

## WALTER-SCHOTTKY-PREIS

# Hybride Nanoröhren

**Kohlenstoff-Nanoröhren sind hybride Quantenschaltkreise zwischen Nanomechanik, Nanoelektronik und Nanooptik.**

Andreas K. Hüttel

Hybride Bauelemente vereinen verschiedenste Technologien, Mechanismen oder Materialien, um die jeweils besten Eigenschaften auszunützen. An der Grenze zwischen makroskopischer Physik und molekularer Nanotechnologie eignen sich Kohlenstoff-Nanoröhren für solche Ansätze besonders. Ihre elektronischen und mechanischen Eigenschaften hängen eng miteinander zusammen, was insbesondere bei tiefen Temperaturen neue technische Entwicklungen ermöglicht. Beispiele sind die schnelle Kontrolle quantenmechanischer Zustände und die lange Speicherung von Quanteninformation, bis hin zum „nano-elektromechanischen Quantencomputer“.

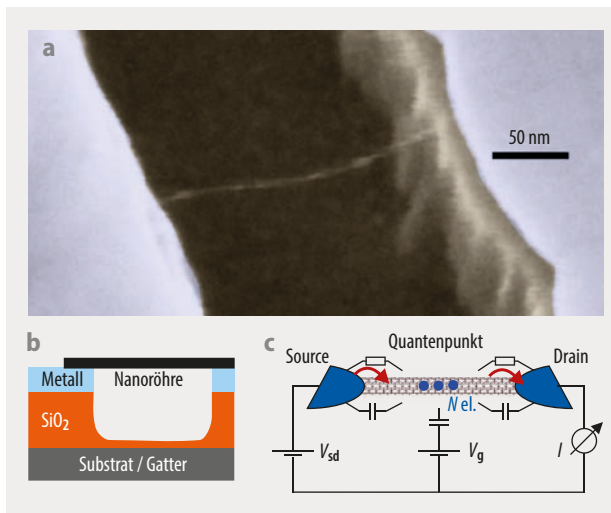
Der aus dem Griechischen stammende Begriff „Hybrid“ bezeichnet eine „Kreuzung“ oder „Mischform“. In der Biologie sind beispielsweise Maultier und Maulesel die natürlichen Kreuzungen von Pferd und Esel. Allgemeiner kommt der Begriff in Wissenschaft und Technik zum Einsatz – von der hybriden Armbanduhr, die eine analoge und eine digitale Anzeige kombiniert, bis zum Hybridunterricht der Schule, der digitale Elemente und Präsenzunterricht vereint. Bekannt ist auch der „Plug-In-

Hybrid“ als Auto mit Verbrennungs- und Elektromotor, das sich sowohl mit Benzin betanken als auch an der Steckdose aufladen lässt.

In der Nanotechnologie sind in hybriden Bauelementen verschiedene Mechanismen, Technologien oder unterschiedliche Materialien und Materialtypen kombiniert. Typische Beispiele sind die Kombination von Supraleiter- und Halbleiter-Elementen, von organischen und anorganischen Materialien, von Mechanismen aus Biologie und Festkörperphysik oder Optik und Elektronik. Arbeitsgruppen und Forschungszentren weltweit arbeiten daran, die Eigenschaften von Bauelementen zu optimieren und neue Funktionalitäten zu entwickeln – durch die Kombination verschiedenster Teile, die einzeln auf unterschiedliche Weise glänzen. Entsprechende Zentren in Deutschland finden sich etwa in München (Nanosystems Initiative Munich) oder in Hamburg (Center for Hybrid Nanostructures).

## Vielfalt im Sechseck

Kohlenstoff-Nanoröhren sind röhrenförmige Makromoleküle aus Kohlenstoffatomen, die im Sechseckmuster angeordnet sind. Sie sind seit vielen Jahren als vielfältiges



**Abb. 1** Eine Nanoröhre kreuzt einen Graben zwischen zwei Elektroden (a, b). In ihr entsteht ein Quantenpunkt, eine leitfähige Insel, die durch Tunnelbarrieren an Zuleitungen angekoppelt ist (c).

