

Mit Tesafilm nach Stockholm

Für ihre bahnbrechenden Pionierarbeiten zu Graphen erhalten Andre Geim und Konstantin Novoselov den Nobelpreis für Physik 2010.

Patrik Recher und Björn Trauzettel

Kohlenstoff ist nicht nur der unverzichtbare Bestandteil der komplexen Moleküle des Lebens, auch in Reinform offenbart es äußerst vielfältige Eigenschaften. Zum Beispiel ist kristalliner Kohlenstoff als Diamant ebenso hart wie kostbar, während er in Form von Graphit weich und daher ideal zum Schreiben und Zeichnen geeignet ist. Graphit besteht aus aufeinander-gestapelten Atomlagen. Kohlenstoff kann aber auch exotischere Formen annehmen. Berühmtes Beispiel sind die Fußball-artigen Fulleren-Moleküle, die bereits zu Nobelpreis-Würden gekommen sind (Chemie 1996, Robert Curl, Harold Kroto und Richard Smalley). Aufgerollte Einzellagen von Graphit können zudem eindimensionale Nanoröhren bilden, mit erstaunlichen elektrischen und mechanischen Eigenschaften.

Kohlenstoff ist das erste Element der vierten Hauptgruppe des Periodensystems und hat vier Elektronen in der äußeren Schale. In einer atomaren Schicht von Graphit werden jeweils drei davon für chemische Bindungen zu den benachbarten Atomen genutzt. Dadurch entsteht ein sehr stabiles ebenes Gitter in der Form einer Honigwabe. Diese Monolage von Graphit bezeichnet man als Graphen.

Für die elektronische Struktur von Graphen haben sich Wissenschaftler schon vor mehr als sechzig Jahren interessiert, damals aber



vor allem, weil sie sich davon Einblicke in die elektronische Struktur von Graphit versprochen [1]. Eine einzelne Lage aus Graphit, also das Graphen, zu extrahieren, galt nämlich als praktisch unmöglich. Zudem sagte das Mermin-Wagner-Theorem vorher, dass strikt zweidimensionale Kristalle nicht stabil sein können.

2004 ist aber einer Gruppe unter der Leitung von Andre Geim und

päischen Universitäten gearbeitet, bevor er 1994 Professor für Physik an der Radboud Universität in Nijmegen (Niederlande) wurde. Dort promovierte der 1974 in Nischni Tagil im Ural geborene Konstantin Novoselov im Jahre 2004, bevor er Geim an die Universität Manchester folgte, wo dieser seit 2001 Professor für Physik und Direktor eines großen Forschungsinstituts ist.

Konstantin Novoselov genau dies gelungen [2] und zwar auf verblüffend einfache Art und Weise (Abb. 1). Die Methode besteht aus dem Aufdrücken eines Klebestreifens auf Pulver aus Graphit. Die daran haftenden Partikel lassen sich dann auf ein Substrat transferieren. Wiederholt man den Vorgang, gelingt dies – mit etwas Glück – mit nur einigen wenigen Monolagen Graphen [3].

Dr. Patrik Recher und Prof. Dr. Björn Trauzettel, Institut für Theoretische Physik und Astrophysik, Universität Würzburg

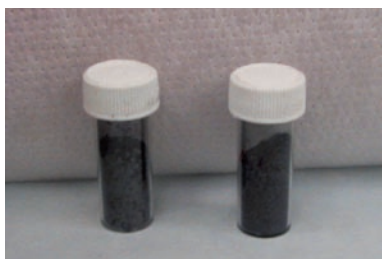
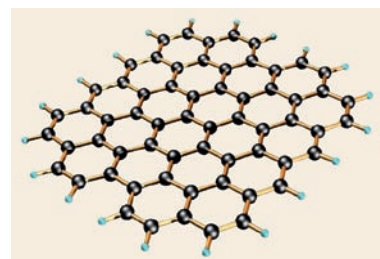


Abb. 1 Graphen lässt sich mit Hilfe der „Tesafilm-Methode“ herstellen. Drückt man auf Graphitpulver (links) nämlich



Tesafilm (Mitte) und überträgt es auf ein Substrat, so erhält man mit etwas Glück und Geschick einschichtiges Graphit –



das Graphen mit seiner typischen Honigwabenstruktur (rechts).

