

Der **Physik-Preis 2011** wurde **Frau Eva Weig**, München, in Anerkennung ihrer Arbeiten zur Mechanik von Nanosystemen an der Grenze von Quantenmechanik zur Klassischen Mechanik verliehen.

Nanomechanik: Schwingende Drähte, tausendmal dünner als ein Haar

EVA MARIA WEIG

Wird die Saite einer Gitarre angezupft, so beginnt sie zu schwingen – ein Ton entsteht. Doch was passiert, wenn die Saite etwa zehntausendmal dünner und kürzer ist? Mit dieser und ähnlichen Fragestellungen über mechanische Vibrationen kleinster Objekte beschäftigt sich das Forschungsgebiet der Nanomechanik, das in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht hat.

Was ist ein Nanoresonator?

Typische Forschungsobjekte der Nanomechanik sind winzige Saiten, die zwischen zwei Aufhängepunkten über ein Substrat gespannt sind, wie es auch in der Halbleiterindustrie verwendet wird. Abbildung 1 zeigt ein Beispiel eines solchen „nanomechanischen Resonators“: Mit einer Länge von 35 Mikrometern, einer Breite von 200 Nanometern und einer Dicke von 100 Nanometern misst er nur etwa ein Tausendstel eines menschlichen Haares. Zur Herstellung solcher winzigen Objekte benötigt man daher modernste Reinraumtechnologie. Die Form des Nanoresonators wird im Elektronenmikroskop in eine Lackschicht geschrieben und im Anschluss daran durch eine Kombination verschiedener Ätz- und Abscheidungsverfahren in das Substrat übertragen, so dass eine dreidimensionale Nanostruktur entsteht. Auch zum Betrachten der Nanoresonatoren wird wieder das Elektronenmikroskop verwendet.



Eva Maria Weig, Assistentin am Lehrstuhl für Festkörperphysik an der Ludwig-Maximilians-Universität München, Trägerin des Physik-Preises 2011

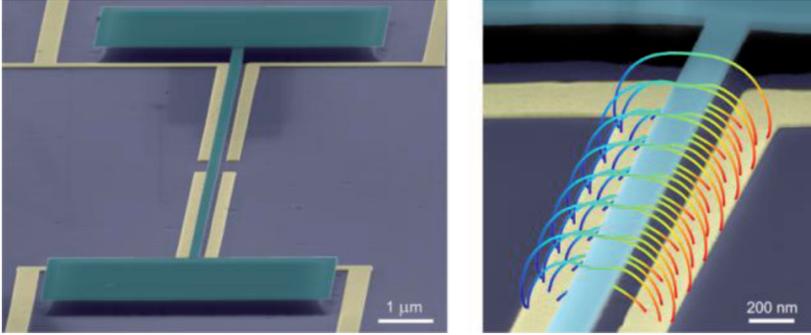


Abbildung 1: Nanomechanischer Resonator. Die in Falschfarben kolorierten Aufnahmen aus dem Elektronenmikroskop zeigen eine Nanosaiten aus zugverspanntem Siliziumnitrid (grün), die freitragend zwischen zwei Aufhängungen über dem Siliziumsubstrat (blau) gespannt ist. Ein menschliches Haar ist etwa tausendmal so groß. Links ist die gesamte Saite abgebildet, rechts ein Ausschnitt um den hinteren Aufhängepunkt. Antrieb und Detektion der Vibration der Saite erfolgen mit Hilfe der ebenfalls sichtbaren Leiterbahnen aus Gold (gelb), zwischen denen ein inhomogenes elektrisches Feld erzeugt wird, wie dies die Feldlinien im rechten Teil der Abbildung verdeutlichen.