Material bekannt. Auf der mechanischen Seite kombinieren sie enorme Zugfestigkeit und Stabilität mit niedriger Masse und einem ungewöhnlichen Längenverhältnis. Die teils zentimeterlangen Röhren haben einen typischen Durchmesser von nur wenigen Nanometern.

Auch die elektronischen Eigenschaften von Kohlenstoff-Nanoröhren sind außergewöhnlich. Eine Nanoröhre ist anschaulich eine Ebene Graphen mit ihren hexagonal angeordneten Kohlenstoffatomen, die in sich zusammengerollt und verbunden wird. Die Röhre „erbt“ teilweise die Eigenschaften von Graphen; je nach präziser Struktur ist sie metallisch oder halbleitend. Sauberes, defektfreies Wachstum, ihre freie Aufhängung zwischen zwei Kontaktelektroden, um Oberflächeneffekte zu vermeiden (Abb. 1), und das Fehlen von Kanten und ungesättigten Bindungen, die zu undefinierten Randbedingungen führen könnten, machen Kohlenstoff-Nanoröhren zu exzellenten quantenmechanischen Modellsystemen.

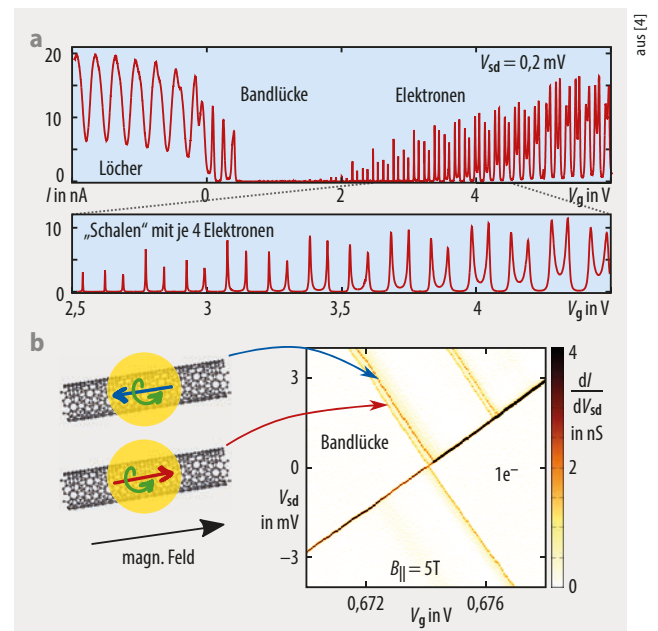
Vor diesem Hintergrund verwundert es nicht, dass sie inzwischen vielfach Anwendung finden. Ihre mechanischen Eigenschaften werden in kugelsicheren Westen genutzt, aber auch in Fahrradrahmen oder Surfbrettern. Kürzlich gelang es, einen ersten RISC-V-Prozessorchip mit Nanoröhren als halbleitenden Transistorelementen zu bauen – mit einer Komplexität, die prinzipiell ermöglicht, ein modernes Betriebssystem auszuführen [1]. Auch als exzellent leitende metallische Verbindungselemente finden Nanoröhren vielfältigen großtechnischen Einsatz, beispielsweise in Handyakkus.

### Sukzessive abgekühlt

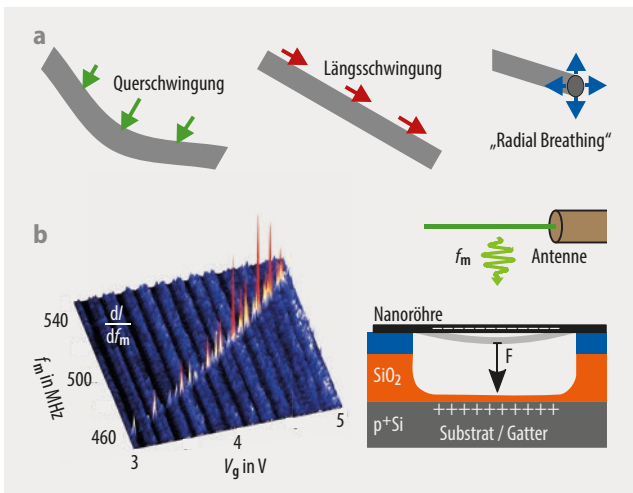
In der Nanotechnologie und Tieftemperaturphysik gibt es ein ähnlich weites Spektrum von Forschungsergebnissen [2, 3], zu dem wir in Regensburg in vielerlei Hinsicht beigetragen haben. Konkret bilden Kohlenstoff-Nanoröhren bei tiefen Temperaturen Quantenpunkte, also Fallen, in denen einzelne Elektronen gefangen sind (Abb. 1). Eine Nanoröhre hat eine sehr geringe Kapazität, sodass vergleichsweise viel

