

# Auf dem Weg zur Nanoelektronik

Um elektronische Bauteile immer kleiner herstellen zu können, sind neue Materialien gefragt. Beispielsweise ultradünne Kohlenstoffschichten, Graphen genannt. Empa-Forschende entwickeln in internationaler Zusammenarbeit neue Methoden, um diese Schichten auf Oberflächen «wachsen» zu lassen. Damit sie etwa Graphenbänder mit den gewünschten Eigenschaften «ausrüsten» können, untersuchen die Forschenden, unter anderem mit Computersimulationen, wie diese Strukturen genau entstehen.

TEXT: Beatrice Huber / BILDER: Empa

**G**raphen ist ein spezielles Material: Es besteht aus einer nur ein Atom dicken Kohlenstoffschicht, in der die Atome in Sechsecken angeordnet sind und somit an Honigwaben erinnern. Graphen ist härter als Diamant, extrem reissfest, undurchlässig für Gase und ein hervorragender Wärmeleiter. Aufgerollt entstehen aus dem Material Kohlenstoffnanoröhrchen und beim Stapeln von Schichten Graphit, bekannt beispielsweise aus Bleistiftminen.

Graphen gilt ausserdem wegen seiner aussergewöhnlichen elektronischen Eigenschaften als mögliches Ersatzmaterial für Silizium in der Halbleitertechnologie. Kein Wunder zählen Graphen und verwandte Materialien momentan zu den Top-Forschungsthemen. So ging 2010 der Nobelpreis in Physik an die Begründer der Graphenforschung, Andre Geim und Konstantin Novoselov. Ihrer Forschungsgruppe war es erstmals gelungen, freistehende Graphenschichten zu präparieren. Etwas, was die Fachwelt erstaunte, denn strikt zweidimensionale Strukturen sollten eigentlich nicht stabil sein.

## Ersatz für Silizium gesucht

Noch läuft in der Halbleitertechnologie fast nichts ohne Silizium. Beispielsweise in den Feldeffekttransistoren, den heute am häufigsten verwendeten Transistoren. Doch gerade für diese weist Graphen eine Eigenschaft auf, die einen gewaltigen Sprung in der Miniaturisierung ermöglichen könnte.

Feldeffekttransistoren haben grundsätzlich drei Stromanschlüsse: Source (auf Deutsch Quelle), Gate (Tor) und Drain (Abfluss). Das Gate steuert den Transistor, indem es Strom zwischen Source und Drain fliessen lässt – oder diesen unterbindet. Dazu

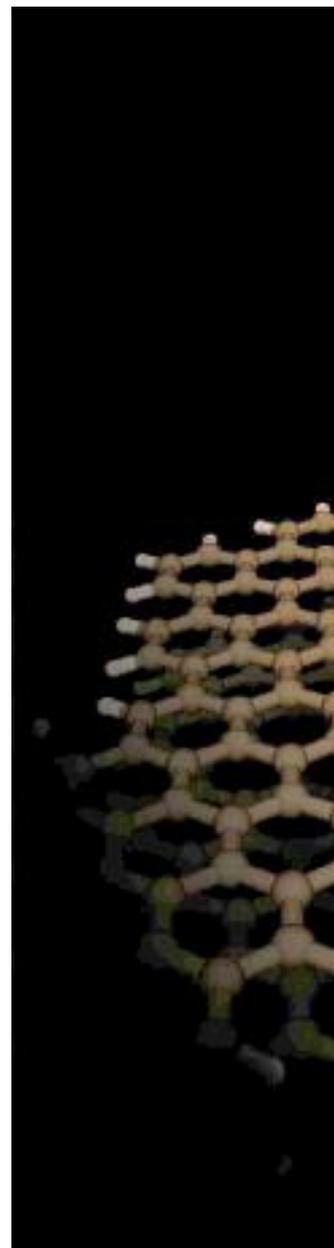
baut das Gate entweder einen «Kanal» zwischen Source und Drain auf oder schliesst diesen. Graphen ermöglicht es nun, diesen Kanal so zu bauen, dass er gerade mal eine Atomlage dick ist – ein entscheidender Schritt für die Miniaturisierung von elektronischen Bauteilen hin zur Nanoelektronik. Derart dünne «Kanäle» sind mit Silizium, dem heute gängigsten Grundmaterial in der Halbleitertechnologie, nicht möglich.

