

Andreas K. Hüttel



Foto: Schupp / Götz

Zugfest, leitend, defektfrei

Kohlenstoff-Nanoröhren sind ein faszinierendes Material. In Experimenten bei ultratiefen Temperaturen versuchen Physiker, ihre verschiedenen Eigenschaften miteinander in Wechselwirkung zu bringen – und so Antworten auf grundlegende Fragen zu finden.

Wohin wir auch schauen – überall ist Kohlenstoff. Alles Leben ist aus organischen Kohlenstoff-Verbindungen aufgebaut, auch in seinen reinsten natürlichen Ausprägungen, als Diamant oder Graphit, kennen wir das chemische Element aus dem täglichen Leben. Mit den Fullere-

nen, den „fußballförmigen“ Kohlenstoff-Molekülen, und mit dem perfekt flachen, zweidimensionalen Material Graphen sind zwei weitere Kohlenstoff-Varianten auch außerhalb der Wissenschaft bekannt geworden, letzteres spätestens 2010, als Andre Geim und Konstantin Novoselov für ihre

Untersuchungen zu Graphen den Physik-Nobelpreis erhielten.

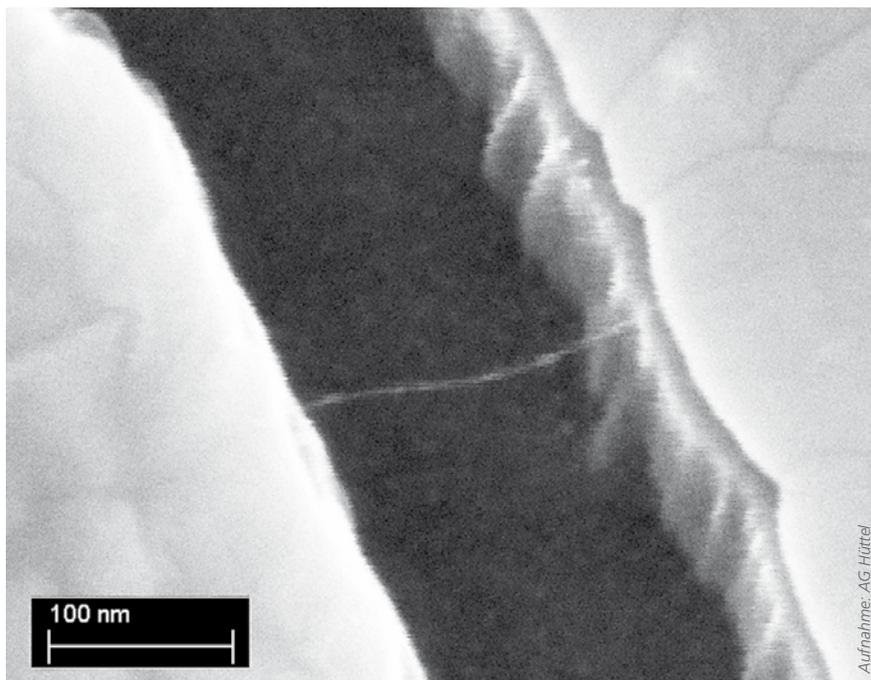
Dass als weitere Modifikation auch röhrenförmige Kohlenstoff-Makromoleküle existieren, ist hingegen in der breiteren Öffentlichkeit kaum bekannt. Die Wissenschaft weiß von ihnen bereits seit den 1960er-Jahren aus Ergebnissen

Links: Mit der Elektronenstrahlolithografie werden Strukturen auf die Oberfläche der Chips „geschrieben“. Rechts: Elektronenmikroskop-Aufnahme einer freihängenden Kohlenstoff-Nanoröhre; gut erkennbar sind die hellen Metall-elektroden und der dazwischen geätzte Graben. Unten eine Nanoröhre als Modell.

der Transmissions-Elektronenmikroskopie; 1993 entdeckten dann Sumio Iijima und Donald S. Bethune einwandige Nanoröhren, in denen eine einzelne Lage Graphen eine quasi eindimensionale, in sich abgeschlossene Röhre bildet.

In Technologie und Anwendung haben die Kohlenstoff-Nanoröhren längst Einzug gehalten. Sie besitzen zum einen eine sehr hohe Zugfestigkeit, was bereits in Surfbrettern oder schuss sicheren Westen ausgenutzt wird. Andererseits können sie auf kleinstem Querschnitt sehr hohe elektrische Ströme leiten, was sie beispielsweise für die Chipstechnologie interessant macht.