Energie nötig ist, um sie elektrisch aufzuladen. Ein Stromfluss durch die Nanoröhre bedeutet jedoch das Be- und spätere Entladen mit mindestens einem Elektron. Ist hierzu bei tiefen Temperaturen nicht genügend Energie vorhanden, kann kein Strom fließen. Diese Coulomb-Blockade ist eine direkte Konsequenz der Quantisierung der elektrischen Ladung. Nur bei bestimmten Werten des elektrostatischen Potentials können Elektronen mit der Umgebung ausgetauscht werden. Die Transportspektroskopie beschäftigt sich damit, aus diesem Verhalten auf die Eigenschaften des Elektronensystems zurückzuschließen (Abb. 2) [5, 2]. Wie in der Hülle eines Atoms sind die elektronischen Zustände in einem Quantenpunkt diskret, mit Quantenzahlen wie Bahndrehimpuls und Spin. Solche Zustände gelten als mögliche Kandidaten für Qubits und Quantenregister zur Informationsverarbeitung.

Auf der mechanischen Seite lassen sich die Schwingungen einer einzelnen frei aufgehängten, saitenartigen Kohlenstoff-Nanoröhre untersuchen. Ihre einfachste Schwingungsmoden ist über den Vergleich mit einer Klavier- oder Gitarrensaite leicht zu identifizieren (Abb. 3) [7, 8]. Die Querschwingung der gesamten Nanoröhre besitzt die niedrigste Resonanzfrequenz, genau wie wir sie von makroskopischen angeschlagenen oder gezupften Saiten kennen. Leicht und gleichzeitig sehr zugsteif schwingen die Nanoröhren jedoch deutlich schneller; für typische Längenskalen eines Bauelements von 1 µm liegen die Grundfrequenzen bei etwa 100 MHz. Zusätzlich existieren Schwingungsmoden mit höheren Frequenzen wie die Längsschwingung und die „Radial Breathing Mode“, bei welcher der Radius der Röhre oszilliert (Abb. 3). Sinkt die Umgebungstemperatur sukzessive ab, frieren diese Schwingungen quantenmechanisch



**Abb. 2** Beim Aufladen mit vielen Elektronen durch Variieren der Gatterspannung zeigt sich die Schalenstruktur des Quantenpunkts als „künstliches Atom“ (a). Der Leitwert oszilliert zwischen Coulomb-Blockade und Einzelelektronentunneln. Messungen des differentiellen Leitwerts (b) bei endlicher angelegter Spannung zwischen Source- und Drain-Elektrode erlauben es z. B., die Anregungszustände eines einzelnen Elektrons im Leitungsband zu untersuchen.



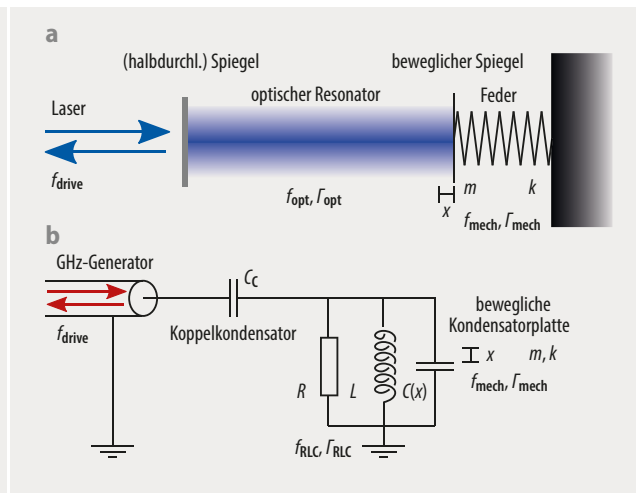
**Abb. 3** Eine Nanoröhre besitzt verschiedene Schwingungsmoden (a). Wird sie elektrisch angetrieben, wachsen mit höherer Gatterspannung die statische Auslenkung der Röhre, ihre mechanische Spannung und die Resonanzfrequenz der Querschwingung (b).