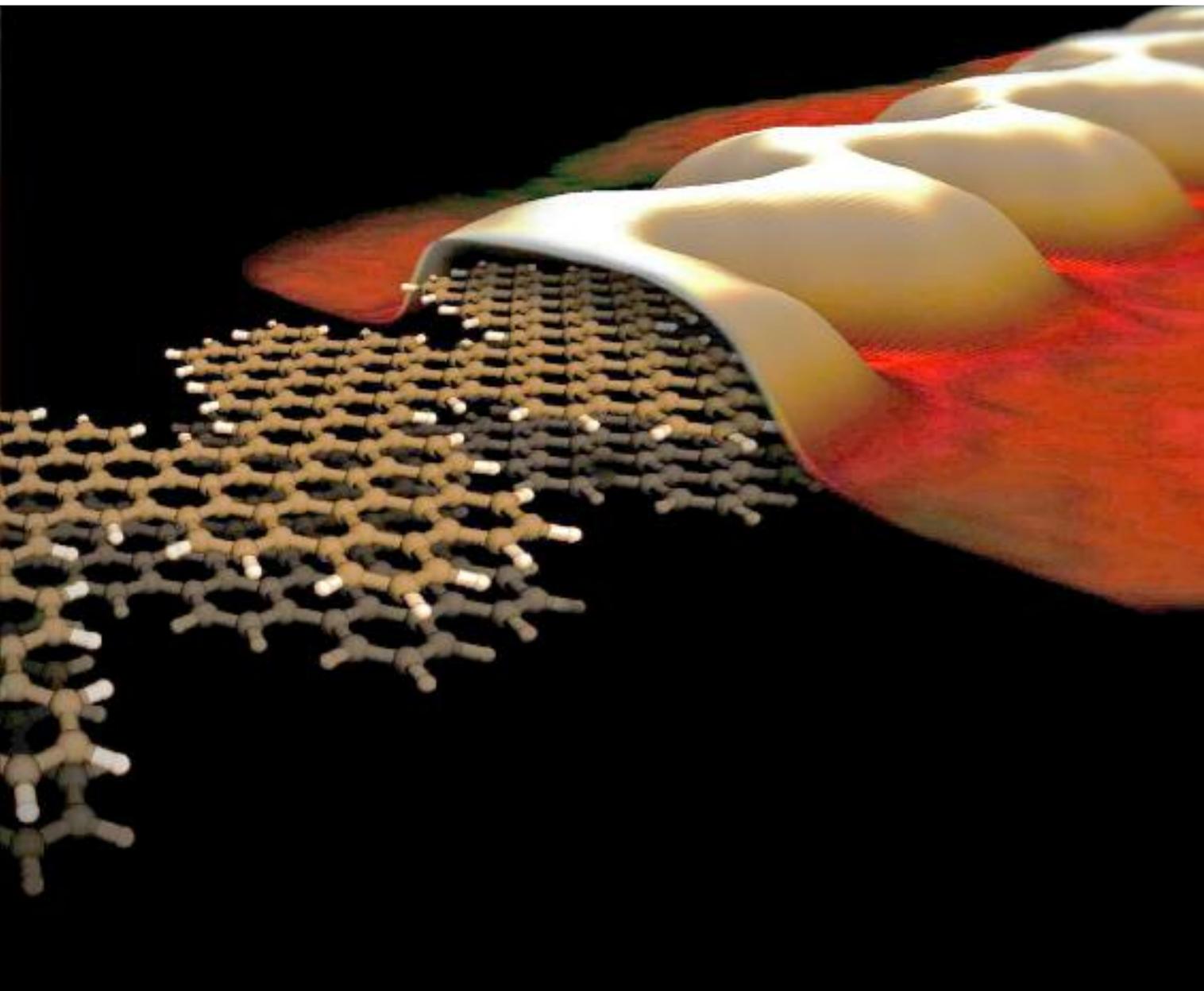
## Graphen wird zum Halbleiter

Bevor Graphen und verwandte Materialien in der Halbleitertechnologie eingesetzt werden können, sind jedoch noch ein paar Hürden zu überwinden. Reines Graphen ist kein Halbleiter. Die so genannte Bandlücke, die den isolierenden Zustand ermöglicht, ist bei Graphen null. Das heisst: Graphen lässt sich nicht «ausschalten», sondern leitet immer.

