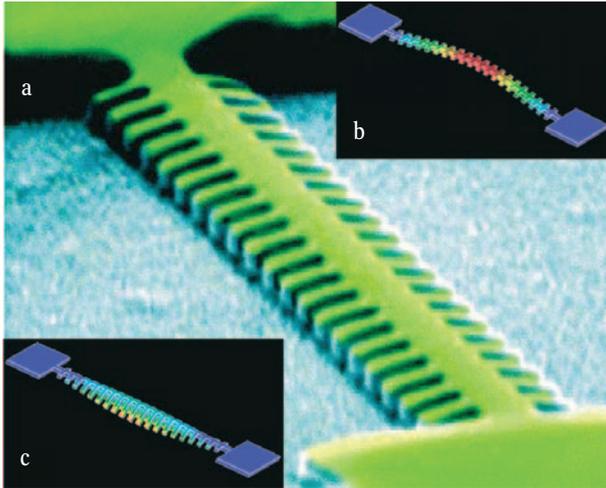


Quantisiertes Schalten

Angetrieben von der fortschreitenden Miniaturisierung elektronischer Bauelemente, lassen sich mit den hoch entwickelten Techniken der Halbleiterfertigung auch mechanische oder genauer Nano-Elektromechanische Systeme (NEMS) realisieren. Die Integration eines mechanischen Freiheitsgrades auf der Nanometerskala würde nicht nur schnelle Schalter für die Kommunikationstechnik ermögli-



Bei dieser „Doppel-Kamm-Struktur“ (a) lassen sich Eigenschwingungen in der Grundmode (20 MHz, b) und in einer komplexen Kollektivmode (1,5 GHz, c) beobachten. Damit kommen quantisierte mechanische Bewegungen in greifbare Nähe. (aus [2])

chen, sondern es auch erlauben, die quantenmechanischen Eigenschaften solcher mechanischer Elemente bei tiefen Temperaturen zu untersuchen [1]. Der Arbeitsgruppe von Raj Mohanty (Universität Boston) ist es nun gelungen, einen mechanischen Resonator mit einer Eigenfrequenz von 1,5 GHz zu bauen, der quantisierte mechanische Bewegungen in greifbare Nähe rückt [2].

Die Anwendungen eines solchen Resonators sind nicht nur auf GHz-Schalter und Filterelemente beschränkt, sondern umfassen auch die Sensorik. Dabei ist vor allem das Verhältnis zwischen Oberfläche und Volumen entscheidend, denn auf der Nanometerskala diktiert im Wesentlichen die Oberfläche die Funktionalität eines Sensors. Im Hinblick auf die Massensensorik ermöglichen es beispielsweise typische NEMS bei einer Masse in der Größenordnung von Femto- bis hinunter zu Attogramm, Massenänderungen im Bereich von einigen Zeptogramm (10^{-21} g) nachzuweisen. Daraus resultiert die spannende Frage, inwieweit sich quantenme-

chanische Nullpunktsschwingungen für die Sensorik verwenden lassen. Diese zunächst esoterisch anmutende Frage gewinnt an Bedeutung, wenn man den Sensor abkühlen kann, wie es es z. B. bei Bolometern der Fall ist. Dann regen Moleküle, die auf den Resonator treffen, einzelne Phononen an, die sich nachweisen lassen. Solch kontrollierte Messungen sind für viele Bereiche interessant: So lassen sich NEMS auch als Nano-Kristalle verstehen, deren thermodynamischen Eigenschaften aufgrund der geringen Abmessungen stark von dem Verhalten eines makroskopischen Kristalls abweichen. Dies gilt beispielsweise für die Wärmekapazität, sobald die lateralen Abmessungen in die Größenordnung der phononischen Wellenlängen kommen. Hinsichtlich des Quantencomputing zeigen jüngste theoretische Untersuchungen [3], dass NEMS möglicherweise die Messung von geometrischen Phasen gestatten. Eine wichtige Anwendung nanomechanischer Resonatoren ist auch die Detektion von Auslenkungen im sub-Angström-Bereich, d. h. im Quantenlimes. Derzeit wird spekuliert, ob sich mit solchen Detektoren auch Gravitationswellen nachweisen lassen könnten.