Eines der Kernthemen der Nanomechanik beschäftigt sich mit der Frage, wie die winzigen Resonatoren effektiv zum Schwingen gebracht und ihre Bewegung empfindlich nachgewiesen werden können – eine Voraussetzung sowohl für grundlegende Experimente als auch für Anwendungen, etwa in der Sensorik. Innerhalb der letzten Jahre konnte gezeigt werden, dass in diesem Zusammenhang auch das Resonatormaterial eine entscheidende Rolle spielt. Große Erfolge konnten beispielsweise mit Siliziumnitrid, einem glasartigen Isolator, erzielt werden, aus dem sich stark zugverspannte Nanoresonatoren, also richtige Nanogitarrensaiten, herstellen lassen. Die Zugspannung hat zwei positive Aspekte: Zunächst bewirkt sie, dass die Saite schneller schwingt, was ähnlich wie bei einer echten Gitarre unmittelbar zu einem Anstieg der Tonhöhe führt. Die Nanosaiten schwingen allerdings circa 10-millionenmal pro Sekunde hin und her, also mit Eigenfrequenzen im Radiofrequenzbereich weit jenseits des Hörbaren. Ferner kann durch die Zugspannung deutlich mehr Energie in der Saitenschwingung gespeichert werden, so dass eine einmal angezupfte Saite deutlich länger weiter schwingt, bevor die Schwingung abgeklungen ist. Dies äußert sich in einer außergewöhnlich hohen mechanischen „Güte“ der Saitenresonanz – einer der zentralen Kenngrößen nanomechanischer Resonatoren. Mit diesem Maß wird angegeben, wie schnell oder wie langsam die Schwingungsenergie durch Verlust an die Umgebung auf die Hälfte

te gesunken ist. Die mechanische Güte wird ermittelt, indem die in der Schwingung gespeicherte Energie zu der in einer Schwingungsperiode verbrauchten Energie in Relation gesetzt wird. Mit bei Raumtemperatur und in Vakuum gemessenen Werten von zum Teil weit über 100.000 liegen die Güten zugespannter Siliziumnitridresonatoren um mehrere Größenordnungen über herkömmlichen Nanoresonatoren. Somit sind sie für zahlreiche Anwendungen, beispielsweise für das Detektieren kleinster Massen bis hin zu einzelnen Molekülen, aber auch für die Untersuchung fundamentaler Fragen wie der im Folgenden beschriebenen besser geeignet.

Wie untersucht man einen Nanoresonator?

Je höher jedoch die Güte eines Resonators, desto schwieriger wird dessen Handhabung: Vor allem soll nicht bereits beim Antreiben und Auslesen des Resonators die Schwingung nachhaltig beeinflusst werden. Durch jede Schnittstelle zur Umgebung kann der Resonator Schwingungsenergie verlieren, was eine zusätzliche Dämpfung zur Folge hat. Während diese Effekte bei einem Resonator niedriger Güte zu keiner wesentlichen Änderung führen, können sie bei einer zugverspannten Siliziumnitridsaite schnell zum dominanten Energieverlustpfad werden, so dass sich die hohe Güte reduziert. Als Ausweg aus diesem Dilemma hat sich der sogenannte dielektrische Antrieb erwiesen, der im rechten Teil von Abbildung 1 schematisch dargestellt ist [1]. Anders als bei herkömmlichen Antriebsverfahren, wird der Resonator hier nicht direkt elektrisch kontaktiert, sondern lediglich einem elektrisch oder auch optisch induzierten, aber in jedem Fall nur lokal wirkenden Feldgradienten ausgesetzt. Ähnlich wie eine Rutschbahn im Gravitationsfeld, führt dies zu einer Kraftwirkung auf die Saite, die allerdings nahezu reibungsfrei, also ohne zusätzliche Energieverluste funktioniert. Gleichzeitig erlaubt es das Verfahren, jeden einzelnen Resonator auf dem Chip gezielt anzusprechen und effizient zu treiben und sogar seine Schwingungsfrequenz über einen weiten Bereich zu verändern. Umgekehrt kann die dielektrische Kopplung auch zum empfindlichen Auslesen der Saitenbewegung verwendet werden, indem das lokal modifizierte Gradientenfeld an einen elektrischen Mikrowellenschwingkreis oder eine optische Kavität gekoppelt wird, um so die Messempfindlichkeit weiter zu erhöhen. Sogar ohne zugeschalteten Antrieb können die Saiten so, allein aufgrund ihrer thermischen Bewegung bei Raumtemperatur, in ihrem Schwingungsverhalten untersucht werden [2].

