

Quantenmechanik mit leichten Quetschungen

Drei Forschergruppen haben erstmals gequetschte Quantenzustände von mikromechanischen Resonatoren erzeugt.

Quantenphysiker sind bekannt für kreative Namensgebung. Ein wunderbares Beispiel ist das „Quetschen“ von Quantenfluktuationen, etwa bei Bewegungsgrößen wie Ort und Impuls. Der Hintergrund ist folgender: Auch nahe des absoluten Nullpunkts kommt ein harmonischer Oszillator nicht ganz zum Stillstand. Vielmehr dominiert die Nullpunktsenergie $\hbar\omega/2$ die Bewegung, sodass die Erwartungswerte von Orts- und Impulsmessungen mit einer Varianz $\Delta x = \sqrt{\hbar/(2m \cdot \omega)}$ und $\Delta p = \sqrt{\hbar \cdot m \cdot \omega/2}$ fluktuieren. Das Produkt $\Delta x \cdot \Delta p = \hbar/2$ erfüllt die Heisenbergsche Unschärferelation exakt – die Bewegungszustände besitzen minimale Unschärfe. Soll ein Oszillator als Sensor dienen, bestimmen die Quantenfluktuationen die Messgenauigkeit. Außer es gelingt, die Fluktuation einer der beiden Größen unter die Unschärfe der Nullpunktsfluktuation zu reduzieren, idealerweise zu beliebig kleinen Werten. Da die Unschärferelation nach wie vor gilt, kann das nur auf Kosten der anderen Größe geschehen – wie bei einem Luftballon, der beim Zusammendrücken in der einen Richtung kleiner wird, in der anderen größer. Dieser Vorgang heißt Quetschen („Squeezing“).

Seinen modernen Ursprung hat das Quetschen in der Quantenoptik [1], wo es u. a. darum geht, laserba-

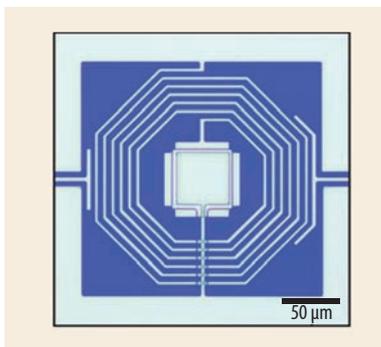


Abb. 2 Lichtmikroskopische Aufnahme des Schwingkreises (grau Aluminium, blau Siliziumsubstrat). Der mikromechanische Plattenkondensator in der Mitte ist von einem Spiralinduktor und weiteren Kondensatoren umgeben.

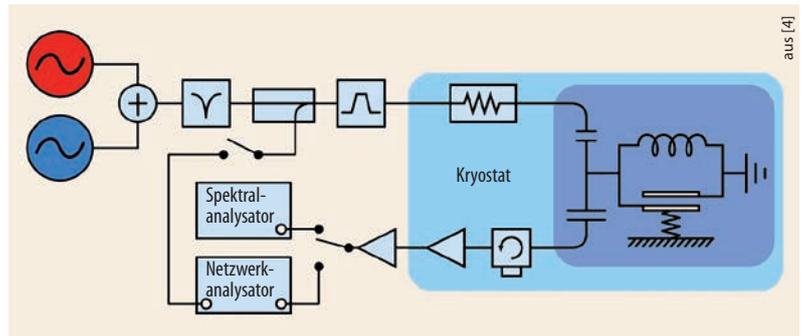


Abb. 1 Im Experiment werden die rot und blau verstimmt Pumpfelder bei Raumtemperatur herausgefiltert und bei tiefen Temperaturen so abgeschwächt, dass nur noch das Schrotrauschen eine

sierte Interferometer zur Beobachtung von Gravitationswellen noch genauer zu machen [2]. Die mechanischen Bewegungsgrößen sind im Fall von Laserlicht Amplitude und Phase. Experimentell entsteht ein gequetschter Zustand durch nicht-lineare optische Prozesse, bei denen die Phase des Lichts intensitätsabhängig wird [3]. Formal entspricht das der Kopplung zwischen Erzeugungs- und Vernichtungsoperator des Strahlungsfeldes.

Nun konnten drei Forscherteams vom Caltech, von der Aalto University in Finnland und vom NIST erstmals gequetschte Quantenzustände der Bewegung von mikromechanischen Resonatoren erzeugen [4 – 6]. Die Resonatoren sind mechanisch schwingende Membrane, die nur 100 Nanometer dick sind und einen Durchmesser von mehreren 10 Mikrometern haben. Aus Sicht der Quantenphysik sind das makroskopische Systeme, bei denen etwa 10^{12} Atome kollektiv zur Bewegung des Schwerpunkts beitragen. Durch Kopplung an optische oder Mikrowellenfelder, beispielsweise indem das mechanische Element Teil eines Resonators für das Strahlungsfeld wird, lassen sich die mechanischen Systeme mit etablierten Methoden der Quanten- und Atomoptik manipulieren. Dadurch ist es in den letzten zehn Jahren gelungen, die Kontrolle über mikromechanische

Rolle spielt. Der optomechanische Schwingkreis ist thermisch mit einem Mischkryostat verbunden. Die Signale werden verstärkt und mit einem Spektral- oder Netzwerkanalysator gemessen.