Für die Frage, ob sich NEMS klassisch oder quantenmechanisch verhalten, ist die Größe $k_B T/hf \sim N$ entscheidend. Hierbei bezeichnen h die Plancksche und k_B die Boltzmann-Konstante, f die Eigenfrequenz des Systems und T die Temperatur. Mit N als thermischer Besetzungszahl erreicht man das quantenmechanische Limit im Fall $N \rightarrow 1$, d. h. bei möglichst hohen mechanischen Eigenfrequenzen. Bedenkt man, dass 1 GHz etwa 50 mK entsprechen, sollte sich mit dem NEMS von Mohanty quantenmechanisches Verhalten unterhalb von 100 mK nachweisen lassen.

In ihrem Experiment hat die Gruppe folgenden Weg eingeschlagen: Ein herkömmlicher Balken-Resonator von mehreren Mikrometern Länge wurde wie ein beidseitiger Kamm mit kleinen Stegen ($500 \times 200 \text{ nm}^2$) versehen, um so nicht nur einige mechanische Grundmoden, sondern auch komplexere Moden bei höheren Eigenfrequenzen im GHz-Bereich anzuregen (Abb.). Die Schwierigkeit des Experiments besteht letztlich darin, einen Resonator mit einer mechanischen Eigenfrequenz im GHz-Bereich zu bauen bei gleich-

zeitig möglichst großer Amplitude. Dies scheint den Autoren mit ihrem Entwurf gelungen zu sein. Sie analysierten mittels magnetomechanischer Anregung das Schwingungsverhalten des Systems. Hierfür versehen sie den Silizium-Resonator mit einer Goldschicht, um so eine Impedanzanpassung an den elektrischen Schaltkreis zu erreichen. Dann prägen sie dem Balken ein hochfrequentes Wechselstromsignal auf, welches in einem starken Magnetfeld eine Lorentz-Kraft verursacht. Die resultierende Auslenkung im Magnetfeld wiederum erzeugt eine elektromotorische Kraft, die eine detektierbare Spannung induziert. Natürlich verringert die 60 nm dünne Goldschicht die maximal erreichbaren Eigenfrequenzen. Dennoch gelang es den Autoren, neben einer Grundmode um die 20 MHz Eigenschwingungen bei 1,5 GHz zu beobachten. Gaidarzhly et al. gehen davon aus, dass es sich um eine komplexe Kollektivmode handelt. Allerdings ist nicht auszuschließen, dass die Autoren eine gekoppelte Mode gemessen haben, bei welcher die Aufhängung des Resonators mitschwingt. Dieses nichtlineare Verhalten legt gerade die Resonanzform selbst nahe.

In jedem Fall sind die Resonanzen bei 1,5 GHz eindeutig mechanischen Ursprungs, sodass der Nachweis von quantenmechanischem Verhalten möglich sein sollte. Dies haben die Autoren versucht, indem sie die zeitliche Variation der hochfrequenten Mode beobachteten. Dabei zeigte sich, dass das System zwischen zwei definierten Zuständen mit Schaltzeiten in der Größenordnung von Minuten hin- und herschaltet. Als Erklärung nehmen die Autoren an, dass sich diese beiden Zustände durch ein einzelnes Phonon unterscheiden. Bei solch tiefen Temperaturen sind die Relaxationszeiten der Phononen in der Tat sehr groß, allerdings kann es sich beim beobachteten Schaltphänomen auch um nichtlineare Effekte handeln, die schon bei relativ kleinen Amplituden auftreten können.

Nach diesem Nachweis von mechanischen GHz-Resonanzen sind jetzt genauere Messmethoden erforderlich, um die Unschärferelation $\Delta p \Delta x > h$ direkt nachzuweisen und damit auch alle Zweifel daran auszuräumen, dass quantisierte mechanische Schwingungen beobachtet wurden. Erste Messungen hierzu liegen bereits vor, allerdings

für $N \sim 50$ [4]. Im Wesentlichen kombinieren alle drei Experimente das Einzel-Elektronen-Tunneln in verschiedenen Ansätzen mit mechanischen (phononischen) Schwingungszuständen. Die weitere Suche nach zeitaufgelösten Einzel-Phononen-Schwingungen und quantisierten mechanischen Eigenschaften bleibt also in jedem Fall spannend.