Das Frequenzspektrum eines nanomechanischen Resonators mit hinreichend starker Zugspannung unterscheidet sich praktisch nicht von dem

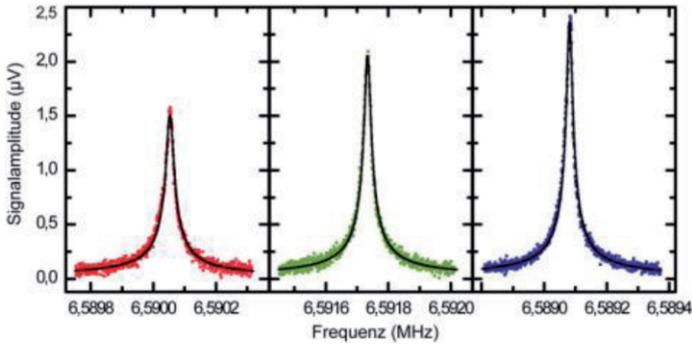


Abbildung 2: Optomechanisches Kühlen und Treiben. Der Nanoresonator erfährt durch die Wechselwirkung mit rot beziehungsweise blau verstimmtten Lichtteilchen in einer optischen Kavität eine Kraft, die ihn bremst oder antreibt. Im Zentrum ist die ungestörte Resonanzkurve der Grundmode eines Nanoresonators (grün) dargestellt. Der linke bzw. der rechte Teil der Abbildung zeigt den Effekt des optomechanischen Kühlens (rot) bzw. Treibens (blau).

einer makroskopischen Gitarrensaiten: Die Eigenfrequenz der Grundmode ist durch die Abmessungen des Resonators, insbesondere seiner Länge, sowie von Materialeigenschaften und der Höhe der Zugspannung bestimmt (vgl. auch Abbildung 2, Mitte). Bei der doppelten Schwingungsfrequenz befindet sich die zweite, bei der dreifachen Frequenz die dritte Harmonische und so weiter. Auf diese Art und Weise kann das Obermodenspektrum bis jenseits der zehnten Harmonischen untersucht werden. Bei einem Resonator der halben Länge findet sich ein äquivalentes Modenspektrum, allerdings mit den doppelten Eigenfrequenzen. Erst bei sehr starkem Antrieb und den damit verbundenen großen Schwingungsamplituden treten weitere, nichtlineare Effekte auf.

Insgesamt sind Herstellung und Dynamik der Siliziumnitridresonatoren inzwischen gut verstanden. Sie können reproduzierbar und genau nach Vorlage hergestellt, gezielt angesteuert und präzise vermessen werden, wobei ihre Eigenfrequenzen sich genau vorhersagen lassen. Dies erlaubt nun im nächsten Schritt, komplexere Fragestellungen anzugehen und etwa die Kopplung eines Resonators an das Lichtfeld einer optischen Kavität zu untersuchen, in der Photonen hin- und herzirkulieren. Ein solches Experiment zeigt Abbildung 2. In derartigen optomechanischen Systemen kann die Kraft, die die Lichtteilchen auf die Saite ausüben, dazu genutzt werden, die Schwingung gezielt anzutreiben und unter Umständen sogar die Dämpfung des Resonators komplett auszuschalten [3]. Umgekehrt kann der Re-

sonator durch die lichtinduzierten Kräfte auch so weit gedämpft und abgebremst werden, dass er fast zum Stillstand kommt. Da die Schwingungsenergie nach dem Gleichverteilungssatz der Thermodynamik ein Maß für die Temperatur ist, erlaubt dies eine Verringerung der Temperatur einer Schwingungsmode weit unter die Umgebungstemperatur.

Auf dem Weg zur Quantennanomechanik

In Zukunft soll dieses optomechanische Kühlen den Weg zu neuen Experimenten weisen, in denen sich der nanomechanische Resonator anders als bisher nicht mehr als klassisches System beschreiben lässt, sondern den Gesetzen der Quantenmechanik gehorcht. Dies ist möglich, falls die Experimente bei sehr tiefen Temperaturen durchgeführt werden. Während ein klassischer Nanoresonator sich wie ein hin- und herschwingendes Pendel verhält, in dem Schwingungs- und potentielle Energie auf dem Weg von seinem Nulldurchgang zum Ort maximaler Auslenkung kontinuierlich ineinander umgewandelt werden, sind beim quantenmechanischen harmonischen Oszillator, wie in Abbildung 3 dargestellt, nur noch bestimmte Energiewerte erlaubt – die Energie ist quantisiert. Dies bedeutet, dass die Schwingungsposition eines quantenmechanischen Resonators nicht mehr genau angegeben werden kann: Die Auslenkung der schwingenden Saite befindet sich in einer sogenannten Superposition, also an mehreren Orten zugleich. Selbst