Systeme bis in das Quantenregime auszudehnen [7].

In den jüngsten Experimenten ist die mechanische Membran jeweils Teil eines Kondensators in einem supraleitenden Mikrowellen-Schwingkreis (Abb. 1). Die mechanische Bewegung moduliert die Resonanzfrequenz des Schwingkreises ω_c , die in zwei der Experimente bei 6 GHz liegt [5, 6]. Dadurch entstehen Seitenbänder bei der mechanischen Frequenz ω_m , die hier 4 bis 15 MHz beträgt. Im Photonenbild sind die Seitenbänder äquivalent zur Stokes- und Anti-Stokes-Raman-Streuung in der Atomphysik, bei der das einfallende Strahlungsfeld durch Kopplung an Bewegungszustände unelastisch gestreut wird und dem System Energie zu- oder abführt. Treibt ein externes Mikrowellenfeld, das um die mechanische Frequenz negativ verstimmt ist ($\omega_c - \omega_m$), den Schwingkreis an, verstärkt dies die Anti-Stokes-Raman-Streuung resonant. Das Strahlungsfeld führt in dem Fall mehr mechanische Energie ab, als der Stokes-Prozess zuführt. Dieser Vorgang ist äquivalent zur Seitenband-Laserkühlung von Ionen, die seit den 1970er-Jahren bekannt ist.

Alle drei Experimente nutzen diesen Effekt und zeigen – ausgehend von einer Umgebungstemperatur von 10 bis 30 mK bzw. von einer thermischen Besetzungszahl

des mechanischen Oszillators von 40 bis 50 Phononen – eine Laserkühlung auf etwa 0,1 bis 0,2 Phononen, also in den Quantengrundzustand der mechanischen Bewegung. Da das in den Resonator gestreute Strahlungsfeld Information über die mechanische Bewegung enthält, lassen sich daraus – unter Kenntnis der Systemdynamik – die Varianzen Δx und Δp rekonstruieren und indirekt die minimalen Unschärfen des Grundzustands bestimmen. Der zweite wichtige Prozess ist die resonante Erhöhung der Stokes-Raman-Streuung durch Treiben des Schwingkreises bei $\omega_c + \omega_m$. Dadurch kommt es zu korrelierten Anregungen von Photonen des Resonatorfelds und Phononen der mechanischen Bewegung. In der Quantenoptik ist diese Wechselwirkung als „Down-Conversion“ bekannt und dient beispielsweise zur Erzeugung von Verschränkung.

Laufen beide Prozesse gleichzeitig ab, d. h. pumpt man den Schwingkreis mit beiden verstimmten Mikrowellenfeldern gleichzeitig (Abb. 1), resultiert eine Wechselwirkung, die den mechanischen Erzeugungs- und Vernichtungsoperator miteinander koppelt. Das ist die Grundvoraussetzung für gequetschte Zustände. Allerdings „versteckt“ sich die Quetschung im Grundzustand dieser Wechselwirkung und kommt erst durch Laserkühlung ans Licht: Dazu muss das rot verstimmte Pumpfeld, das für die Laserkühlung verantwortlich ist, eine höhere Leistung haben als das blau verstimmte Pumpfeld. In den Experimenten lag das Verhältnis bei 10:1 bis 1,5:1. In anderen Worten: Man kühlt das mechanische System in den gequetschten Grundzustand. Diese Idee des „Reservoir Engineering“ wurde vor über 20 Jahren zur Quantenkontrolle einzelner Ionen vorgeschlagen und realisiert [8]. Die Ausweitung auf mikromechanische Resonatoren [9] ist ein experimenteller Meilenstein in der Quantenkontrolle massiver Objekte.

Die beiden Forscherteams um Keith Schwab am Caltech und Mika Sillanpää in Aalto haben mit sehr ähnlichen experimentellen

Systemen eine Quetschung um jeweils rund 20 Prozent (1 dB) der Nullpunktsfluktuationen erzeugt. John Teufel und seine Kollegen am NIST erzielten vergleichbare Werte, konnten aber mit einer neuen Messmethode zudem die Nullpunktsfluktuationen messen und die Quetschung damit absolut kalibrieren. Sie erreichen dies durch einen zweiten Mikrowellenresonator mit Resonanzfrequenz ω_{c2} , der an denselben mechanischen Resonator gekoppelt ist. Zwei weitere, gleichstark verstimmte Mikrowellenfelder ($\omega_{c2} \pm \omega_m$) erzeugen ein Strahlungsfeld, das mit der mechanischen Frequenz amplitudenmoduliert und nur auf eine Quadratur der Bewegung sensitiv ist. Diese Realisierung einer zerstörungsfreien Quantenmessung erlaubt es, die minimale Unschärfe des Grundzustands der Bewegung direkt zu messen.

