

Graphen ist ein hexagonales Bienenwabengitter von Kohlenstoffatomen.

Wundermaterial Graphen

Der Quanten-Strom in Graphen

Florian Libisch

Graphen ist eine zweidimensionale Schicht von Kohlenstoff-Atomen angeordnet in einem Bienenwabengitter (siehe Aufmacher). Im wesentlichen also eine einzige Lage Graphit. Aber diese eine Lage hat es in sich: Graphen leitet besser als ein Metall, hat herausragende mechanische Stabilität, und zeigt Quanteneffekte schon bei Raumtemperatur.

Die Herstellung beherrschen experimentelle Gruppen mittlerweile gut. Während in den ersten Experimenten noch mittels Klebeband einzelne Lagen Graphit abgezogen wurden, kann man heute unter geeigneten Bedingungen Graphen auf hochreinen Kupferoberflächen in hoher Qualität wachsen lassen und damit zum Beispiel Touch-Screens herstellen. Da das

Material auf Grund seiner extrem kleinen Dicke – oder besser Dünne – durchsichtig ist, aber gleichzeitig gut leitet, lässt es sich im Gegensatz zu dem spröden Indiumzinnoxid (ITO) für biegsame Bildschirme einsetzen.

Bandstruktur

Woher kommen denn nun die speziellen Eigenschaften von Graphen? Vor allem auf Grund seiner ungewöhnlichen Bandstruktur. Darunter versteht der Physiker den Zusammenhang zwischen Energie und Wellenzahl einer Elektronenwelle. Die Quantentheorie lehrt uns, dass Elektronen als Wellen durch einen Festkörper laufen. So eine Elektronenwelle charakterisiert man durch ihre Wellenlänge und ihre Ausbreitungsrichtung. Die Wellenlänge λ ist die Länge, auf der die Welle eine komplette Schwingung ausführt. Umgekehrt ist die Wellenzahl $k = 2\pi/\lambda$ die Anzahl an Schwingungen pro Längeneinheit. Bei der Ausbreitung der Elektronenwelle durch ein Kristallgitter sind nun, je nach Gitter, bestimmte Richtungen und Wellenzahlen erlaubt. Diesen Zusammenhang nennt man Bandstruktur. Diese sagt viel über die Ei-

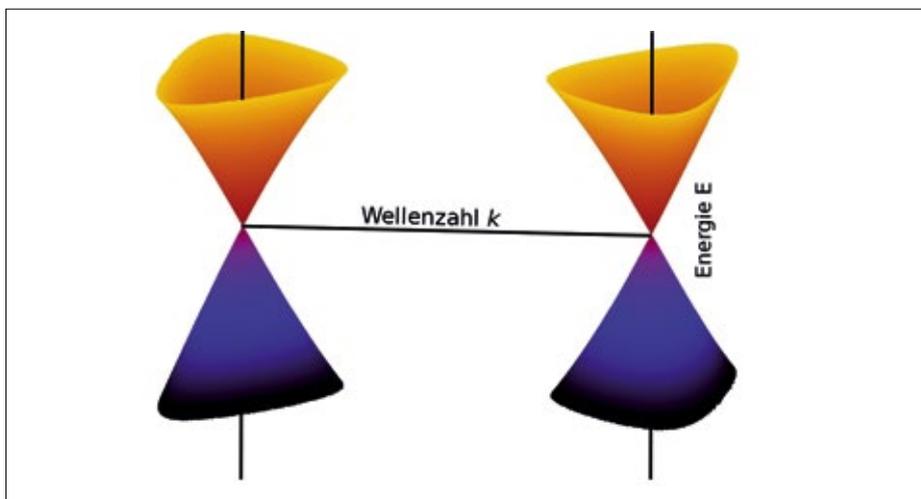


Abb. 1: Der Zusammenhang zwischen Wellenzahl und Energie zeigt eine Doppelkonusstruktur, die für die ungewöhnlichen Eigenschaften von Graphene verantwortlich ist.

genschaften eines Materials aus. Gibt es zum Beispiel keine erlaubten k-Werte in einem bestimmten Energiebereich, so kann bei dieser Energie auch keine Elektronenwelle durch das Material laufen – es isoliert. Graphen hingegen hat keine solche Lücke, sondern zeigt einen linearen Zusammenhang zwischen Energie und Wellenzahl: je größer die Energie, desto größer die Wellenzahl und desto kleiner die Wellenlänge (siehe Abb. 1).

