

## ■ Mit Licht zur Quanten-„Mechanik“

Das nichtklassische Verhalten eines nanomechanischen Resonators lässt sich durch die Messung seiner Nullpunktsfluktuationen nachweisen.

Was geschieht, wenn man eine Gitarrensaite bis in den Mikro- oder Nanometerbereich verkleinert? Lassen sich dann – bei genügend tiefen Temperaturen – quantenmechanische Eigenschaften eines rein mechanischen Systems beobachten? Mit dem Ziel, diese Fragen zu beantworten, wurde in den vergangenen Jahren das Schwingungsverhalten von kleinen mechanischen Resonatoren eingehend untersucht. In drei eindrucksvollen Experimenten gelang es seit 2010, solche Mikro- oder Nanoresonatoren erstmalig so weit abzukühlen, dass ihre thermische Energie die Energie eines Schwingungsquantums unterschritt [1–3]. Damit befanden sich diese Resonatoren in ihrem quantenmechanischen Grundzustand, in dem keine Schwingungsquanten mehr angeregt sind. Der Resonator ist dabei aber nicht in Ruhe, da er laut Quantenmechanik noch Nullpunktsenergie besitzt und Nullpunktsfluktuationen ausführt. Amir Safavi-Naeini und seinen Kollegen aus der Gruppe von Oscar Painter am California Institute of Technology (Caltech) ist es nun erstmals gelungen, diese Fluktuationen eines nanomechanischen Resonators direkt nachzuweisen [4].

Die Wissenschaftler bedienen sich dafür der Raman-Spektroskopie und analysierten die beiden Bewegungsseitenbänder im Raman-Spektrum. Dieses Stokes- bzw. Anti-Stokes-Band tritt auf, wenn

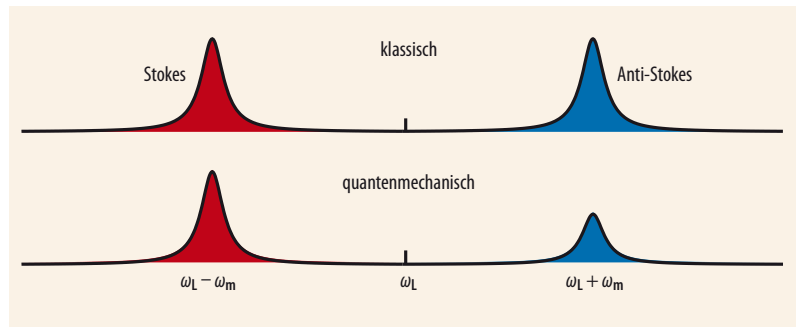


Abb. 1 Raman-Seitenbänder treten im Abstand der mechanischen Resonanzfrequenz  $\omega_m$  links und rechts von der Frequenz des Pump lasers  $\omega_L$  auf. Während im klassischen Regime Stokes- und Anti-

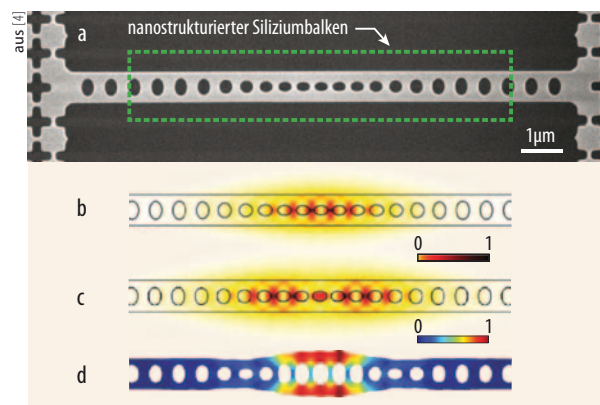
Stokes-Seitenband gleich groß sind, tritt nahe des quantenmechanischen Grundzustands aufgrund des Einflusses der Nullpunktsfluktuationen eine Asymmetrie auf.

bei der Lichtstreuung ein Quant der mechanischen Schwingung (Phonon) im Resonator absorbiert bzw. emittiert wird; entsprechend beträgt die Frequenz der Seitenbänder  $\omega_L \pm \omega_m$  mit der Frequenz des Pump lasers  $\omega_L$  bzw. des Phonons  $\omega_m$ . Bei klassischem Rauschen sind beide Prozesse möglich und die Seitenbänder symmetrisch (Abb. 1). Dies ist bei den Nullpunktsfluktuationen des Resonators allerdings nicht der Fall, da sich aus ihnen anders als aus klassischem Rauschen keine Energie gewinnen lässt. Daher verschwindet das mit der Absorption eines Phonons verbundene, höherenergetische Anti-Stokes-Band, während das mit der Emission eines Phonons verbundene, niederenergetische Stokes-Seitenband auch im Grundzustand vorhanden ist. Diese Asymmetrie im Seitenbandspektrum ist eine reine Quanteneigenschaft des Systems (Abb. 1).

In ihrem Experiment mussten die Forscher aus Kalifornien zwei Aufgaben bewältigen: Einerseits galt es, den Resonator bis in die Nähe seines quantenmechanischen Grundzustands abzukühlen, um die Nullpunktsfluktuationen sichtbar zu machen. Andererseits war eine Messtechnik notwendig, mit der sich die beiden Seitenbänder unabhängig voneinander detektieren lassen, um ihre Asymmetrie nachzuweisen. Das Rüstzeug hierzu wurde aus der Spektroskopie kalter Atome und Ionen [5] entliehen und auf ein nanomechanisches System übertragen.