Einen besonderen Reiz haben Kohlenstoff-Nanoröhren aber für die Grundlagenforschung. Denn die Kohlenstoff-Ebene, die die Röhre bildet, ist in sich ab-



geschlossen – eine perfekte Form, bei der keine unebenen, undefinierten Kanten die elektronischen oder mechanischen Eigenschaften stören können. Und lässt man eine saubere Nanoröhre zusätzlich über einen Graben auf dem Chip wachsen, sodass sie frei hängt, dann schließt man Störungen durch Kontakt mit der Chipoberfläche ebenfalls aus und erhält ein System, in dem die quantenmechanischen Eigenschaften der Nanoröhre klar und detailliert hervortreten.

An diesem Punkt setzt die Arbeit einer DFG-geförderten Emmy Noether-Arbeitsgruppe am Institut für Experimentelle und Angewandte Physik der Universität Regensburg an. Sie arbeitet seit 2010 darauf hin, Nanoelektronik und Nanomechanik bei tiefsten Temperaturen zu kombinieren. Ihr Ziel: die elektronische Spektroskopie der Kohlenstoff-Nanoröhren zu realisieren und Wechselwirkungen zwischen der mechanischen Bewegung

einer schwingenden Nanoröhre und den durch sie fließenden Elektronen als den Trägern der elektrischen Ladung nachzuweisen.

Mit ihrer ausgezeichneten Infrastruktur von der Reinraum-Chipfabrikation bis hin zur Flüssighelium-Versorgung sowie durch die enge Zusammenarbeit mit anderen Arbeitsgruppen bietet die Regensburger Physik hierfür ein ideales Umfeld. Zudem ist in Regensburg bereits viel Erfahrung mit Nanoröhren vorhanden. Auf beidem baut die Emmy Noether-Arbeitsgruppe auf und fokussiert auf einen Fabrikationsprozess, bei dem die Eigenschaften der Nanoröhren bestmöglich sichtbar werden.

Hierzu werden zunächst auf Chips Metallelektroden und zwischen diesen Gräben hergestellt. Über diese lässt man danach chemisch Nanoröhren darüberwachsen. Diese wiederum fallen dann über die Elektroden und überbrücken die zwischen den Elektroden liegenden, ungefähr einen Mikro-



meter breiten Gräben. Auf diese Weise bleiben die Makromoleküle perfekt rein und unbeschädigt; keine weiteren Fabrikationsschritte können Defekte oder Verunreinigungen einbringen.

Kühlt man nun einen solchen Chip auf eine Temperatur von wenigen Hundertstel Grad über dem absoluten Nullpunkt ab, dann ist die thermische Energie der Umgebung so niedrig, dass sie nicht zum Aufladen der Nanoröhre mit einem einzelnen Elektron, der kleinsten Einheit der elektrischen Ladung, ausreicht. Die bereits auf der Nanoröhre gefangenen Elektronen bilden quantisierte Zustände ähnlich wie in der

Hülle eines Atoms – deshalb spricht man bei solchen Systemen auch von Quantenpunkten oder „künstlichen Atomen“. Durch Anlegen einer Gatterspannung kann man die Ladungszahl von außen beeinflussen; Strom fließt nur genau dann durch die Nanoröhre, wenn sich die Zahl der gefangenen Ladungen ändern kann, via „Einzelelektronentunneln“, dem Passieren eines einzelnen Elektrons nach dem anderen.

Quantenpunkte gibt es in vielen Halbleitermaterialien. Das Besondere an Kohlenstoff-Nanoröhren ist ihre Defektfreiheit und ihre klar definierte Geometrie.

Konzentration bei der Laborarbeit: Diplom-Physiker Daniel Schmid und Stefan Blien bereiten die Tieftemperatur-Apparatur für weitere Messungen vor.