Quantisierung des Stromes

Wie kann man die Wellennatur der Elektronen in Materialien wie Graphen direkt nachweisen? Eine Möglichkeit dafür ist die Quantisierung des Stromes durch eine Engstelle, wie in Abb. 2 dargestellt. Legt man eine bestimmte Spannung zwischen den beiden Seiten der Engstelle an, kann ein Strom an Elektronen fließen. Durch so einen Flaschenhals mit der Breite W passen allerdings nicht Elektronen mit beliebiger Wellenlänge. Die Bandstruktur sagt uns, dass mit größerer angelegter Spannung

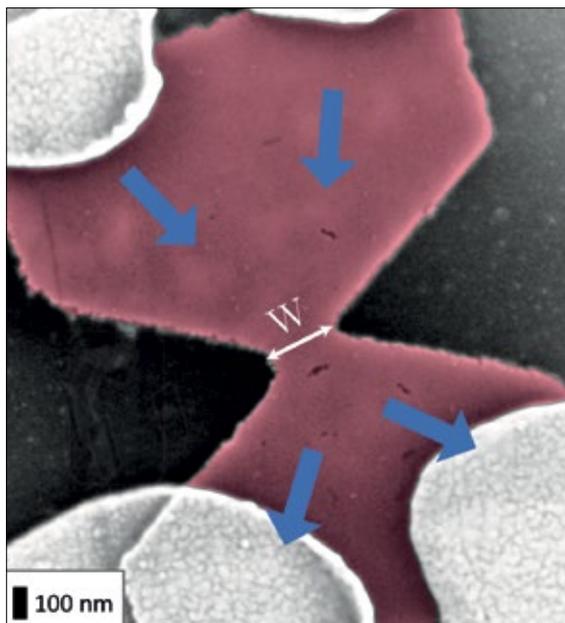


Abb. 2: Verengung aus Graphene (rot schattiert) der Breite W zur Messung der Quantisierung des Elektronenstromes. Der Strom läuft über Goldkontakte (hell) durch die Verengung (siehe blaue Pfeile). (Bild: B. Terres und C. Stampfer, RWTH Aachen)

und damit größerer Energie, auch die Wellenzahl größer wird und somit die Wellenlänge kleiner. Stellt man sich das Elektron als Welle vor, so muss ein ganzzahliges

Vielfaches der Wellenlänge durch die Breite W passen also $W/\lambda = n$, mit einer ganzen Zahl n . Insofern bedeutet eine kleinere Wellenlänge, dass n größer wird, und mehr Elektronen die Chance haben die Engstelle zu passieren. Das passiert nicht kontinuierlich, sondern mit einem Sprung jedes Mal, wenn sich ein weiteres Vielfaches der Wellenlänge ausgeht. Diesen sprunghaften Anstieg des Stromes als Funktion der angelegten Spannung wurde nun für Graphen gemessen.



Herzlichen Glückwunsch

In unserer Gruppe wird die GIT sehr gern gelesen, weil die Artikel kurz und verständlich sind, so dass man schnell einen Überblick zu den neuesten Entwicklungen bekommt. Wir gratulieren herzlich zum Jubiläum und freuen uns auf viele weitere Jahre mit der GIT.

Prof. Dr. Kevin Pagel



Herzlichen Glückwunsch

Happy Birthday für langjährige und umfassende Information. Gute Übersicht oder breiter Einstieg und das bei großer Verbreitung - weiter so.

Prof. Holger Stark

Experiment

Die theoretischen Vorhersagen eines quantisierten Stromes experimentell zu bestätigen, ist nicht einfach: kleinste Fehler im Graphen wirken als Streuzentren. Die Elektronenwellen werden gestreut und das resultierende Rauschen im Strom überdeckt die gesuchten Stufen. Daher verwendet man sehr saubere Proben (siehe Abb. 2), in denen das Graphen zwischen Lagen von hexagonalem Bornitrid isoliert wird wie eine dünne Scheibe Käse zwischen Toastscheiben, um jegliche Streuung an Schmutz oder adsorbierten Wassermolekülen zu vermeiden. Das gesamte Sandwich aus Graphen wird nun auf die gewünschte Geometrie der Verengung zugeschnitten und dann auf sehr tiefe Temperaturen abgekühlt (auf etwa -270 Grad Celsius wo selbst das Edelgas Helium flüssig ist), um thermisches Rauschen zu unterbinden und eine höhere Energieauflösung zu erreichen. Die Messkurven zeigen allerdings keine perfekten Stufen, sondern regelmäßige, reproduzier-