Forschende der Empa-Abteilung «nanotech@surfaces» arbeiten zusammen mit Wissenschaftlern des Max-Planck-Instituts für Polymerforschung in Mainz und weiterer Institutionen an graphenartigen Materialien, die eine Bandlücke aufweisen und deren Grösse sich ausserdem noch gezielt einstellen lässt. Ein Kandidat sind ultradünne Graphenbänder; ein weiterer ist «poröses» Gra-

Strukturmodell eines Graphenbandes in Form einer Zickzacklinie.





phen, das heisst flächige Polymere mit «Löchern» von kontrollierter Grösse und räumlicher Verteilung.

#### Einfache Herstellung möglich

Im Fokus stehen Methoden, um diese graphenartigen Materialien mit wohl definierten Bandlücken möglichst einfach und reproduzierbar herzustellen. «Wir setzen dabei auf einen «bottom-up»-Prozess, nämlich die molekulare Selbstorganisation», erklärt Roman Fasel, Senior Scientist in der Abteilung «nanotech@surfaces». «Denn die bislang üblichen Methoden sind nicht präzise genug.» Um für Bauteile mit massgeschneiderten optischen und elektronischen Eigenschaften interessant zu sein, müssten beispielsweise die Graphenbänder deutlich unter zehn Nanometer schmal sein und dazu noch wohl definierte Ränder aufweisen. Die bislang üblichen «top-down»-Methoden erreichen dies nicht. Mit ihnen werden die Bänder beispielsweise aus Graphenschichten «geschnitten» oder Kohlenstoffnanoröhrchen der Länge nach aufgetrennt.

Molekulare Selbstorganisation schafft die nötige Präzision. Über definierte Bindungsstellen koppeln die molekularen Bausteine auf einer Oberfläche selbstständig aneinander und bilden eine regelmässige Struktur mit den gewünschten elektronischen Eigen-

schaften. Bei den Bausteinen handelt es sich um organische Moleküle, so genannte Polyphenylene, die an den «strategisch richtigen» Positionen Halogene – Brom oder Jod – aufweisen. Die Geometrie dieser Bausteine – wie viele Halogene befinden sich an welchen Positionen – bestimmt dann, wie das Endprodukt aussieht, das heisst, ob ein Band entsteht oder eine flächige Struktur mit Poren.

#### Bänder – nur ein Nanometer breit

Dank geeigneter Bausteine konnten die Empa-Forscher Pascal Ruffieux, Jinming Cai und Marco Bieri zusammen mit Kollegen vor kurzem atomar dünne Graphenbänder von einem Nanometer Breite und einer Länge von bis zu 50 Nanometer herstellen. «Damit sind unsere Graphenbänder so schmal, dass sie eine elektronische Bandlücke aufweisen und nun wie Silizium Schalteigenschaften besitzen», sagt Roman Fasel zum Forschungsergebnis.

Doch damit nicht genug: Je nachdem, welche Bausteine verwendet wurden, bildeten sich Graphenbänder mit unterschiedlicher räumlicher Struktur – gerade, wie eine Zickzacklinie oder mit Gabelung. Die Arbeit wurde im Juli in der renommierten Wissenschaftszeitschrift «Nature» veröffentlicht. Mit derselben Methode

konnte auch erfolgreich ein poröses Graphen hergestellt werden, dessen Poren nur wenige Atome im Durchmesser aufweisen und dessen Muster sich im Subnanometer-Massstab wiederholt. Dieses Material besitzt ebenfalls die gewünschte Bandlücke.