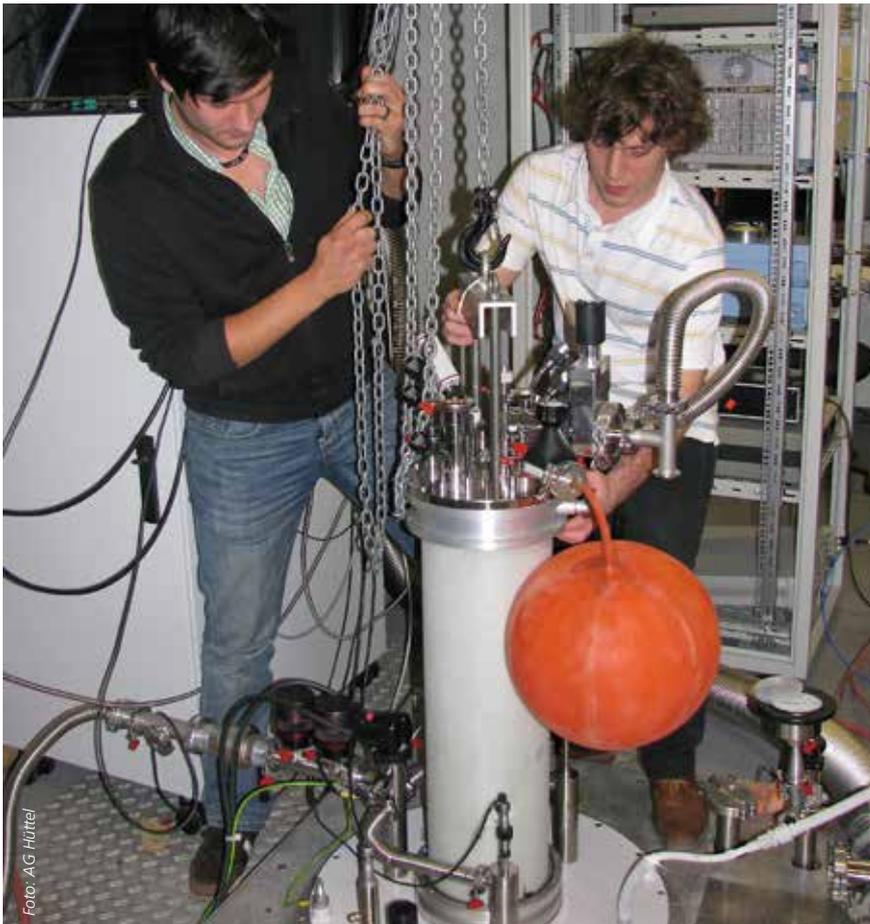
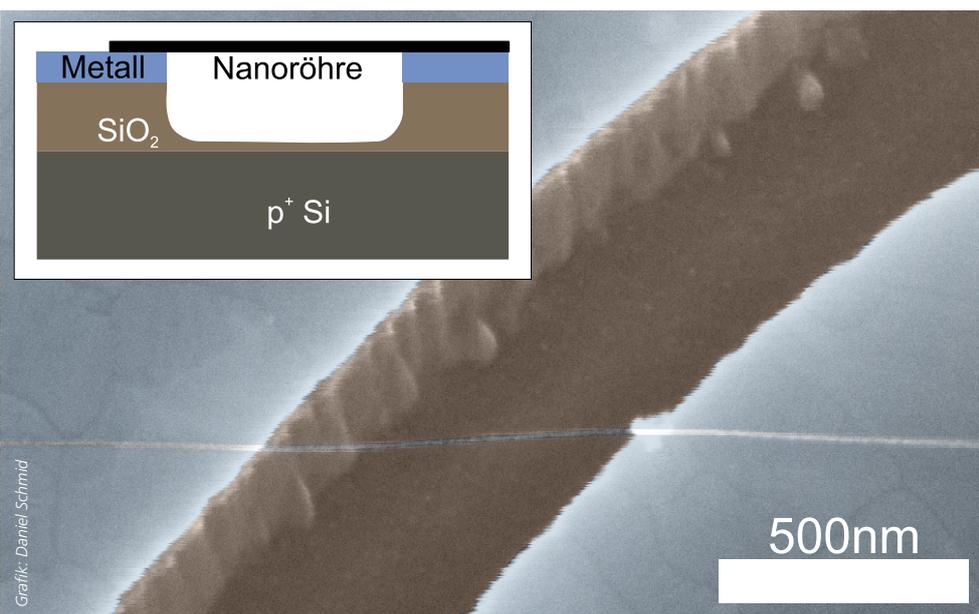


Foto: AG Hützel

Bei einem Durchmesser der Röhre von circa einem Tausendstel Mikrometer können die Elektronen in der frei hängenden Nanoröhre wie auf einer Schnur aufgereiht sein, in einem über die gesamte Länge des frei hängenden Stücks perfekten Gitters der Kohlenstoff-Atome. Wenn nun dieses System Schritt für Schritt mit einem Elektron nach dem anderen aufgeladen wird, lässt sich in elektrischen Messungen die Entwicklung des Zustandsspektrums dieses gefangenen Ladungssystems vom ersten Elektron an verfolgen, angefangen von Grund- und Anregungszuständen eines einzelnen Teilchens bis hin zu komplexen Vielteilchen-effekten.

