

■ Licht als Kühlmittel

Mikrospiegel lassen sich mithilfe des Strahlungsdrucks von Licht kühlen – auf dem Weg zu Quanteneffekten von Freiheitsgraden der Bewegung.

Dr. Jens Eisert,
Blackett Laboratory,
Imperial College
London, Prince
Consort Road,
SW7 2BW London

Wenn Licht auf einen Spiegel fällt, passieren zwei Dinge: Einerseits wird das Licht natürlich reflektiert. Andererseits übt das Licht aber auch einen Strahlungsdruck auf den Spiegel aus. Letzteres macht sich beim Spiegel im Badezimmer kaum bemerkbar. Bei winzigen Mikrospiegeln lassen sich solche Effekte aber ausnutzen, um diese zu kühlen.

So findet zur Zeit denn auch ein Rennen um die Einschränkung mechanischer Freiheitsgrade von kleinen Spiegeln oder Kantelevern statt. Solche ihrer thermischen Fluktuationen weitgehend beraubten mechanischen Systeme erlauben neue Anwendungen in der Präzisionsmessung, etwa eine Kraftmessung mit vorher unbekannter Genauigkeit. Sie sind aber auch aus fundamentaler Sicht faszinierend: Auf sehr tiefe Temperaturen gekühlt, würde man bei solchen mechanischen Systemen echte Quanteneffekte sehen. Mechanische Resonatoren bieten somit neue Möglichkeiten, die unscharfe Grenze zwischen Quantenmechanik und klassischer Mechanik auszuloten, und öffnen Türen zu der Welt der Quanten-„Mechanik“.

Kürzlich ist es nun in fünf wichtigen Experimenten gelungen, die Temperatur eines Mikrospiegels mithilfe von Licht um mehr als zwei Größenordnungen zu reduzieren [1–5]. Die Idee ist im Grunde ein-

fach: In Ref. [1] begrenzt ein Spiegel mit einer Masse von wenigen hundert Nanogramm die eine Seite einer Fabry-Perot-Kavität in einer Vakuumkammer, die andere ein regulärer konkaver Spiegel. Ist nun die Eigenfrequenz der Kavität gegenüber der Frequenz eines Pump lasers verstimmt, dann reagiert der Strahlungsdruck sehr empfindlich auf Auslenkungen des Spiegels.

Der Mechanismus erinnert an den der Laserkühlung von Atomen: Das reflektierte Licht ist dopplerverschoben in der Frequenz und erzeugt Seitenbänder im Laserlicht. Wenn nun die Kavität resonant ist mit dem Anti-Stokes-Seitenband des Lasers, gibt die Spiegelmode mehr Energie an das Strahlungsfeld ab. Dies dämpft die Bewegung des Spiegels ohne eine aktive Rückkopplung. Das Licht trägt die Energie davon und spielt so die Rolle des Kühlmittels.

Eine solche Idee experimentell zu realisieren, ist aber noch mit einigen Tücken verbunden. So hängt die effektive Dämpfung für einen mechanischen Freiheitsgrad einer gewissen Frequenz von der Zerfallsrate der Resonatormode ab, die für große mechanische Frequenzen sehr klein sein muss. Für die hohen im Experiment verwendeten Frequenzen muss die Güte der Kavität daher außerordentlich hoch sein. Eine große Herausforderung ist es auch, die Verstimmung stabil zu kontrollieren

und eine starke opto-mechanische Kopplung zu erreichen.

Der von der Gruppe um A. Zeilinger und M. Aspelmeyer verwendete Spiegel besaß eine Reflektivität von 99,6 % und bei einer Frequenz von 280 kHz eine mechanische Güte von $Q=10^4$ [1]. In dieser Arbeit gelang es zu zeigen, dass der Strahlungsdruck die Schlüsselrolle bei der Kühlung spielt. Hier geht die Arbeit [1] über etwas frühere Experimente hinaus [6].

Messbare Erfolge

Darüber hinaus reicht es nicht aus, einen Mikrospiegel auf tiefe Temperaturen abzukühlen: Man muss diesen Effekt auch nachweisen. Tatsächlich lässt sich messen, wie sich der Spiegel bewegt, wenn man das Licht aus der Kavität beobachtet: Wird das Licht phasensensitiv gemessen, ist es möglich, die mittlere Auslenkung des mechanischen Freiheitsgrades abzuschätzen. So gelang es, die Abkühlung eines Spiegels von Raumtemperatur auf weniger als 10 K nachzuweisen [1]. Von einem ähnlichen Erfolg berichten M. Pinard, A. Heidmann und Kollegen [2].

D. Kleckner und D. Bouwmeester haben in einem weiteren Experiment den Ort ausgelesen, um ihn in eine elektronische Rückkopplungsschleife einzuspeisen. Das Signal steuert die Intensität eines zweiten Lasers, der unabhängig ist von dem, der die Photonen der Kavität liefert. So gelang es, noch tiefere Temperaturen zu realisieren [3]. T. J. Kippenberg und seine Gruppe kühlten einen Resonator mit einer deutlich höheren Frequenz von 58 MHz auf die Temperatur von etwa 11 K ab [4]. Schließlich berichtet die Gruppe um N. Mavalvala, dass sie einen Spiegel mit einer Masse von etwa einem Gramm gekühlt hat [5].

