

QUANTENOPTIK

Einzelne Atome im optischen Resonator

Die kontrollierte Kopplung von einzelnen Atomen und Photonen gewinnt zunehmend an Bedeutung. Garching Forscher ist es jetzt gelungen, ein Atom in einem winzigen Resonator mehr als 15 Sekunden lang so zu platzieren, dass es auf ein einziges darin zirkulierendes Photon reagieren kann [1]. Außerdem konnten sie das Atom in einem Laserfeld mit einer Genauigkeit von 135 nm verschieben [2].

Einzelne Photonen und Atome sind die zukünftigen Datenträger der Quanteninformationstechnologie. Photonen eignen sich zur Informationsübertragung, ruhende Atome speichern Quantenzustände. Mit einer Schnittstelle zwischen beiden sind Quantencomputer in Form von Netzen photonisch gekoppelter Atome denkbar. Dazu müssen sich die Positionen der Atome, ihre Quantenzustände und ihre Wechselwirkung mit einzelnen Photonen nach Belieben manipulieren lassen.

Prinzipiell lässt sich dies durch Festhalten eines Atoms in einem optischen Resonator erreichen. Die gängigen Techniken zum Fangen und Kühlen von Atomen können jedoch in Mikroresonatoren nicht angewandt werden. Jetzt wurde mit einem neuen Verfahren ein Atom im Resonator

Rate der abgestrahlten Photonen als Funktion der Zeit (A) beim Einfangen und (B) während des Hin- und Herschiebens eines Atoms. Die Zählrate spiegelt die Kopplungsstärke von Atom und Resonator wider. (C) zeigt die Position des Atoms im Resonator als Funktion der Zeit.

ABB. 2 ATOM IM RESONATOR

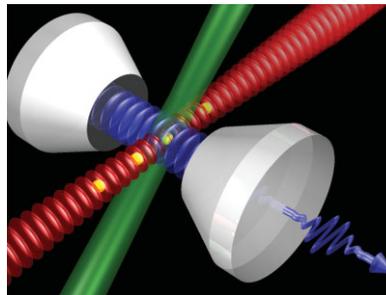
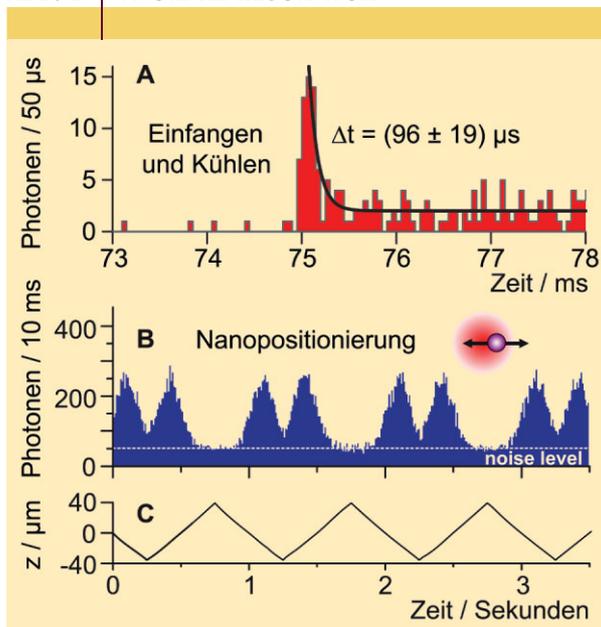


Abb. 1 Rubidiumatome werden von einer Dipolkraftfalle (rot) im Modenvolumen (blau) eines optischen Resonators gehalten. Ein Laser (grün) regt die Atome zur Emission von Photonen an. Diese werden gezählt, sobald sie den Resonator durch einen der Spiegel verlassen.

gefangen und so weit abgebremst, dass es nicht mehr entweicht.

Das geschieht in mehreren Stufen. Am Anfang steht die Präparation kalter Rubidiumatome in einer magneto-optischen Falle. Diese nutzt den Strahlungsdruck gegenläufiger Lichtstrahlen zur Kühlung von Atomen, die dann in einer Dipolkraftfalle zum Resonator geführt werden. Diese zweite Falle ist ein Laserstrahl, dessen Feld einen Dipol im Atom induziert und selbst eine attraktive Kraft darauf ausübt. Die Atome bewegen sich entlang dieses Strahls in den Resonator hinein. Dort wird der Laserstrahl in sich zurückreflektiert, so dass sich eine stehende Welle bildet, die kalte Atome in ihren Bäuchen festhält. Zudem regt ein weiterer Laser die Atome zur Emission von Photonen in den Resonator an (Abb. 1).

Diese Photonenstreuung geht mit der Kühlung eines Atoms einher, falls die Frequenz des Lasers etwas kleiner als die Eigenfrequenz des Resonators ist. Doppler-Effekte in Richtung des Lasers und entlang des Resonators

verlangsamen das Atom, da sich die kinetische Energie mit jeder Photonenstreuung um die Energiedifferenz zwischen emittiertem und absorbiertem Photon erniedrigt. Dies bedeutet: Das anregende Licht wird bevorzugt absorbiert, wenn sich das Atom dem Strahl entgegen bewegt, und Photonen werden vor allem in Richtung der atomaren Bewegung in den Resonator emittiert. Zudem bewirkt die verzögerte Reaktion von Atom und Resonator auf Positionsänderungen, dass das Atom entlang der Dipolkraftfalle abgebremst wird. Mit dieser Kühlung in allen Richtungen blieb ein Atom in dem Garching Experiment im Schnitt 17 Sekunden lang im Resonator gefangen [1]. Das ist die bislang längste, in stark gekoppelten Atom-Resonator-Systemen erreichte Speicherzeit.

Zur Beobachtung eines Atoms werden die in den Resonator gestreuten Photonen gezählt. Abbildung 2a zeigt, dass einige Millisekunden nach dem Einschalten der stehenden Welle ein erstes Atom in den Resonator driftet und die Zählrate hochschnellt. Nach 100 µs Kühlung erreicht das Atom seine endgültige Temperatur von etwa 6 µK. Es streut deutlich weniger Licht, aber mit konstanter Rate. Durch eine Änderung des Interferenzmusters der Dipolkraftfalle lässt sich das Atom anschließend bewegen. Man erreicht dies durch Kippen einer Glasplatte im Strahlengang. Dadurch verlängert sich die optische Weglänge und verschiebt die Stehwelle entlang ihrer Achse. Das Atom folgt dieser Änderung (Abbildung 2b), so dass man die Kopplung an den Resonator nach Belieben einstellen kann [2].

Damit ist eine deterministische Atom-Photon-Schnittstelle in greifbarer Nähe rückt. Zudem ist es möglich, mehrere Atome an den Resonator zu koppeln, was die Voraussetzung für ein Zwei-Atom-Quantengatter im Resonator ist.

[1] S. Nussmann et al., Nature Physics **2005**, 7, 122.

[2] S. Nussmann et al., Phys. Rev. Lett. **2005**, 95, 173602.

Axel Kubn,
MPI für Quantenoptik, Garching