aus. Bei passend gewählten Parametern gibt es für die einzig verbleibende Querschwingung kaum noch Gelegenheit, ihre Schwingungsenergie abzugeben. Die Querschwingung einer isolierten Nanoröhre erfolgt so fast dämpfungsfrei. Bei Schwingungsperioden von 40 Nanosekunden betragen die Abklingzeiten beispielsweise 0,1 Sekunde.

### Hilfreiche Optomechanik

Ein sehr langlebiges, kohärent mechanisch schwingendes System, einzelne gefangene Elektronen, die sich mit elektrischen Feldern schnell und effizient manipulieren lassen – diese Kombination klingt nach einem vielversprechenden Rezept für quantenmechanische Bauelemente oder sogar Quanteninformationsverarbeitung. In der Tat existiert ein detaillierter theoretischer Vorschlag für mechanische Qubits [9], in welchem Zustände der Nanoröhren-Querschwingung kombiniert mit gefangenen Elektronen dazu dienen, Quanteninformation zu speichern und zu manipulieren. Aber wie ist es möglich, den Schwingungszustand gleichzeitig effizient und schnell zu initialisieren, zu koppeln, zu manipulieren und auszulesen, ohne das nanoelektromechanische System anzutreiben bzw. zu heizen? Die Bilder von „Quantencomputern“ der Firmen Google oder Microsoft zeigen oft die Kühlsysteme – Entmischungskryostaten –, welche die Elektronik bei einer Temperatur von wenigen Millikelvin über dem absoluten Nullpunkt halten, um mit wohldefinierten, nichtklassischen Zuständen arbeiten zu können. Ein kräftiges, unkontrolliertes Antreiben der Schwingung wäre also kontraproduktiv. Dennoch muss es möglich sein, Schwingungszustände effizient und gezielt zu manipulieren.

Hier helfen Konzepte aus der Optomechanik [10, 11]. Dort wird die Kopplung zwischen einem Strahlungsfeld in einem optischen Resonator und einem mechanischen System untersucht. Das prototypische, inzwischen sehr gut erforschte Modell der Optomechanik ist ein aus zwei Spiegeln gebildeter Laser-Resonator, bei dem einer der beiden



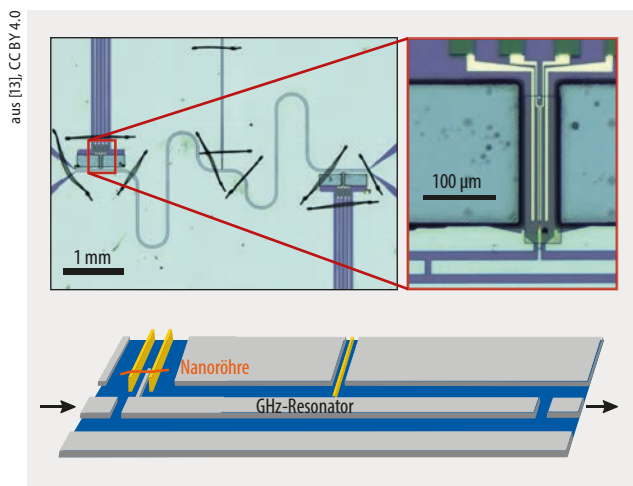
**Abb. 4** Für optische Frequenzen und Mikrowellen existieren äquivalente optomechanische Modellsysteme: Einem beweglichen Spiegel eines optischen Resonators (a) entspricht eine bewegliche Kondensatorplatte eines elektronischen Schwingkreises (b).