### Reaktionsweg durch Experiment und Simulation geklärt

Damit die neue Synthesemethode allerdings zu einem zuverlässigen Instrument wird, mit dem Graphenbänder, aber auch poröse Graphene massgeschneidert hergestellt werden können, muss der Reaktionsweg im Detail klar sein. «Wir wollen ein detailliertes Verständnis der Reaktionsschritte», sagt Roman Fasel. Welche Prozesse laufen dabei ab? Welche Zwischenprodukte entstehen? Welche Kräfte sind daran beteiligt? Welche Rolle spielt die Unterlage?

Um Fragen wie diese zu beantworten, kombinieren die Forschenden experimentelle Beobachtungen – vor allem mit dem Rastertunnelmikroskop – mit Computersimulationen (zu Simulationen siehe auch EmpaNews 29). Eine Arbeit, die soeben in der Wissenschaftszeitschrift «Nature Chemistry» erschienen ist, beschreibt nun den detaillierten Reaktionsablauf, wie «Modell-Bausteine» zu einem planaren Nanographen koppeln. Diese Reaktion läuft über sechs Schritte mit fünf Zwischenprodukten. Zwei davon werden durch die Oberfläche genügend stabilisiert, dass sie mit dem Rastertunnelmikroskop identifiziert werden konnten. Und genau das wurde auch durch die Computersimulationen bestätigt.

Bis anhin liessen die Wissenschaftler die Graphenbänder und porösen Graphene auf Metalloberflächen «wachsen». Damit die Materialien allerdings für die Elektronik genutzt werden können, müssen sie auf Halbleiteroberflächen hergestellt werden. Oder es müssen Methoden entwickelt werden, um die Materialien von Metall- auf Halbleiteroberflächen zu transferieren. «Wir arbeiten momentan mit Hochdruck an beiden Varianten», sagt Roman Fasel. «Erste Ergebnisse stimmen uns bereits zuversichtlich.» //

#### 1

Unter Ultrahochvakuumbedingungen werden die gewünschten Bausteine – im Bild 10,10'-dibromo-9,9'-bianthryl-Monomer – auf einer Goldoberfläche aufgebracht. Im ersten Reaktionsschritt koppeln die Bausteine zu Polyphenylenketten (Mitte). Im zweiten, durch stärkeres Erhitzen eingeleiteten Reaktionsschritt werden Wasserstoffatome entfernt und es entstehen planare, aromatische Graphensysteme – Graphennanobänder (rechts).

#### 2

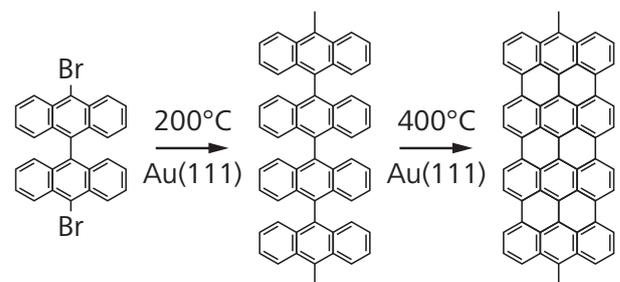
Gerade, als Zickzacklinie oder mit Gabelung: Durch die Wahl der geeigneten Bausteine lassen sich Graphenbänder in der gewünschten Form herstellen.