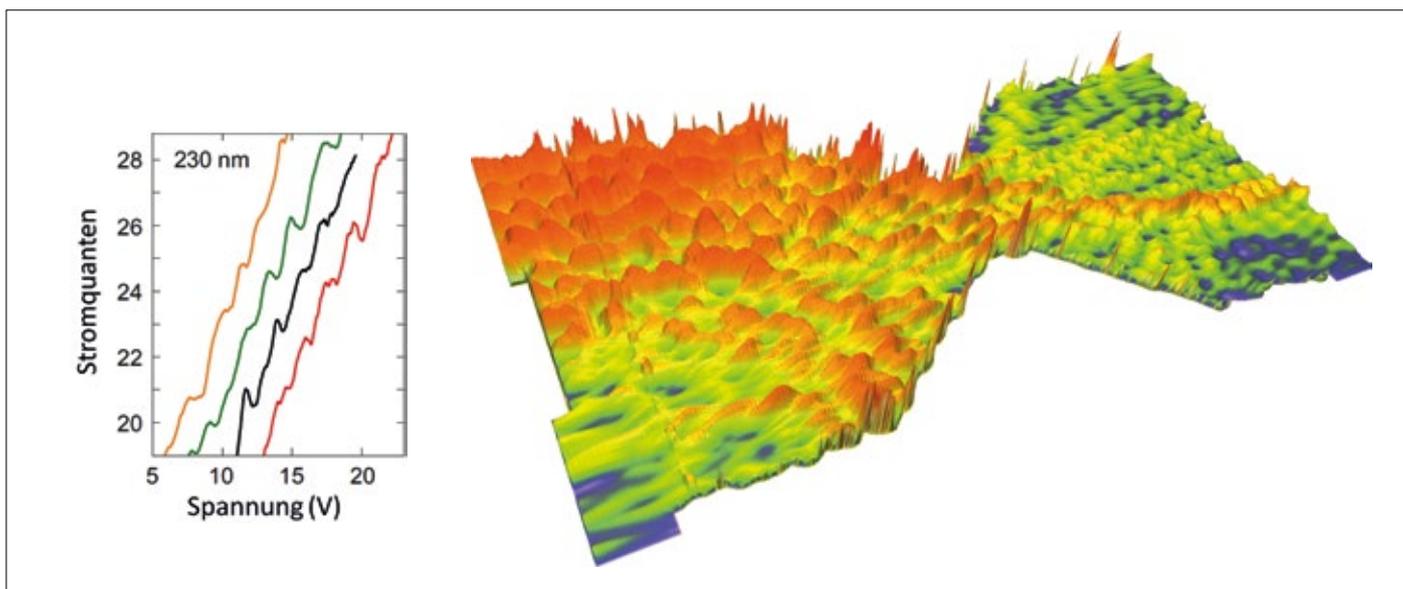


Abb. 3: a) Strom durch die Verengung als Funktion der angelegten Spannung für verschiedene Messkurven. Die Stromquantisierung führt zu Oszillationen (zum Teil angezeichnet durch Pfeile). b) Visualisierung einer Elektronenwelle beim Durchqueren der Verengung.

bare Oszillationen (Abb. 3a). Warum das so ist, zeigen Simulationen der Verengung. Auch im Computer, unter genau vorgegebenen, idealen Bedingungen, finden sich die gleichen Strukturen: sie entstehen beim Streuen der Elektronenwelle an den Rändern der Verengung (Abb. 3b), die durch das Zuschneiden des Graphengitters auf atomarer Skala nicht mehr glatt sind. Trotzdem ist die Quantisierung sehr wohl ablesbar und zwar im Abstand der Oszillationen zueinander. Dieser Abstand ist durch die nötige Energie gegeben, um eine weitere Wellenlänge durch die Verengung zu schleusen. Wegen der linearen Bandstruktur von Graphen zeigt das experimentelle Signal (und die Simulation) ganz regelmäßige Oszillationen, deren Abstand genau zur Breite der Verengung passt. Ein Vergleich von Experiment und Simulation liefert so den Beweis, dass die gefundenen Signaturen durch die Wellennatur der Leitungselektronen gegeben sind.

Ausblick

In Anbetracht der zunehmenden Miniaturisierung elektronischer Bauelemente werden Quanteneffekte immer wichtiger. Materialien wie Graphen eröffnen die Möglichkeit, Quanteneffekte nicht nur als lästige Störung zu sehen, sondern als

mögliche Realisierung von sehr schnellen, effizienten Schaltelementen zu verwenden. Die experimentelle Bestätigung von Quanteneffekten in Graphen ist ein wesentlicher Schritt in die Richtung, diese für Anwendungen auszunutzen.

KONTAKT |

Dr. Florian Libisch
Technische Universität Wien
Wien, Österreich



Warum lesen Sie die GIT?

Nicole Achilles, Bioclimatic GmbH

Ich lese die GIT, um über den Tellerrand hinaus zu blicken, denn der Beruf erlaubt einem häufig nur in einem sehr schmalen Ausschnitt des weiten Felds der Chemie und des Laborbetriebs tätig zu sein. Und bei der GIT Laborfachzeitschrift werden oft interessante Themen aufgegriffen und dargestellt.



Herzlichen Glückwunsch

Als moderne, professionell geführte Laborfachzeitschrift unterstützt die GIT seit nunmehr 60 Jahren Anwender und Forscher, immer fair, objektiv und über der Sache stehend. Für PSS, den Spezialisten für die Charakterisierung von Makromolekülen, war und ist die GIT ein gutes Medium und Forum, um neue Lösungen und neue Anwendungsbereiche der LC für Polymere, Biopolymere und Proteine einem interessierten Fachpublikum vorzustellen. Im Namen aller PSS-Mitarbeiter wünschen wir alles Gute zu diesem besonderen Jubiläum!

Daniela Held und Jochen Leinweber,
PSS Polymer Standards
Service GmbH



Weitere Beiträge zum Thema:
<http://bit.ly/GIT-Gr>



Die Chemie des Graphens:
<http://bit.ly/GIT-ChG>



Artikel des Autors:
<http://bit.ly/GIT-NC>