

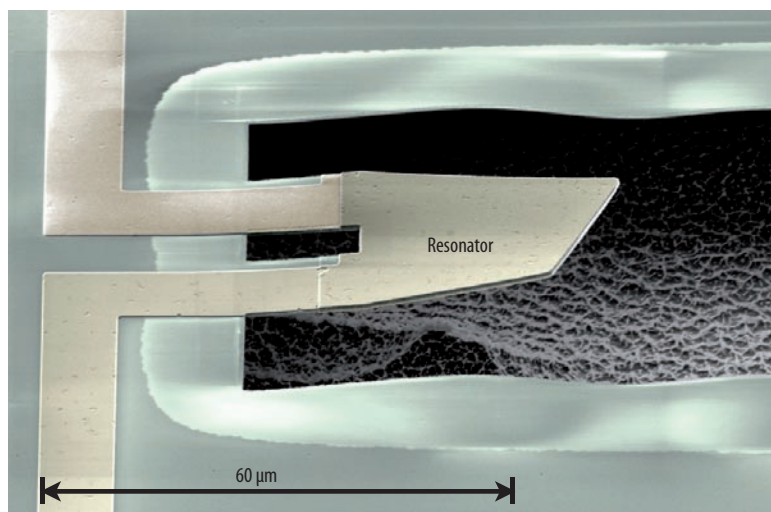
Der Klang der Quantentrommel

Forscher kühlen einen mechanischen Resonator bis in den Grundzustand und erzeugen kontrolliert eine einzelne Anregung.

Mechanische Resonatoren abzukühlen, bis sich in der mechanischen Bewegung Quanteneffekte beobachten lassen – dieses Ziel stand in den letzten Jahren ganz oben auf der Agenda zahlreicher Experimentatoren in aller Welt. Falls es nämlich gelänge, mit makroskopischen Objekten nichtklassische Zustände wie Überlagerungen und Verschränkungen zu erzeugen, wäre der Weg frei für fundamentale Tests der Quantenmechanik in einem noch weitgehend unerforschten Regime. Diesem Ziel hat sich nun ein Team um Andrew Cleland und John Martinis in Santa Barbara stark genähert: Ihnen gelang es, einen mechanischen Resonator in den quantenmechanischen Grundzustand zu bringen, einzelne Phononen in ihm zu erzeugen und diese wieder auszulesen [1]. Möglich wurde dies durch die hohe mechanische Frequenz des Resonators sowie die starke Kopplung an ein supraleitendes Phasenqubit, welches zur Manipulation und Detektion diente.

Seit Einführung des Rasterkraftmikroskops dienen mikromechanische Systeme in der Festkörperphysik dazu, kleinste Kräfte, Auslenkungen und Massenänderungen zu detektieren. Zu den Erfolgen in dieser Richtung zählen z. B. die Vermessung der Casimir-Kraft und die mechanisch detektierte Kernspinresonanz. Der Schritt hin zu noch kleineren, nanomechanischen Systemen verspricht einerseits Anwendungen im klassischen Regime: Dazu gehören u. a. die schnelle mechanische Detektion und Signalverarbeitung mithilfe nichtlinearer Effekte, wie dem bistabilen Verhalten im stark getriebenen, anharmonischen mechanischen Oszillator.

Andererseits aber sollten es die höheren mechanischen Frequenzen erlauben, einen solchen nanomechanischen Resonator in den Grundzustand abzukühlen, um dann Quanteneffekte zu beobachten. Um in den Grundzu-



A. O'Connell und A. Cleland, UCSB

Die Schwingung des freitragenden mechanischen Resonators koppelt über den piezoelektrischen Effekt an einen elek-

trischen Schaltkreis, der ein supraleitendes Phasenqubit enthält, das hier nicht gezeigt ist.

stand zu gelangen, muss die thermische Energie des mechanischen Oszillators kleiner als die minimale Anregungsenergie werden. Für molekulare Vibrationen mit ihren hohen Frequenzen ist das kein Problem, diese werden z. B. in der Elektron-Phonon-Wechselwirkung an Kohlenstoff-Nanoröhrchen bereits untersucht. Größere, lithographisch fabrizierte mechanische Strukturen bieten hingegen viele Vorteile wie Reproduzierbarkeit, höhere mechanische Güte, leichtere Kontaktierung, Flexibilität im Design, bessere Kontrolle und Integrierbarkeit. Der damit verbundene Nachteil waren bisher die niedrigeren Frequenzen, die zusätzliche aktive Kühlmethode erforderten, wie die Kopplung an passend getriebene elektrische Schaltkreise oder optische Kavitäten [2]. Hier gab es in letzter Zeit zwar rapide Fortschritte, das Quantenregime ließ sich aber noch nicht erreichen.

Dass der Schritt in den Grundzustand nun mit einem Mischungskryostaten ohne weitere Tricks gelang, ist der hohen mechanischen Frequenz von 6 GHz zu verdanken. Der in den Experimenten des Teams in Santa Barbara verwendete Resonator besteht aus Aluminiumnitrid, und die verwen-

dete mechanische Schwingungs-mode entspricht einer Kompression und Ausdehnung des gesamten Körpers. Da das Material piezoelektrisch ist, koppelt die Schwingung gut an einen elektrischen Schaltkreis. Auf diese Weise ließ sich ein weiteres allgemeines Problem bewältigen, nämlich die Manipulation und Detektion der mechanischen Bewegung. Die Forscher um Cleland und Martinis haben dazu ein supraleitendes Phasenqubit verwendet, von der Art, wie sie es bereits vorher mit großem Erfolg an einen Mikrowellenresonator gekoppelt hatten [3]. Im aktuellen Experiment haben sie diesen nun durch den mechanischen Resonator ersetzt, sodass Phononen an die Stelle von Mikrowellenphononen treten. Skeptiker mögen den Verdacht hegen, dass die piezoelektrische Schwingung letztlich doch wieder elektromagnetischer Natur ist, doch dieser potenziellen Kritik begegnen die Autoren mit eine Serie eleganter Tests, in denen sie z. B. die Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von den geometrischen Abmessungen überprüfen.