#### Literaturhinweise

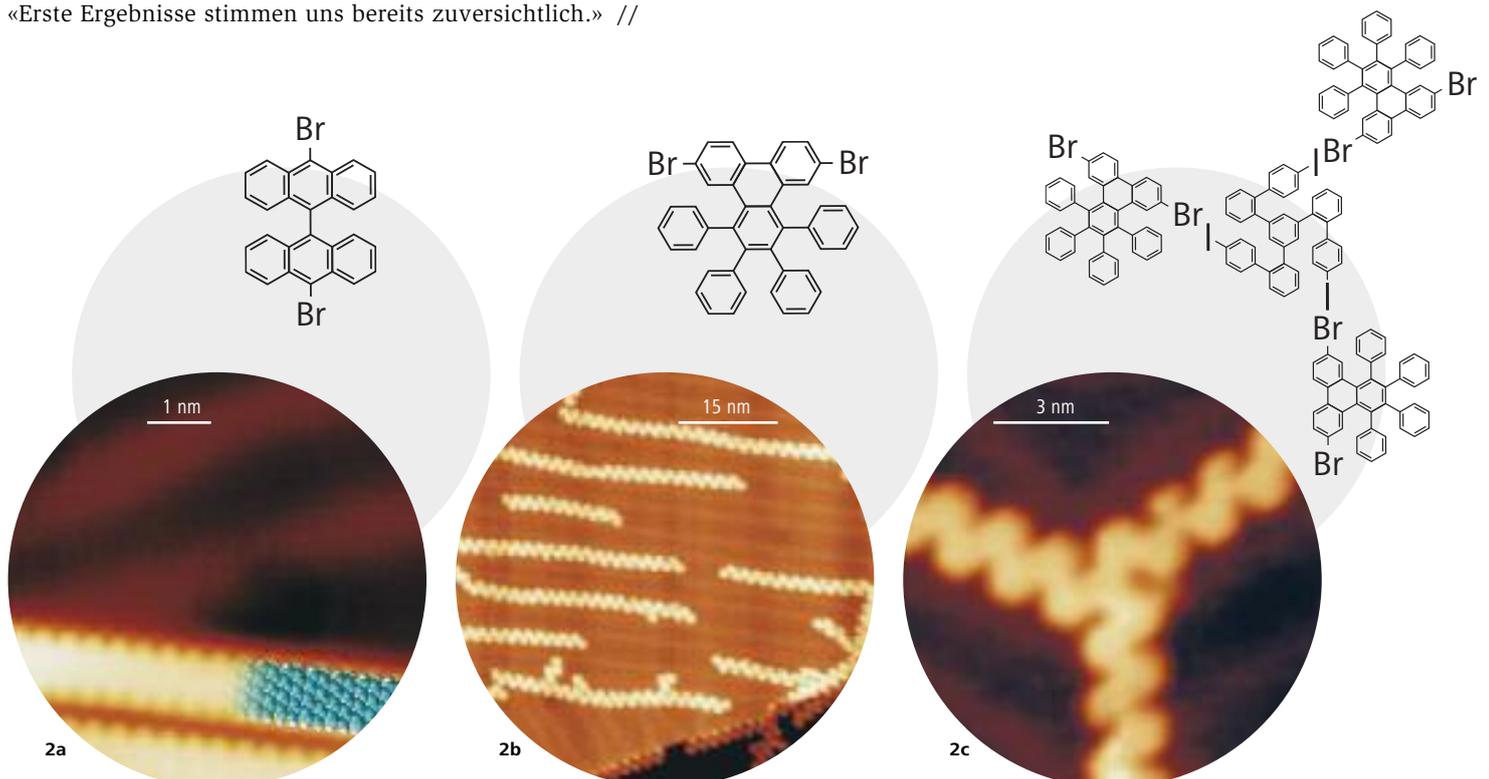
«Atomically precise bottom-up fabrication of graphene nanoribbons», J. Cai, P. Ruffieux, R. Jaafar, M. Bieri, T. Braun, S. Blankenburg, M. Muoth, A.P. Seitsonen, M. Saleh, X. Feng, K. Müllen, R. Fasel, Nature 466, 470-473 (2010)

«Porous graphenes: two-dimensional polymer synthesis with atomic precision», M. Bieri, M. Treier, J. Cai, K. Ait-Mansour, P. Ruffieux, O. Gröning, P. Gröning, M. Kastler, R. Rieger, X. Feng, K. Müllen, R. Fasel, Chem. Commun., 6919-6921 (2009)

«Surface-assisted cyclodehydrogenation provides a synthetic route towards easily processable and chemically tailored nanographenes», M. Treier, C.A. Pignedoli, T. Laino, R. Rieger, K. Müllen, D. Passerone, R. Fasel, Nature Chemistry, veröffentlicht online am 7. November 2010  
DOI: 10.1038/NCHEM.891



1



2a

2b

2c