Das widerspricht keinswegs dem Mermin-Wagner-Theorem, denn die Struktur aus Graphen und dem Substrat ist dreidimensional. Trotzdem kann man die physikalischen Eigenschaften von Graphen in solch einer Struktur untersuchen, da die Kopplung zwischen der Monolage Kohlenstoff und dem Substrat sehr gering ausfällt. Seit einigen Jahren lässt sich Graphen sogar freihängend erzeugen (Abb. 2). Dieses hat aber eine gewellte Oberfläche, die energetisch günstiger ist als eine ganz flache Konfiguration [4].

Dünnere geht nicht

Die Kunst ist es nun, Graphen auf dem Substrat zu entdecken. Graphen ist nämlich das dünnste Material des Universums. Wie lässt sich erkennen, wie viele Lagen man transferiert hat? Geim, Novoselov und ihre Kollegen lösten das Problem, indem sie ein Substrat aus Siliziumdioxid mit einer bestimmten Schichtdicke benutzten. Dadurch gelang es ihnen schließlich, die Nadel im Heuhaufen zu finden. In einem Lichtmikroskop lassen sich dann die Monolagen allein durch den optischen Kontrast von mehrlagigen Schichten unterscheiden.

Diese Vermutung galt es natürlich noch durch weitere experimentelle Befunde zu untermauern. Das war der nächste Schritt. Durch Messung des elektrischen Transports haben 2005 die Manchester-Gruppe [5] und unabhängig davon eine Gruppe um Philip Kim [6] an der Columbia University in den

USA die speziellen elektronischen Eigenschaften von Graphen durch das Auftreten eines neuartigen „halbzahligen“ Quanten-Hall-Effekts nachgewiesen. Die Halbzahligkeit rührt daher, dass sich die Elektronen in Graphen bei niedrigen Energien wie masselose Dirac-Fermionen verhalten. Dabei stammt die Spinorstruktur der Wellenfunktion in Graphen nicht vom Spinfreiheitsgrad der Teilchen – wie bei der ursprünglichen Dirac-Gleichung in der relativistischen Quantenmechanik – sondern von einem Pseudospinfreiheitsgrad, der damit zusammenhängt, dass das Honigwabengitter durch eine zwei-atomare Basis beschrieben wird.

Nobler Boom

Die Aussichten auf fundamental interessante Grundlagenforschung sowie auf technische Anwendungen von Graphen lösten seit dem Jahr 2005 einen wahren Boom sowohl in der experimentellen als auch der theoretischen Festkörperphysik aus, der bis heute ungebrochen anhält und in andere Teilgebiete der Physik und Chemie ausstrahlt [7]. Damit haben die Entdecker von Graphen in kürzester Zeit die moderne Forschungslandschaft entscheidend geprägt, was ein Grund gewesen sein dürfte, warum sich das Nobelpreiskomitee schon sechs Jahre nach der Entdeckung für die Preisvergabe entschieden hat.

Ausschlaggebend für den Boom war sicher die außergewöhnliche

Strategie, die Geim und Novoselov nach ihrer Entdeckung gewählt hatten, um Graphen einer möglichst großen Gruppe an Forschern zugänglich zu machen. Sie luden alle interessierten Gruppen nach Manchester ein, um ihnen beizubringen, wie man Graphen herstellt. Diese Offenheit hat natürlich direkte Konkurrenz für die eigene Gruppe erzeugt, aber gleichzeitig dazu geführt, dass in kürzester Zeit alle führenden experimentellen Gruppen weltweit mit Graphen arbeiten konnten. Letztlich hat sich die Strategie der Offenheit ausgezahlt – sowohl für die Entdecker als auch für den Erkenntnisgewinn und die Identifikation des Potenzials von Graphen.

Nach der Entdeckung von Graphen gab es verschiedene Richtungen der Weiterentwicklung. Zum einen versuchte man, die speziellen elektronischen und mechanischen Eigenschaften von Graphen theoretisch und experimentell besser zu verstehen, zum anderen gelang es, neue Herstellungsmethoden zu entwickeln [8]. Darunter sei vor allem die Möglichkeit erwähnt, Graphen auf einem Substrat zu züchten. Ein geeignetes Substrat ist Siliziumcarbid, aber auch metallische Materialien wie Ruthenium, Iridium oder Kupferfolie ließen sich dafür erfolgreich einsetzen. Die Hoffnung war, dass Graphen mithilfe der Wachstumsmethode großflächiger und kontrollierter herstellbar sein sollte als mit der Klebestreifenmethode. Das ist mittlerweile auch gelungen.