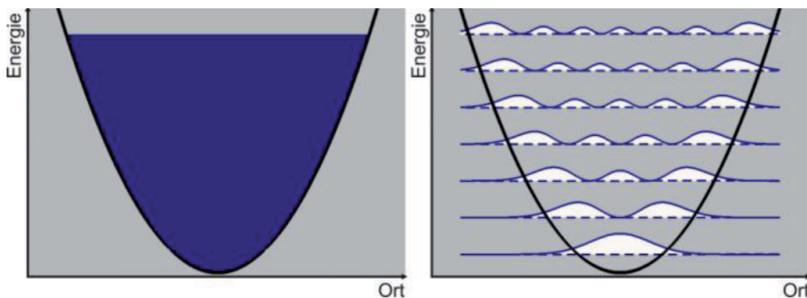


Abbildung 3: Links: Klassischer harmonischer Oszillator. Rechts: Quantenmechanischer harmonischer Oszillator. Die blauen Linien verdeutlichen die erlaubten Energieniveaus. Die weißen Flächen entsprechen den Aufenthaltswahrscheinlichkeiten als Funktion des Orts. Auch am absoluten Nullpunkt der Temperatur besitzt ein quantenmechanischer Oszillator Energie und führt Nullpunktsfluktuationen durch, wie an der breit verteilten Aufenthaltswahrscheinlichkeit des energetisch niedrigsten Zustands zu erkennen ist.

am absoluten Nullpunkt der Temperatur steht ein quantenmechanischer Resonator dann nicht still: Da der kleinste zulässige Wert der Schwingungsenergie ungleich null ist, bewegt sich der Resonator noch immer und führt so genannte Nullpunktsfluktuationen durch. Dieser quantenmechanische Grundzustand stellt einen klaren Widerspruch zu den Erwartungen der klassischen Physik dar, liefert jedoch eine vollkommen richtige Beschreibung der Natur: Für einzelne Atome oder Lichtteilchen wurden quantenmechanische Effekte bereits vor Jahrzehnten experimentell nachgewiesen. Für größere Objekte widersprechen die Postulate der Quantenphysik allerdings nach wie vor unserer Intuition.

Der Nachweis quantenmechanischen Verhaltens eines zwar nanoskaligen, jedoch aus Milliarden von Atomen zusammengesetzten und somit makroskopischen quantenmechanischen Nanoresonators kann also dabei helfen, die Grenzen der Quantenmechanik auszuloten. Innerhalb der vergangenen 24 Monate gelang es ersten Forschungsgruppen, dieses wissenschaftliche Neuland zu betreten und in das Regime der „Quantenmechanik“ vorzustoßen [4–6]. So konnte inzwischen gezeigt werden, dass nanomechanische Resonatoren tatsächlich in ihren quantenmechanischen Grundzustand versetzt werden können. Zahlreiche fundamentale Fragestellungen bleiben jedoch noch offen: Wie lassen sich komplexere Quantenzustände erzeugen und wieder auslesen? Können mehrere Resonatoren quantenmechanisch miteinander verschränkt werden, so dass die Messung des einen den Zustand des anderen vorgibt? Wie kann die Quanteninformation möglichst lange in einem Nanoresonator gespeichert werden? Und schließlich: Können nanomechanische Resonatoren in Zukunft sogar von Nutzen für die Quanteninformationstechnologie, etwa als Bus zwischen ortsfesten und mobilen Quantenbits, sein? Die Untersuchung nanomechanischer Resonatoren an der Grenze zwischen klassischer und Quantenmechanik wird also auch in den nächsten Jahren ein Forschungsfeld bleiben, das von sich hören lassen wird.

Literatur

- [1] Q. P. Unterreithmeier, E. M. Weig, J. P. Kotthaus, *Universal transduction scheme for nanomechanical systems based on dielectric forces*, Nature 458, 1001 (2009).
- [2] T. Faust, P. Krenn, S. Manus, J. P. Kotthaus, E. M. Weig, *Microwave cavity-enhanced transduction for plug and play nanomechanics at room temperature*, Nature Communications 3, 728 (2012).
- [3] G. Anetsberger, O. Arcizet, Q. P. Unterreithmeier, E. M. Weig, J. P. Kotthaus, T. J. Kippenberg, Nature Physics 5, 909 (2009).

- [4] A. D. O'Connell *et al.*, *Laser cooling of a nanomechanical oscillator into its quantum ground state*, Nature 464, 697 (2010).
- [5] J. D. Teufel *et al.*, *Sideband cooling of micromechanical motion to the quantum ground state*, Nature 475, 359 (2011).
- [6] J. Chan *et al.*, *Laser cooling of a nanomechanical oscillator into its quantum ground state*, Nature 478, 89 (2011).