Das Team um Oscar Painter verwendete einen optomechanischen Kristall, eine Nanostruktur, die in einen freitragenden Siliziumbalken integriert ist (Abb. 2). Diese besteht aus einer Reihe von Löchern, die so geschickt angeordnet sind, dass durch optische bzw. akustische Bragg-Streuung sowohl Photonen als auch Phononen im Zentrum der Struktur lokalisiert werden. Aufgrund des hohen Überlapps der lokalisierten Moden koppelt das Licht stark mit den mechanischen Resonanzen im Gigahertzbereich. Dadurch führen die Positionsfluktuationen des mechanischen Resonators bei seiner Eigenfrequenz zu einer entsprechenden Frequenzänderung der optischen Kavität [6]. Wird die Kavität von einem Laser gepumpt – dazu dient eine

Abb. 2 Der nanostrukturierte optomechanische Kristall besteht aus einem freitragenden Siliziumbalken (a). Eine periodische Reihe von Löchern erzeugt eine Bandstruktur sowohl für Photonen als auch für Phononen. Die abnehmende Lochgröße im Zentrum des Balkens stört diese Bandstrukturen, sodass lokalisierte Moden für Photonen (b, c) sowie Phononen (d) entstehen. Der große räumliche Überlapp der Moden führt zu einer starken optomechanischen Kopplung.



verjüngte Glasfaser –, entstehen die erwähnten Seitenbänder.

Im Experiment wird dies gleich bei zwei verschiedenen optischen Moden angewandt. Die erste Mode dient zum optomechanischen Kühlen des Resonators. Ähnlich wie beim Seitenbandkühlen von Atomen unterdrückt dabei das Pumpen mit einem rotverstimmtten Laser die mechanische Vibration. Eine zweite optische Mode wird verwendet, um die beiden Seitenbänder auszulesen. Bei geeigneter Wahl der Verstimmung des zweiten Pumpasers ist es möglich, entweder das linke oder das rechte Seitenband der Laserlinie auf die Kavitätsresonanz zu schieben, was ein effektives Herausfiltern des Stokes- bzw. Anti-Stokes-Signals erlaubt. Bei der erreichten minimalen effektiven Temperatur der Schwingungsmode, die einer Besetzungszahl von nur 2,6 Phononen entsprach, betrug die Asymmetrie der Bewegungsseitenbänder etwa 40 % – ein klassisch nicht zu interpretierendes Ergebnis.

Mit einem vergleichbaren optomechanischen Kristall hatten die Forscher bereits im vergangenen Jahr eine Besetzungszahl kleiner eins und damit den quantenmechanischen Grundzustand erreicht [3]. Die damals durchgeführte empfindliche Messung der Positionsfluktuationen erlaubte allerdings nicht, zwischen klassischen und quantenmechanischen Signaturen zu unterscheiden [2, 3]. Dies ist nun erstmals an einem optomechanischen System eindeutig gelungen. An einem elektromechanischen Resonator hatten zuvor Wissenschaftler an der University of California in Santa Barbara nichtklassisches Verhalten beobachtet, indem sie die Energiequantisierung eines piezoelektrischen Mikroresonators nachwiesen, der an ein supraleitendes Quantenbit gekoppelt war [1].

Die neue Arbeit zeigt anschaulich den Übergang von klassisch dominierten zu nur noch quantenmechanisch erklärbaren Positionsfluktuationen des Resonators in der Nähe seines Grundzustands.

Dies ist ein bedeutender Schritt für die Nano-Optomechanik, da das Ergebnis nicht nur das aus der Quantenoptik erwartete Verhalten reproduziert [5]. Vielmehr zeigt das Experiment auf, wie sich in Zukunft quanten-„mechanische“ Systeme präzise kontrollieren lassen, eine Aussicht, die den Weg zu komplexeren Experimenten mit quantenmechanischen Nanoresonatoren weist.

Eva Weig

- [1] A. D. O'Connell et al., *Nature* **464**, 697 (2010)
- [2] J. D. Teufel et al., *Nature* **475**, 359 (2011)
- [3] J. Chan et al., *Nature* **478**, 89 (2011)
- [4] A. H. Safavi-Naeini et al., *Phys. Rev. Lett.* **108**, 033602 (2012)
- [5] F. Diedrich et al., *Phys. Rev. Lett.* **62**, 403 (1989)
- [6] F. Marquardt, *Physik Journal*, August/September 2009, S. 67

Dr. Eva Weig, Center for NanoScience & Fakultät für Physik, Ludwig-Maximilians-Universität München

## HUMMELN BEIM AUSWEICHMANÖVER

Auf Futtersuche lassen sich Hummeln nicht blind von Blume zu Blume treiben, sondern weichen gezielt natürlichen Feinden, wie z. B. Spinnen, aus. Zu diesem Ergebnis sind Wissenschaftler an der University of London gelangt. Um den Hummelflug genau zu analysieren, haben die Forscher die Geschwindigkeitsverteilung von Hummelflügen statistisch ausgewertet. Eine Falle, welche die Hummeln für zwei Sekunden festhält, fungierte dabei als „künstliche Spinne“. Ergebnis der Untersuchung: Waren keine natürlichen Feinde anwesend, flogen die Hummeln systematisch und auf direktem Wege von Blüte zu Blüte, um Nektar aufzusammeln. Sobald eine künstliche Spinne ins Spiel kam, drehten die Hummeln häufig um und zeigten sich auf der Futtersuche deutlich vorsichtiger. Daraus lässt sich ableiten, dass viele Faktoren beim Hummelflug eine Rolle spielen: die Sinneswahrnehmung der Hummeln, das Gedächtnis, Tageslicht und auch die Anwesenheit natürlicher Feinde. Ganz schön schlau, diese Hummeln ...  
F. Lenz et al., *Phys. Rev. Lett.* **108**, 098103 (2012)



Tom Ings