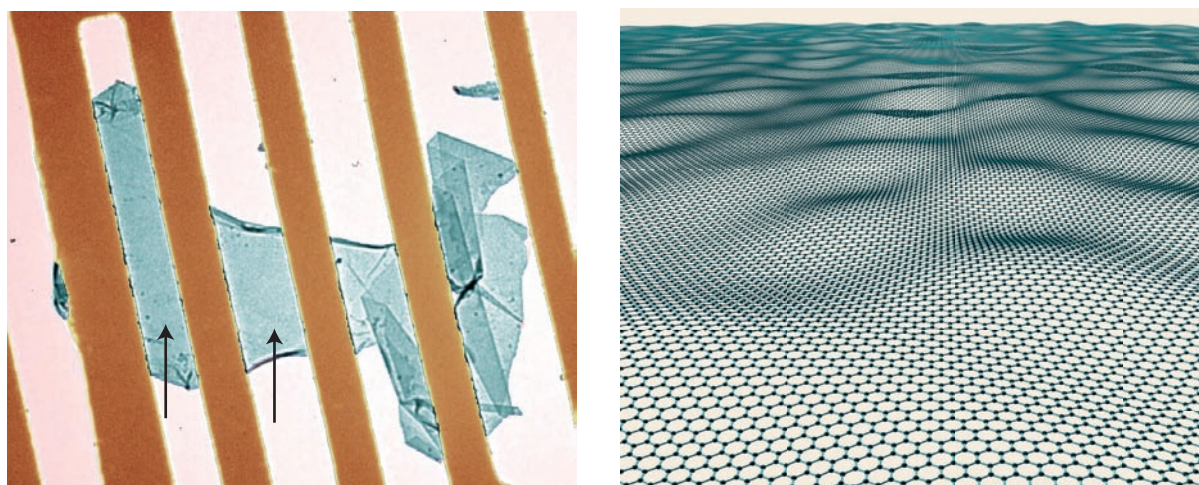


Abb. 2 Die Oberfläche von freihängendem Graphen (links, durch Pfeile markiert) auf einem metallischen Gerüst ist gewellt, wie im rechten Schema dargestellt.

Wundermaterial Graphen?

Wegen der hohen elektrischen Leitfähigkeit von Graphen (selbst bei Zimmertemperatur) galt es von Anfang an als ein neues Wundermaterial für die Nanoelektronik. Aufgrund der Zweidimensionalität scheint es sich ideal als Baustein für Transistoren in elektrischen Schaltkreisen wie in Computern und Mobiltelefonen zu eignen. Dies trifft vor allem auf schmale Streifen aus Graphen oder auf das zweilagige Graphen zu, wo die für Transistoren notwendige halbleitende Bandlücke erzeugt werden kann (Abb. 3). Kürzlich gelang es zudem, die von Francisco Guinea, Mikhail Katsnelson und Andre Geim vorhergesagten magnetischen Eigenschaften von verspanntem Graphen nachzuweisen [9].¹⁾

Da Graphen ein großes Oberfläche-zu-Masse-Verhältnis hat, ist es auch effektiv zum Detektieren von chemischen Substanzen geeignet und für den Einsatz in so genannten Superkondensatoren. Darüber hinaus leitet Graphen ausgezeichnet Wärme und ist lichtdurchlässig. Letzteres ist unter anderem wichtig für Anwendungen in „Touchscreens“. Auch die mechanischen Eigenschaften sind beeindruckend: Es ist das stärkste bekannte Material [10]. Graphen widersteht Kräften, die rund 200-mal größer sind als die Bruchlast von Stahl.

Weitere Hoffnungen in Graphen ergeben sich im Zusammenhang mit der „Spinelektronik“ (Spintronik). Mit dem Spin ist ein intrinsisches magnetisches Moment des Elektrons assoziiert, welches sich neben der Ladung auch für den Transport von Information nutzen lässt – der Riesenmagnetowiderstand ist ein solches Beispiel (Nobelpreis für Physik 2007 an Albert Fert und Peter Grünberg). Da Kohlenstoff ein leichtes Element ist, fällt die Wechselwirkung des Spins mit der Bewegung der Elektronen, die Spin-Bahn-Wechselwirkung, besonders schwach aus. Außerdem ist die Dichte der Kernspins, welche den Elektronenspin auch negativ beeinflussen können, sehr gering. Es liegt daher auf der Hand, dass

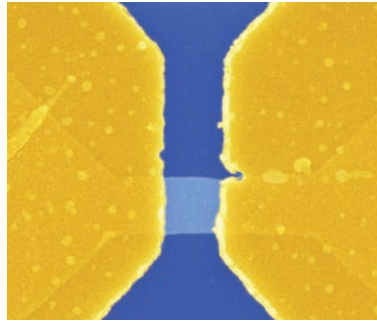


Abb. 3 Ein nur 200 Nanometer breiter Graphenstreifen bildet mit zwei Goldkontakten (gelb) einen Transistor.

der Spintransport nur mit geringen Verlusten verbunden ist. Erste experimentelle Erfolge in diese Richtung erzielte 2007 die Gruppe von Bart van Wees in Groningen in den Niederlanden [11].

