kühlen, sind einige Kunstgriffe erforderlich. Den Impulsaustausch des Atoms mit dem kühlenden Lichtfeld „steuert“ die Natur dagegen effizient, elegant und schnell – ganz ohne Zutun des Experimentators. Bei der Doppler-Kühlung verschwindet die Netto-Lichtkraft von selbst, wenn die Atome zur Ruhe gekommen sind. Dafür sorgen eine geschickt gewählte Strahlgeometrie und Frequenz des Lasers sowie der Doppler-Effekt der Atome. Das zu kühlende Quantensystem ist dissipativ mit einem Laserbad gekoppelt, sodass sich Wärme aus dem System abführen lässt.

Im kompletten Gegensatz dazu haben die Forscher nun ausgenutzt,

dass sie die Positionsänderung einzelner Atome genau kennen, um sie per Rückkopplung durch An- und Ausschalten eines konservativen Lichtkraftpotentials zu kühlen. In diesem Sinne ist das Experiment eine schöne Variante zum Maxwell'schen Dämon, der ein thermisches System beobachtet und dem richtigen Atom zur richtigen Zeit die passende Potentialbarriere in den Weg stellt, um dadurch das ganze System abzukühlen (Abb. 1). Einmal mehr wird in diesem Experiment die enge Beziehung zwischen gemessener Information und Thermodynamik deutlich – hier für ein sehr kleines Quanten-thermodynamisches System.

Ferdinand Schmidt-Kaler

Prof. Dr. Ferdinand Schmidt-Kaler, Institut für Quanten-Informationsverarbeitung, Universität Ulm, Albert Einstein Allee 11, 89069 Ulm

- [1] A. Kubanek et al., *Nature* **462**, 898 (2009)
- [2] C. J. Hood, T. W. Lynn, A. C. Doherty, A. S. Parkins und H. J. Kimble, *Science* **287**, 1447 (2000)
- [3] P. W. H. Pinkse, T. Fischer, P. Maunz und G. Rempe, *Nature* **404**, 365 (2000)