

■ Atomare Dämpfer

Ultrakalte Atome, die in einem hybriden Quantensystem an eine Nano-Membran koppeln, dämpfen deren mechanische Vibration.

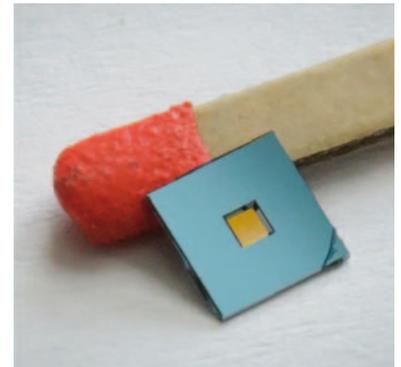
Ultrakalte Atome und Moleküle in lichtinduzierten periodischen Potentialen – sog. optische Gitter – gelten als eines der aktivsten und innovativsten Forschungsthemen der Atom- und Molekülphysik. Denn die in optischen Gittern relevante Quantendynamik der Teilchenbewegung erlaubt es, paradigmatische theoretische Modelle in bisher ungekannter Reinheit und Flexibilität experimentell zu untersuchen. Hierbei ist es selbstverständlich wichtig, das optische Potential so stabil wie möglich zu halten, da jede Fluktuation die gewünschte Quantendynamik der Teilchen in diesem Potential beeinträchtigen würde. Die zufällige Bewegung eines Spiegels, an dem ein Laserstrahl durch Reflexion eine stehende Welle ausbildet, würde z. B. ebenso zufällig das daraus resultierende optische Potential verschieben und die Quantendynamik beeinflussen.

Was aber, wenn wir die Bewegung des Spiegels nicht als Störung betrachten, sondern im Gegenteil als einen Teil des Systems? Der Spiegel wäre in diesem Fall nicht nur eine eventuell stochastisch fluktuierende Randbedingung für das elektromagnetische Feld, sondern ein integraler Freiheitsgrad des Gesamtsystems. Die Bewegung des Spiegels beeinflusst offenbar das Feld und damit auch die Bewegung der Atome im optischen Gitter. Wäre dann – *actio est reactio*

– nicht auch ein Effekt der Atome auf den Spiegel zu erwarten? Einem Forschungsteam rund um Philipp Treutlein an der Universität Basel ist es kürzlich gelungen, eine solche Kopplung in sehr eleganter Weise experimentell nachzuweisen [1]. Insbesondere haben die Physiker demonstriert, dass die Atome im Gitter die Bewegung des Spiegels dämpfen, wenn sie einer Laserkühlung unterliegen. Der Spiegel wird durch die Kopplung an die lasergekühlten Atome „sympathetisch“ mitgekühlt (abgeleitet vom englischen Begriff „sympathetic cooling“ = mitschwingendes Kühlen). Das ist ein wichtiger Schritt in der Entwicklung hybrider Quantensysteme.

In dem Experiment nimmt eine $0,5 \times 0,5 \text{ mm}^2$ große und 50 nm dünne, semitransparente Siliziumnitridmembran die Rolle des Spiegels ein. Die Membran, die wie ein Trommelfell schwingen kann, hat eine fundamentale Schwingungsmoden mit einer Frequenz von $2\pi \cdot 272 \text{ kHz}$ und eine sehr hohe mechanische Güte von über einer Million. Die Reflektivität dieser dünnen Membran beträgt bei der Rubidiumwellenlänge von 780 nm immerhin 28 Prozent, sodass ein daran reflektierter Laserstrahl eine gewisse Stehwellenkomponente ausbildet. Daraus resultiert ein periodisches Potential für ^{87}Rb , dessen Tiefe sich über die Leistung und die Verstimmung des Lasers vom atomaren Übergang justieren lässt. Wenn die Fallenfrequenz der einzelnen Potentialtöpfe gerade der Vibrationsfrequenz der Membran entspricht, führt die Vibration der Membran zu einem resonanten und deutlich sichtbaren Heizeffekt auf die Atome. Diese Richtung der Kopplung ist intuitiv klar.

Wieso die Atome auf den Spiegel rückwirken, ist dagegen nicht ganz so offensichtlich. Den Schlüssel dazu liefert die Feststellung, dass die Atome im optischen Potential eine Rückstellkraft erfahren, die



Die Atome wurden an eine Membran aus Siliziumnitrid gekoppelt.

von einem Impulsübertrag des Lichts auf die Atome herrührt. Dabei verteilen sich notwendigerweise Photonen zwischen den nach links und rechts laufenden Wellen um (Abb. 1). Je größer die Auslenkung der Atome von ihren Potentialminima, desto mehr Photonen werden von der einen in die andere Welle gestreut und desto mehr schwankt die Leistung in dem Licht, das letztlich auf die Membran trifft. Die Bewegung der Atome im Gitter moduliert auf diese Weise den Strahlungsdruck auf die Membran und führt damit zur gesuchten Rückwirkung.