In der Optik gelingt es mittlerweile routinemäßig, Laserlicht um 90 Prozent bzw. 10 dB und mehr zu quetschen. Das sollte prinzipiell auch mit mikromechanischen Systemen möglich sein. Im Wesentlichen limitieren zwei Faktoren die Experimente: Zum einen wird ein Teil der Mikrowellenstrahlung im supraleitenden Material absorbiert, was die Strukturen bei zu großer Pumpleistung so sehr aufheizt, dass die Quetschung verloren geht. Zum anderen führt mangelnde Phasenstabilität zwischen den Pumpfeldern zu einer langsamen Rotation der Quetschung im Phasenraum, wodurch sich der Effekt

im Laufe einer längeren Messung herausmittelt. Beide Faktoren sind technischer Natur und sollten sich im Laufe der Zeit verbessern lassen.

Eine weitere Herausforderung besteht darin, die Methode auf optomechanische Systeme zu übertragen, die mit Laserlicht getrieben werden. Bei ihnen ist die Kopplung an die mechanischen Moden noch geringer. Allerdings gibt es vielversprechende Strategien, die Kopplung durch Strukturierung der mikromechanischen Elemente zu erhöhen. Dass gequetschtes Licht die Messempfindlichkeit eines Interferometers verbessert, zeigten Messungen an den Gravitationswellendetektoren GEO600 und LIGO [10].[§] Nach den Erfolgen dieser ersten drei Experimente ist es nur eine Frage der Zeit, bis auch quanten-„mechanische“ Quetschung zum Standardwerkzeug einer verbesserten Quantensensorik wird.

Markus Aspelmeyer

- [1] D. F. Walls, *Nature* **306**, 141 (1983)
- [2] C. Caves, *Phys. Rev. D* **23**, 1693 (1981)
- [3] R. E. Slusher et al., *Phys. Rev. Lett.* **55**, 2409 (1985)
- [4] E. E. Wollman et al., *Science* **349**, 952 (2015)
- [5] J.-M. Pirkkalainen et al., *Phys. Rev. Lett.* **115**, 243601 (2015)
- [6] F. Lecocq et al., *Phys. Rev. X* **5**, 041037 (2015)
- [7] M. Aspelmeyer, T. J. Kippenberg und F. Marquardt, *Rev. Mod. Phys.* **86**, 1391 (2014)
- [8] J. I. Cirac et al., *Phys. Rev. Lett.* **70**, 556 (1993)
- [9] A. Kronwald et al., *Phys. Rev. A* **88**, 063833 (2013)
- [10] J. Abadie et al., *Nat. Phys.* **7**, 962 (2011)

Prof. Dr. Markus Aspelmeyer, Fakultät für Physik, Uni Wien, Boltzmann-gasse 5, 1090 Wien, Österreich

[§]) vgl. dazu den Bildkasten auf S. 17

KURZGEFASST

■ Von großen Zahlen

Wie viele Möglichkeiten gibt es, 128 Tennisbälle beliebig anzuordnen? Forscher aus Cambridge bestimmten die Antwort: etwa 10^{250} . Diese Zahl ist viel größer als die Zahl aller Teilchen im Universum. Wichtiger als der Wert ist die Tatsache, dass es überhaupt gelang, das Problem zu lösen. Es ist weder möglich, alle Kombinationen durchzuspielen noch sie zu speichern, sodass die Forscher Kombinatorik und Statistik einsetzen. Anwendungen finden sich z. B. in der granularen Physik zur Vorhersage von Lawinen. S. Martiniani et al., *Phys. Rev. E* **93**, 012906 (2016)

■ Von präzisen Uhren

Wissenschaftler der PTB haben zwei Weltrekorde aufgestellt: Sie senkten die Messunsicherheit $\Delta t/t$ einer Yb-Uhr auf $3 \cdot 10^{-18}$ und stabilisierten die Frequenz einer Sr-Uhr auf $\Delta f/f = 8 \cdot 10^{-17}$. Die Yb-Uhr basiert auf der extrem schmalen Resonanz eines einzelnen Yb^+ -Ions. Die Sr-Uhr funktioniert dank eines Lasersystems, das thermisch und mechanisch gegen seine Umgebung isoliert ist. Die hohe Genauigkeit ist z. B. nötig, um die Feinstrukturkonstante exakt zu bestimmen. N. Huntemann et al., *Phys. Rev. Lett.* **116**, 063001 (2016) und A. Al-Masoudi et al., *Phys. Rev. A* **92**, 063814 (2015)