Um tatsächlich Quanteneffekte zu beobachten, sind die erreichten Temperaturen aber noch zu hoch. Die Ergebnisse – zusammen mit Experimenten an nano-

WEISSE WESTE

Im Gegensatz zu oft bunt schillernden Käfern besticht der asiatische Blatthornkäfer *Cyphochilus* durch einen blendend weißen Rückenpanzer. Wie jetzt gezeigt wurde, entsteht dieser Effekt durch winzige, nur fünf Tausendstel Millimeter dicke Schuppen auf dem Körper der Tiere, die ein Netzwerk aus zufällig angeordneten Chitin-Filamenten enthalten. Diese füllen das Innere der Schuppen zu etwa 70 % aus und reflektieren bei allen Wellenlängen etwa 65 % des einfallenden Lichtes – daher dieser hohe Weißegrad.



P. Vukusic, B. Hallam und J. Noyes,
Science 315, 348 (2007)

mechanischen Resonatoren in Verdampfungskühlern, die kapazitiv an Einzelelektronentransistoren gekoppelt sind [7] – eröffnen aber neue Perspektiven, in die Quantenwelt vorzustoßen. In der Tat sind die Experimente [1–5] durch Theoriarbeiten [8, 9] inspiriert, die die Möglichkeiten untersuchen, wie Systeme mit Hilfe von Strahlungsdruck ein quantenmechanisches Regime erreichen können. Eine kürzlich erschienene Arbeit von D. Vitali und seinen Kollegen untersucht, welches Regime nötig wäre, um tatsächlich quantenmechanische Verschränkung zu detektieren [10]: Recht hohe Umgebungstemperaturen bei realistischen Parametern lassen dieses Regime experimentell erreichbar erscheinen.

Weitere Theoriarbeiten loten das Potenzial dieser Ideen aus: M. Paternostro et al. gehen zum Beispiel der Frage nach, wie sich quantenmechanische Korrelationen beim indirekten Auslesen durch eine zweite Kavität bemerkbar machen [11]. Arrays von Resonatoren könnten einen Transport von quantenmechanischen Korrelationen erlauben [12]. Vielversprechende Ideen der Laserkühlung mit Hilfe von Quantenpunkten wurden auch auf die Kühlung von mechanischen Resonatoren angewendet [13].

So steht zu erwarten, dass das Rennen, erste Quanteneffekte in den Bewegungsfreiheitsgraden me-

chanischer Systeme zu beobachten, in nicht zu ferner Zukunft gewonnen wird. Auf jeden Fall ist es sehr spannend, mechanische Systeme in einen Zustand zu bringen, der mit dem Lichtfeld oder anderen Systemen in einer Weise korreliert ist, die sich nach den Regeln der klassischen Physik nicht erklären lässt. Darüber hinaus könnte man von einer genauen Quanten-Zustandskontrolle von mechanischen Systemen träumen, etwa mit Anwendungen in der Präzisionsmessung oder gar in der Quanteninformationsverarbeitung, wenn mechanische Systeme als Quantenregister dienen. Auf dem Weg dorthin liegt auf jeden Fall noch viel spannende Physik verborgen.

Jens Eisert

- [1] S. Gigan et al., *Nature* **444**, 67 (2006)
- [2] O. Arcizet et al., *Nature* **444**, 71 (2006)
- [3] D. Kleckner und D. Bouwmeester, *Nature* **444**, 75 (2006)
- [4] A. Schliesser et al., *Phys. Rev. Lett.* **97**, 243905 (2006)
- [5] T. Corbitt et al., *quant-ph/0612154*
- [6] C. Metzger und K. Karrai, *Nature* **432**, 1002 (2004)
- [7] M. D. La Haye et al., *Science* **304**, 74 (2004)
- [8] S. Mancini et al., *Phys. Rev. Lett.* **88**, 120401 (2002)
- [9] M. Pinard et al., *Europhys. Lett.* **72**, 747 (2005)
- [10] D. Vitali et al., *Phys. Rev. Lett.* **98**, 030405 (2007)
- [11] M. Paternostro et al., *quant-ph/0609210*
- [12] J. Eisert et al., *Phys. Rev. Lett.* **93**, 190402 (2004)
- [13] I. Wilson-Rae, P. Zoller und A. Imamolu, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 075507 (2004)

KURZGEFASST

■ Gruppendynamik von Helium-Atomen

1956 zeigten Robert Hanbury Brown und Richard Twiss, dass Photonen von Sternen nicht in rein zufälligen Abständen auf irdische Detektoren treffen, sondern bevorzugt grüppchenweise. Während Bosonen dieses *bunching* aufweisen, halten sich Fermionen aufgrund der Quantenstatistik voneinander fern (*anti-bunching*). Kürzlich ist es gelungen, beide Verhaltensweisen in einem einzigen Experiment mit kalten Helium-Atomen zu beobachten. Verglichen mit einer Zufallsverteilung (Poisson), trafen dabei ^4He -Atome (Bosonen) in unregelmäßigeren, ^3He -Atome (Fermionen) hingegen in regelmäßigeren Abständen auf einen Detektor.
T. Jelts et al., *Nature* **445**, 1038 (2007)

■ Heiße Casimir-Kraft

Bereits 1955 sagte Jewgeni Lifschitz voraus, dass die winzige Casimir-Kraft, die auf Vakuumfluktuationen des elektromagnetischen Feldes beruht, von der Temperatur abhängt. Dies hat nun die Gruppe des Nobelpreisträgers Eric Cornell am NIST in Colorado bestätigt. Dazu brachten sie ultrakalte Rubidiumatome bis auf einige Mikrometer in die Nähe einer Glasoberfläche. Im Einklang mit der Theorie verdreifachte sich die Casimir-Kraft zwischen Glasoberfläche und Atomen, wenn die Temperatur des Glases auf 600 K verdoppelt wurde.
J. M. Obrecht et al., *Phys. Rev. Lett.* **98**, 063201 (2007)