ROBERT H. BLICK

- [1] E. M. Weig und R. H. Blick, Physik Journal, Februar 2003, S. 20
- [2] A. Gaidarzhy et al., Phys. Rev. Lett. **93**, 030402 (2005)
- [3] A. V. Chaplik und R. H. Blick, New J. Phys. **6**, 33 (2004)
- [4] R. G. Knobel und A. N. Cleland, Nature **424**, 291 (2003); M. D. LaHaye et al., Science **304**, 74 (2004); E. M. Weig et al., Phys. Rev. Lett. **92**, 046804 (2004)

Kritische Lawinen im Gehirn

Physik neuronaler Netze im neuen Gewand: Aktivitätslawinen in der Großhirnrinde lassen sich mit Sandhaufenmodellen beschreiben

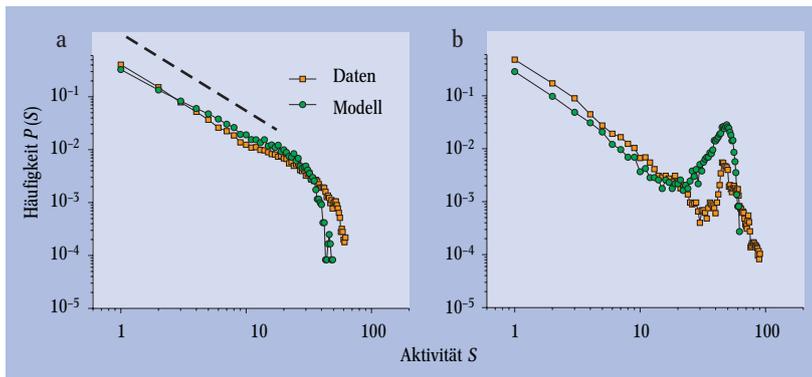
Erst seit kurzem haben wir gesicherte Erkenntnisse über Träume von Tieren: Ratten, die lernen sich in einem Labyrinth zurechtzufinden, träumen nachts von den tagsüber genommenen Wegen [1]. Ein einfacher Trick macht dies beobachtbar: Durch einen Vergleich der zeitlichen Sequenzen großräumiger Aktivitätsmuster des Rattenhirns läßt sich eine Traumsequenz eindeutig einem realen Weg im Labyrinth zuordnen. Jedesmal wenn eine Ratte einen bestimmten Weg durch das Labyrinth läuft, tritt eine spezifische Reihenfolge von neuronalen Aktivitätsmustern auf. Dieselben zeitlichen Folgen findet man wieder, wenn die Ratte schläft: Die Ratte „träumt“ von den Wegen im Labyrinth. Sogar der genaue „geträumte Ort“ der Ratte im Labyrinth ist dann anhand der Messung der Hirnaktivität feststellbar.

Angesichts solch spektakulärer Ergebnisse ist es nicht erstaunlich, daß die experimentelle Messung großräumiger Anregungsmuster des Gehirns derzeit geradezu einen Siegeszug vollführt, wobei die Meßmethoden von Multielektroden (wie im obigen Beispiel) bis zur Kernspintomographie reichen. Ähnliche Experimente am Menschen in Verbindung mit Kognitionsstudien verändern gegenwärtig wie kaum eine andere Methode unser Ver-