Im Experiment haben die Wissenschaftler die Membran zu großen Vibrationen angeregt und deren Abklingzeit gemessen, während sie die Atome kontinuierlich magneto-optisch gekühlt haben. Solche Ring-down-Messungen wurden unter ansonsten identischen experimentellen Bedingungen durchgeführt – einmal mit Atomen im Potential und einmal ohne. Der Vergleich beider Messungen ergibt eine deutliche Signatur des Kühleffektes der Atome: Sie verstärken die Dämpfung der mechanischen Vibration (Abb. 2).

Das zugrundeliegende Modell sagt für den Fall resonanter Kopplung – wenn die Fallenfrequenz mit der mechanischen Resonanzfrequenz übereinstimmt – eine Erhöhung der Dämpfung um $\Delta\gamma \approx 0,023$ voraus. Trotz aller Vereinfachung stimmt der Wert sehr gut mit den

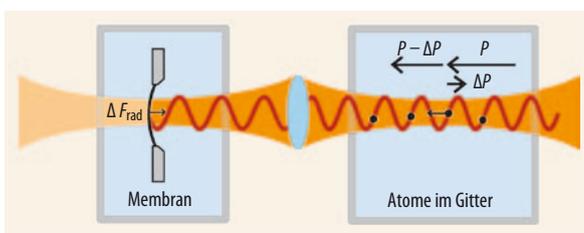


Abb. 1 Oszillationen der nanomechanischen Membran verschieben das optische Potential der Atome. Die Rückwirkung der Atome auf die Membran resultiert daraus, dass sich mit der Auslenkung der Atome die Laserleistungen in den nach links bzw. rechts laufenden Wellen verändern und damit eine Schwankung des Strahlungsdrucks auf die Membran einhergeht.

experimentellen Resultaten überein (Abb. 2). Eine Beschreibung des Systems mittels einer quantenoptischen Mastergleichung bestätigt einerseits diese Ergebnisse und besagt andererseits, dass die Kopplung und damit der sympathetische Kühleffekt im Prinzip noch um vieles größer sein könnten. Bei kryogenen Umgebungstemperaturen und optimierten experimentellen Parametern sollte es möglich sein, die Vibrationsmode nahe an den Grundzustand zu kühlen [2].

Die Wirkung von nanomechanischen Oszillatoren auf Atome durch magnetische [3] bzw. Oberflächenkräfte [4] diente schon in früheren Experimenten dazu, die Bewegung der Oszillatoren zu detektieren. Das aktuelle Experiment von Stephan Camerer et al. zeigt nun erstmalig auch die Rückwirkung der Atome auf das mechanische System. Somit stellt es die erste Realisierung der in [2] vorgeschlagenen Schnittstelle zwischen einem optomechanischen System (der via Strahlungsdruck an Licht gekoppelten Membran) und Atomen dar. In anderen theoretischen Studien wurden vergleichbare Schnittstellen bereits diskutiert: Kopplungen zu internen Freiheitsgraden der Atome erlauben es, verschränkte Zustände zwischen dem mechanischen Oszillator und

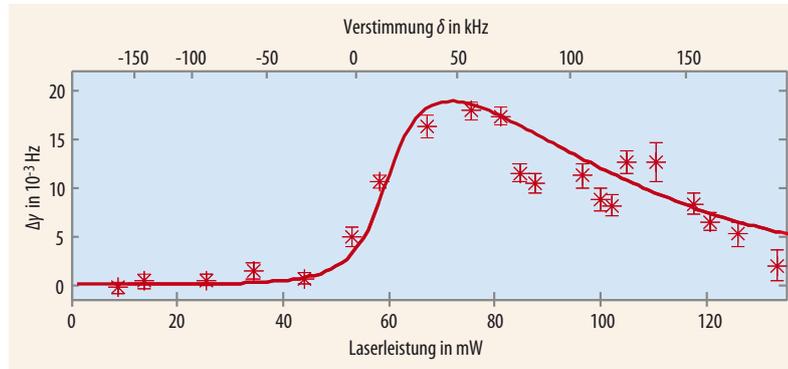


Abb. 2 Aufgrund des sympathetischen Kühleffektes verschiebt sich die Dämpfungsrate $\Delta\gamma$ der Vibrationsmode der Membran. Mit der Laserleistung ändern sich die Fallenfrequenz des optischen Potentials und die mechanische Reso-

nanzfrequenz. Die Verschiebung $\Delta\gamma$ hängt von der Verstimmung δ der beiden Frequenzen ab. Die endliche Temperatur der Atome im Gitter führt dazu, dass das Maximum von $\Delta\gamma$ nicht exakt bei der Resonanz $\delta = 0$ liegt.

kollektiven Spinanregungen eines atomaren Ensembles zu erzeugen [5]. In Fabry-Perot-Interferometern hoher Finesse kann sogar ein einzelnes Atom so stark an eine mikromechanische Membran koppeln, dass die Kopplungsrate die relevanten Dekohärenzraten übersteigt [6].