Das Qubit dient dazu, sowohl einzelne Phononen zu erzeugen als auch auszulesen. Durch einen Mikrowellenpuls wird das Qubit

zunächst in den angeregten Zustand gebracht, um danach für eine variable Zeitspanne mit dem mechanischen Resonator in Wechselwirkung zu stehen. Während dieser Zeit verwandelt sich die Qubit-Anregung periodisch in ein Phonon und wieder zurück. Es finden also sog. Vakuum-Rabi-Oszillationen statt, wie sie aus der Quantenelektrodynamik von einzelnen Atomen in Kavitäten bekannt sind. Hier wird dieser Prozess zum ersten Mal mit Phononen beobachtet. Anschließend lässt sich der Zustand des Qubits mit einem Strompuls auslesen, um so zu verifizieren, dass die Oszillationen tatsächlich stattfinden, und anhand ihrer Periode die Stärke der Wechselwirkung zu erkennen. In einem zweiten Schritt wurde die Zerfallszeit der Phononen bestimmt, indem zunächst eines erzeugt und dann nach einer definierten Wartezeit wieder zurück in das Qubit transferiert wurde. Die gefundene Dämpfungszeit von sechs Nanosekunden passt zu der gemessenen mechanischen Güte Q von 260.

Wenn es gelingt, diese vergleichsweise schlechte Güte zu

verbessern, dann besteht die Aussicht, nichtklassische Zustände mit willkürlichen Überlagerungen von mechanischen Fock-Zuständen – also mit verschiedenen Phononenzahlen – kontrolliert zu erzeugen und danach auszulesen, bis hin zur Rekonstruktion der Wigner-Dichte, wie das in den Mikrowellen-Experimenten für Photonen schon gezeigt wurde [3]. Auf jeden Fall läutet dieses Experiment eine neue Ära in der Manipulation mechanischer Objekte im Quantenregime ein. Eine sehr attraktive Möglichkeit wäre die Kopplung an optomechanische Kristalle [4], welche die Phononen in Photonen konvertieren können. Damit wäre es letztlich möglich, Quanteninformation von supraleitenden Qubits in fliegende Qubits zu übertragen.

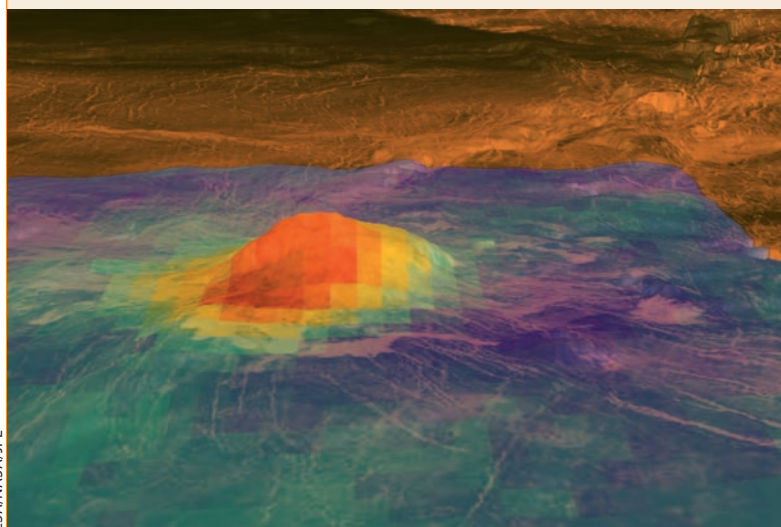
Max Ludwig und Florian Marquardt

- [1] A. D. O'Connell et al., *Nature* **464**, 697 (2010)
- [2] F. Marquardt, *Physik Journal*, September 2009, S. 67
- [3] M. Hofheinz et al., *Nature* **454**, 310 (2008)
- [4] M. Eichenfield et al., *Nature* **462**, 78 (2009)

AKTIVE VENUS

Venus Express, die Raumsonde der Europäischen Weltraumorganisation ESA, hat die bislang eindeutigsten Zeichen für Vulkanismus auf dem Schwesterplaneten der Erde ausgemacht. Ihr Visible and Infrared Thermal Imaging Spectrometer (VIRTIS) fing charakteristische Spuren junger Lavaflüsse auf, die allerhöchstens 2,5 Millionen Jahre alt sind, was auch jüngste geologische

Aktivität nicht ausschließt. Das Bild zeigt den Vulkangipfel Idunn Mons auf der Südhemisphäre der Venus, der einen Durchmesser von 200 km hat. Der Farbverlauf entspricht der Temperaturverteilung (rot ist am wärmsten), die Topographie stammt von Radardaten der NASA-Mission Magellan. S. E. Smrekar et al., *Science*, DOI: 10.1126/science.1186785 (2010)



ESA/NASA/JPL