Betrachtet man eine frei hängende Nanoröhre im Rasterelektronenmikroskop, so erinnert das Bild sofort an eine Gitarren- oder Klaviersaite, bei fehlender Spannung auch an ein Springseil. Genauso wie diese Gegenstände des täglichen Lebens kann – zusätzlich zu ihren elektronischen Eigenschaften – eine Kohlenstoff-Nanoröhre auch mechanisch schwingen. Speziell bei tiefsten Temperaturen, wie sie in den Experimenten der Regensburger Emmy Noether-Gruppe vorliegen, ist diese Schwingung mechanisch fast dämpfungsfrei. Hätte eine Klaviersaite eine ähnlich niedrige Dämpfung, dann würde man nach dem Anschlag den Ton noch mehrere Minuten lang hören! Schickt man einen elektrischen Gleichstrom durch die Nanoröhre, so kann spontane Selbstanregung auftreten; die Nanoröhre fängt an zu schwingen, ohne dass sie periodisch angetrieben wird. Dieser Effekt ist so stark, dass er bisweilen elektronische Spektroskopie-



Filigran überspannt eine Kohlenstoff-Nanoröhre einen auf den Chip geätzten Graben. Oben links ist das grafische Modell zu sehen.

messungen wie oben beschrieben empfindlich stört.

Aber auch die elektronischen Eigenschaften beeinflussen die Schwingung – insbesondere wenn man sich vergegenwärtigt, dass Strom durch einzelne Elektronen diskreter Ladung getragen wird. Wie unter anderem Forscher der TU Delft gezeigt haben, können die Elektronen auch aus der Nanoröhre direkt Schwingungsenergie „abtransportieren“. In Regensburg konnte nachgewiesen werden, dass bereits ein relativ kleines Magnetfeld zu Wirbelströmen und damit ebenfalls zu einer Dämpfung der Bewegung führt – sozusagen die kleinste Wirbelstrombremse der Welt!

Wo soll dies alles hinführen? In rein elektronischen Systemen gibt es einerseits noch viele ungeklärte grundlegende Fragen. Wie wirkt sich das detaillierte Aufrollen der graphenarti-

gen Kohlenstoff-Ebene zu einer Nanoröhre auf die Elektronenzustände aus? Lässt sich aus den vorliegenden Messdaten auf den exakten Typ der Nanoröhre rückschließen? Wie interagieren die Elektronen, wenn man die Nanoröhre mehr und mehr auflädt? Andere reizvolle Fragen und Forschungsansätze ergeben sich dort, wo Kohlenstoff-Nanoröhren und magnetische oder supraleitende Materialien kombiniert werden. Dabei wird beispielsweise versucht, den Elektronenspin zu kontrollieren, also den Eigendrehimpuls der Elektronen, der für viele magnetische Effekte und Wechselwirkungen verantwortlich ist. Ein Ziel des entsprechenden Forschungsgebiets der Spintronik ist die Informationsverarbeitung auf magnetischer Basis, nicht nur mit elektrischen Ladungen wie in herkömmlichen Computersystemen.

Was schließlich mechanische Effekte betrifft, so ist der Über-

gang von der klassischen Physik zur Quantenmechanik ein sehr aktuelles Forschungsthema. Um sich ihm zu nähern, ist eine möglichst hohe Schwingungsfrequenz notwendig – kein Problem für Kohlenstoff-Nanoröhren, da gerade sie hohe Zugfestigkeit und niedrige Masse kombinieren. Zusätzlich muss auch hier eine möglichst niedrige Temperatur vorliegen, sodass keine thermischen Anregungen stattfinden. Die mechanische Schwingung eines derartigen Systems auszulesen und zu kontrollieren, ohne sie mit einem externen Signal stark anzutreiben und damit zu heizen – dies ist eine weitere Herausforderung, an der sich nun weltweit einige Arbeitsgruppen messen.



Dr. Andreas K. Hüttel

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Experimentelle und Angewandte Physik der Universität Regensburg und Leiter der dortigen Emmy Noether-Arbeitsgruppe „Kohlenstoff-Nanoröhrchen als elektronische und nanoelektromechanische Hybridsysteme im Quantenlimes“.

Adresse: Institut für Experimentelle und Angewandte Physik, Universität Regensburg, 93040 Regensburg

DFG-Förderung im Rahmen des Emmy Noether-Programms sowie im Rahmen der Sonderforschungsbereiche SFB 631 „Festkörperbasierte Quanteninformationsverarbeitung: Physikalische Konzepte und Materialaspekte“ und SFB 689 „Spinphänomene in reduzierten Dimensionen“ sowie des Graduiertenkollegs 1570 „Elektronische Eigenschaften von Nanostrukturen auf Kohlenstoff-Basis“.

www.physik.uni-regensburg.de/forschung/huettel/