Diese experimentellen und theoretischen Bemühungen stehen im größeren Kontext der Entwicklung hybrider Quantensysteme, deren Ziel es ist, die Vorteile und Stärken unterschiedlicher physikalischer Systeme in experimentell kompatiblen Anordnungen zu kombinieren [7]. Eine derartige Integration verschiedener experimenteller An-

sätze wird für die zukünftige Entwicklung von Quantentechnologien von eminenter Bedeutung sein.

Klemens Hammerer

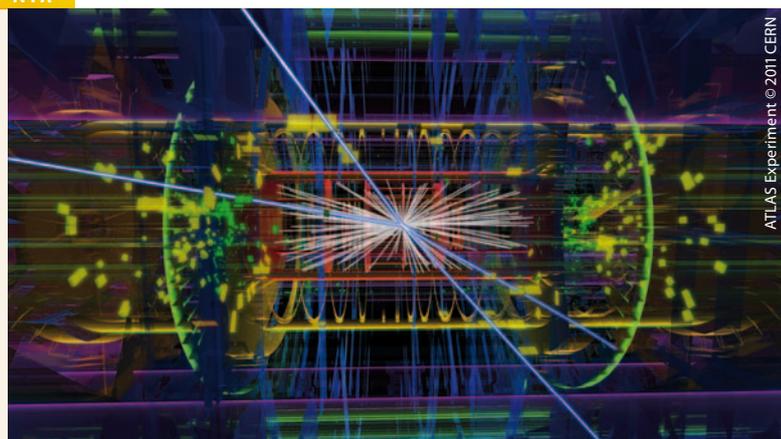
- [1] S. Camerer et al., Phys. Rev. Lett. **107**, 223001 (2011)
- [2] K. Hammerer et al., Phys. Rev. A **82**, 021803 (2010)
- [3] Y.-J. Wang et al., Phys. Rev. Lett. **97**, 227602 (2006)
- [4] D. Hunger et al., Phys. Rev. Lett. **104**, 143002 (2010)
- [5] K. Hammerer et al., Phys. Rev. Lett. **102**, 020501 (2009)
- [6] K. Hammerer et al., Phys. Rev. Lett. **103**, 063005 (2009)
- [7] M. Wallquist et al., Phys. Scr. T **137**, 014001 (2009)

Prof. Dr. Klemens Hammerer, Institut für Theoretische Physik und Institut für Gravitationsphysik, Leibniz Universität Hannover, Appelstr. 2, 30167 Hannover

HIGGS – IMMER NOCH MEHR ALS NIX

Mitte Dezember haben die CMS- und ATLAS-Kollaborationen ihre neuesten Ergebnisse zur Suche nach dem Higgs-Boson präsentiert. Schon die Ankündigung des Seminars hatte in den Medien einen Hype ausgelöst. Denn es gibt wohl keine Entdeckung, der Physiker und breite Öffentlichkeit mehr entgegen fiebern. Bereits 1964 hat der britische Physiker Peter Higgs einen Mechanismus vorgeschlagen, durch den die Elementarteilchen ihre Massen erhalten könnten. Doch bislang ist es nicht gelungen, das mit dem Higgs-Feld einhergehende Boson zweifelsfrei zu entdecken. Nach den neuesten Daten von ATLAS und CMS liegt die Higgs-Masse mit drei Standardabweichungen, d. h. mit 95-prozentiger Wahrscheinlichkeit, zwischen 115,5 und 131 GeV.

CMS und ATLAS haben zudem Ereignisse gesehen, die auf eine Higgs-Masse um 124 bzw. 125 GeV hindeuten. Erst



Möglicher Zerfall eines Higgs-Bosons in zwei Z-Bosonen, die in jeweils zwei Myonen weiter zerfallen (blau).

ab fünf Standardabweichungen gilt ein Teilchen jedoch als nachgewiesen. Dann nämlich liegt die Wahrscheinlichkeit dafür, dass es sich bei dem Signal um eine zufällige statistische Fluktuation handelt, bei nur noch etwa

0,000057. In den kommenden Monaten werden beide Kollaborationen ihre Daten weiter analysieren. Das „Sein oder Nichtsein“ des Higgs-Teilchens dürfte frühestens im Sommer entschieden sein. (MP / AP)