Ob sich Graphen in industriellen Anwendungen wirklich durchsetzt, ist zum jetzigen Zeitpunkt noch unklar, da man Graphen noch nicht gut und günstig genug verarbeiten und isolieren kann. Vieles spricht jedoch dafür, dass dieses Weltrekordmaterial sowohl in Low- als auch High-Tech-Anwendungen unser zukünftiges Leben mitbestimmen könnte.

Ausgezeichnete Forschung

Bereits vor dem Nobelpreis wurden die Forschungen von Geim und Novoselov durch prestigeträchtige Preise gewürdigt. So erhielten die beiden 2008 den Europhysics Prize für ihre bahnbrechenden Entdeckungen im Zusammenhang mit Graphen. Novoselov, der laut Geim als allererster Mensch überhaupt

Graphen zu Gesicht bekam, erhielt außerdem einen der begehrten ERC Starting Grants der EU.

Geim kann auch für sich verbuchen, der erste Wissenschaftler zu sein, der sowohl den Nobelpreis als auch den ebenso kuriosen wie populären IgNobel-Preis erhalten hat. Letzteren erhielt er jedoch nicht für seine Forschungen zum Graphen, sondern für ein Experiment, bei dem er einen lebenden Frosch in einem Magnetfeld zum Schweben brachte.

Sowohl das Experiment mit dem Frosch als auch die Tesafilm-methode für Graphen zeigen, was Geim besonders auszeichnet: Seine Kreativität und seine Fähigkeit, unkonventionelle Wege zu finden und diese dann auch bis zum Erfolg zu Ende zu gehen.

Literatur

- [1] P. R. Wallace, *Phys. Rev.* **71**, 622 (1947)
- [2] K. S. Novoselov et al., *Science* **306**, 666 (2004)
- [3] B. Trauzettel, *Physik Journal*, Juli 2007, S. 39
- [4] J. C. Meyer et al., *Nature* **446**, 60 (2007)
- [5] K. S. Novoselov et al., *Nature* **438**, 197 (2005)
- [6] Y. Zhang, J. W. Tan, H. L. Störmer und P. Kim, *Nature* **438**, 201 (2005)
- [7] Eine umfassende Übersicht über die elektronischen Eigenschaften von Graphen bietet A. H. Castro Neto, F. Guinea, N. M. R. Peres, K. S. Novoselov und A. K. Geim, *Rev. Mod. Phys.* **81**, 109 (2009)
- [8] Th. Seyller, *Physik Journal*, August/September 2010, S. 53
- [9] F. Guinea, M. I. Katsnelson und A. K. Geim, *Nature Phys.* **6**, 30 (2010); N. Levy et al., *Science* **329**, 544 (2010)
- [10] C. Lee, X. Wie, J. W. Kysar und J. Hone, *Science* **321**, 385 (2008)
- [11] N. Tombros et al., *Nature* **448**, 571 (2007)

DIE AUTOREN

Patrik Recher (FV Tiefe Temperaturen) studierte Physik an der Universität Basel, wo er 2003 auch promovierte. Anschließend folgten Auslandsaufenthalte in Stanford sowie an der Universität Leiden und der TU Delft. Seit 2008 forscht er in Würzburg, wo er seit 2009 eine Emmy-Noether-Nachwuchsgruppe leitet.



Björn Trauzettel (FV Tiefe Temperaturen) studierte Physik in Freiburg und

Seattle (USA). Er promovierte 2003 an der Universität Freiburg und ging anschließend an das Laboratoire de Physique des Solides in Orsay (Frankreich). Es folgten weitere Forschungsaufenthalte in Leiden und Delft sowie an der Universität Basel. Seit 2007 ist er Professor mit Forschungsschwerpunkt Theorie der Mesoskopischen Physik an der Universität Würzburg.



¹⁾ Die Struktur verspannten Graphens ist auf dem Titelbild dieser Ausgabe zu sehen.