Spiegel beweglich aufgehängt ist und schwingen kann (**Abb. 4**). Die Bewegung des Spiegels verändert die Länge des optischen Resonators und koppelt darüber Optik und Mechanik. Die gleiche Physik findet sich über viele Größenordnungen in sehr unterschiedlichen experimentellen Systemen – vom Laserinterferometer zur Gravitationswellendetektion bis hin zu einzelnen Ionen in optischen Fallen. Methoden der Optomechanik erlauben es, die Bewegung einer Schwingungsmode hochsensitiv zu detektieren, sie gezielt zu kühlen und zu manipulieren [10, 11]. Für viele Systeme ist die Technologie so weit fortgeschritten, dass sich damit größere Objekte in den quanten-„mechanischen“ Grundzustand versetzen lassen.

### Passend moduliert

Was behindert also optomechanische Experimente mit einer Kohlenstoff-Nanoröhre, den in ihr gefangenen Elektronen und ihren Quantenzuständen? Zuerst einmal ist sichtbares Licht viel zu energiereich und kann zum Beispiel Elektronen vom Valenz- ins Leitungsband anregen. Wir brauchen niedrigere Frequenzen aus der Mikrowellen-Optomechanik [11, 12]. Hier tritt Elektronik an die Stelle der Optik. Aus optischen Resonatoren werden supraleitende elektronische Schwingkreise, oft lithographisch auf einer Chipoberfläche definiert und mit Resonanzfrequenzen von 4 bis 8 GHz. Die Resonanzfrequenz eines elektronischen Schwingkreises ist durch seine Induktivität und Kapazität gegeben. Ein mechanisches Element wird nun so platziert, dass seine Bewegung die Kapazität des Schwingkreises moduliert (**Abb. 4**). Physikalisch ist eine solche Wechselwirkung der Verschiebung eines Spiegels in der Optik äquivalent; die Resonanzfrequenz ändert sich in gleicher Weise. Zweitens muss ein elektromagnetischer Schwingkreis, um eine Resonanzfrequenz in diesem Bereich zu erhalten, eine gewisse Größe haben, z. B. einen Zentimeter. Auf diesem liegt dann eine 1  $\mu\text{m}$  lange Nanoröhre und wird um etwa 10 pm ausgelenkt. Die winzige Bewegung wird den viel





**Abb. 5** Nach der lithographischen Fertigung von Resonator und Gleichstromelektroden wird die separat gewachsene Nanoröhre auf den Chip gelegt. Eine vom GHz-Resonator ausgehende Fingerelektrode dient zur optomechanischen Kopplung sowie zum Anlegen statischer Gatterspannungen. Durch die Messung der GHz-Transmission lässt sich die optomechanische Kopplung nachweisen und charakterisieren.

größeren elektronischen Schaltkreis kaum beeinflussen. Erste theoretische Modelle bestätigen diese Vermutung [12].

Bauen wir den entsprechenden Chip jedoch, auf dem eine Kohlenstoff-Nanoröhre neben einem Mikrowellenschwingkreis vibriert (**Abb. 5**), lässt sich erstaunlicherweise eine deutliche optomechanische Wechselwirkung nachweisen [13]! Die Kopplung zwischen Mikrowellen und Mechanik ist etwa um einen Faktor 10 000 höher als theoretisch erwartet. Somit stellt sich die Frage, was im bisherigen Modell fehlt. Um gleich zur Auflösung zu springen – die Nanoröhre ist eben kein massiver, gut elektrisch leitender Metallbalken wie fast alle vorher betrachteten optomechanischen Systeme. Bei tiefen Temperaturen dominieren die Coulomb-Blockade und das Aufladen mit einzelnen Elektronen ihr Verhalten. So gibt es Bereiche, in denen eine veränderte Gatterspannung die Ladung auf der Nanoröhre nicht beeinflusst und Strom durch die Röhre blockiert ist (**Abb. 2**). In kleinen Gatterspannungsregionen wird die Nanoröhre aber mittels Tunneln durch einzelne Quantenniveaus leitend.

Genau dieser Effekt wirkt als sehr guter Verstärker. Während die Kohlenstoff-Nanoröhre sich im Verlauf einer mechanischen Schwingung zur Gatterelektrode hin und wieder davon weg bewegt, ändert sich ihre Antwort auf die externen elektromagnetischen Hochfrequenzfelder drastisch. Berücksichtigen wir dies in der Abschätzung der Kopplung, resultiert für unser Experiment etwa der bereits erwähnte Verstärkungsfaktor von bis zu 10 000. Durch die Wahl des Arbeitspunkts mittels der statischen Gatterspannung lässt sich zudem der Verstärkungsfaktor und damit auch die Kopplung an die Nanoröhren-Querschwingung beliebig kontrollieren.