ständnis des Gehirns. Während die Messung der Aktivität großräumiger Kortextbereiche für sich genommen vor allem phänomenologischen Charakter hat, bietet ihre statistische Betrachtung überraschende Zugänge zu grundlegenden Fragen der Vernetzung und der Dynamik des Nervengewebes. So haben Langzeitmessungen interessante statistische Eigenschaften kortikaler Aktivität aufgezeigt. Ein Beispiel ist die Eigendynamik der Großhirnrinde einer Ratte. Dünne Scheiben von Rattenhirngewebe sind auch außerhalb des lebenden Tiers, beliefert mit Sauerstoff und Nährstoffen, viele Tage lebensfähig und verhalten sich weitgehend wie ein Teil eines lebenden Gehirns. Langzeitmessungen mit einem 60-Elektroden-Array an einer so kultivierten Rattenhirnprobe belegen eine andauernde Eigenaktivität [2]. Jede Elektrode zeigt die Aktivität einer Neuronengruppe in ihrer Umgebung an, und die Gesamtheit der Elektroden geben jeweils eine Momentaufnahme gleichzeitig aktiver Neuronengruppen an. Die Abfolge solcher Momentaufnahmen, quasi ein „Blinkmuster“ wechselnd aktiver Neuronengruppen,

aller Größenordnungen auf seinen Flanken. Die Verteilung von Lawinengrößen der neuronalen Aktivitätslawinen zeigt ein entsprechendes Skalenverhalten. Zum zweiten zeigen die Messungen wiederkehrende metastabile Anregungsmuster, die den Gedächtnisreihenfolgen der Ratten im Labyrinth ähneln. Diese Beobachtungen deuten auf Grundmechanismen der Dynamik von Neuronengruppen und ihrer Rolle beim Gedächtnis hin.

Physiker an der Indiana Universität, die teilweise auch an der experimentellen Studie beteiligt waren, haben nun ein Modell vorgeschlagen, mit dem sich die Beobachtungen quantitativ modellieren und daraus Hypothesen über die Arbeitsweise des Gedächtnisses ableiten lassen [3]. Ausgangspunkt war die Beobachtung, daß die experimentell gefundene transiente Neuronendynamik einem kritischen Verzweigungsprozeß ähnelt, daß also das „Feuern“ einer Neuronengruppe im Mittel genau eine weitere Gruppe aktiviert. Ein unterkritischer Prozeß, bei dem im Mittel weniger als eine weitere Gruppe aktiviert wird, würde schnell zur Ruhe



Verteilung der Lawinengrößen neuronaler Aktivität S in Experiment und Modell. S bezeichnet die Zahl der Neuronengruppen, die an einer Aktivitätslawine teilnehmen (= Zahl der aktiven Elektroden). In normalem Gewebe (a) nimmt die Häufigkeit von Aktivitätslawinen mit einer Potenz der Größe, $P(S) \propto S^{-3/2}$, und

in Übereinstimmung mit einem Modell mit kritischer Dynamik ab. Unter dem Einfluß einer Droge (Picrotoxin), die zu erhöhter Aktivitätsweiterleitung führt, bildet sich ein Maximum bei einer mittleren Lawinengröße von 50 heraus (b), das von einem Modell im überkritischen Bereich wiedergegeben wird.

bezeichnet man als Aktivitätslawine. Diese endet früher oder später, bis durch spontane Aktivität eine neue Lawine gestartet wird. Die beobachteten Aktivitätslawinen zeigen zwei charakteristische statistische Signaturen [2]: Zum einen variiert die Lawinengröße über einen weiten Bereich, ähnlich wie dies von Sandhaufenmodellen her bekannt ist. Ein Sandhaufen, der wie in einer Sanduhr von oben her beschickt wird, baut einen kritischen Schüttwinkel auf und zeigt dann Lawinen

kommen, während ein überkritischer Prozeß, bei dem eine aktive Neuronengruppe mehr als eine weitere Gruppe triggert, schnell zu einer systemweiten Ausbreitung jeder Anregung führen würde (ähnlich einer Kettenreaktion in der Kernspaltung). Das Modell stellt den Aktivierungszustand der Neuronengruppen mit binären Zustandsvariablen dar (feuern oder inaktiv), die sich über einen sog. Perkulationsprozeß gegenseitig aktivieren. Die Wechselwirkungsnachbarschaft

Prof. Robert H. Blick, Laboratory for Molecular Scale Engineering, Electrical and Computer Engineering, University of Wisconsin-Madison, 1415 Engineering Drive, Madison WI, USA