### Wie es weitergeht

Die Arbeit an Kohlenstoff-Nanoröhren fängt eigentlich erst an. Der erreichte Verstärkungsfaktor von 10 000 ist bemerkenswert, aber noch längst nicht das Optimum. Ein erstes greifbares Ziel ist starke Kopplung, die hybride quantenmechanische Zustände zwischen Mechanik und Resonatorfeld erzeugt. Ein weiteres Ziel besteht darin, keinen kontinuierlichen Strom aus sequenziell tunnelnden Elektronen durch die Nanoröhre zu schicken, sondern ein einzelnes Elektron in einem Doppelpotentialtopf zu fangen, das hin und her tunnelt. Da das gleiche Elektron erhalten bleibt, bleibt die Elektronik phasenkohärent. Vollständig quantenmechanisch durchdacht führt diese Situation zu einem nano-elektromechanischen Qubit, das auf kombinierten elektromechanischen Zuständen beruht [9]. Drittens geht es darum, den heizenden oder kühlenden Effekt einzelner tunnelnder Elektronen auf die Bewegung zu untersuchen.

Wir haben hier ein erstes System, das wohldefinierte und kontrollierbare elektronische Quantenzustände eines Makromoleküls mit Optomechanik kombiniert. Momentan optimieren wir in Regensburg die supraleitenden Resonatoren und bereiten den Kryostaten mit besseren Filtern auf einen neuen Messdurchlauf vor. Und das ist die Hälfte des dortigen Heisenberg-Projekts. Die andere Hälfte betrachtet ebenfalls ein spannendes Hybridsystem, aber eines komplett anderer Art.

### Literatur

- [1] G. Hills et al., *Nature* **572**, 595 (2019)
- [2] E. A. Laird et al., *Rev. Mod. Phys.* **87**, 703 (2015)
- [3] M. Poot und H. S. J. van der Zant, *Physics Reports* **511**, 273 (2012)
- [4] M. Marganska et al., *Phys. Rev. Lett.* **122**, 086802 (2019)
- [5] T. Ihn, *Semiconductor Nanostructures: Quantum States and Electronic Transport*, Oxford University Press (2009)
- [6] D. R. Schmid, P. L. Stiller, Ch. Strunk und A. K. Hüttel, *New J. Phys.* **14**, 083024 (2012)
- [7] V. Sazonova et al., *Nature* **431**, 284 (2004)
- [8] B. Witkamp, M. Poot und H. S. J. van der Zant, *Nano Lett.* **6**, 2904 (2006)
- [9] F. Pistolesi, A. N. Cleland und A. Bachtold, arXiv:2008.10524 (2020)
- [10] F. Marquardt, *Physik Journal*, August/September 2009, S. 67
- [11] M. Aspelmeyer, T. J. Kippenberg und F. Marquardt, *Cavity Optomechanics*, Springer, Berlin und Heidelberg (2014)
- [12] C. A. Regal, J. D. Teufel und K. W. Lehnert, *Nat. Phys.* **4**, 555 (2008)
- [13] S. Blien, P. Steger, N. Hüttner, R. Graaf und A. K. Hüttel, *Nat. Commun.* **11**, 1636 (2020)

### Der Autor



**Andreas K. Hüttel** studierte und promovierte an der LMU München mit Stipendien der Studienstiftung und der Stiftung Maximilianeum. Als Postdoc an der TU Delft kam er erstmals mit Nanoröhren in Berührung; diese wurden dann Thema seiner Emmy-Noether-Gruppe an der U Regensburg. Nach einer Gastprofessur an der Aalto Universität, Finnland, forscht er nun mit einer Heisenberg-Stelle der DFG. In seiner freien Zeit ist er leitend aktiv bei Gentoo Linux und genießt Literatur, Bergwandern und Reisen.

**Priv.-Doz. Dr. Andreas K. Hüttel**, Universität Regensburg, Universitätsstr. 31, 93053 Regensburg