

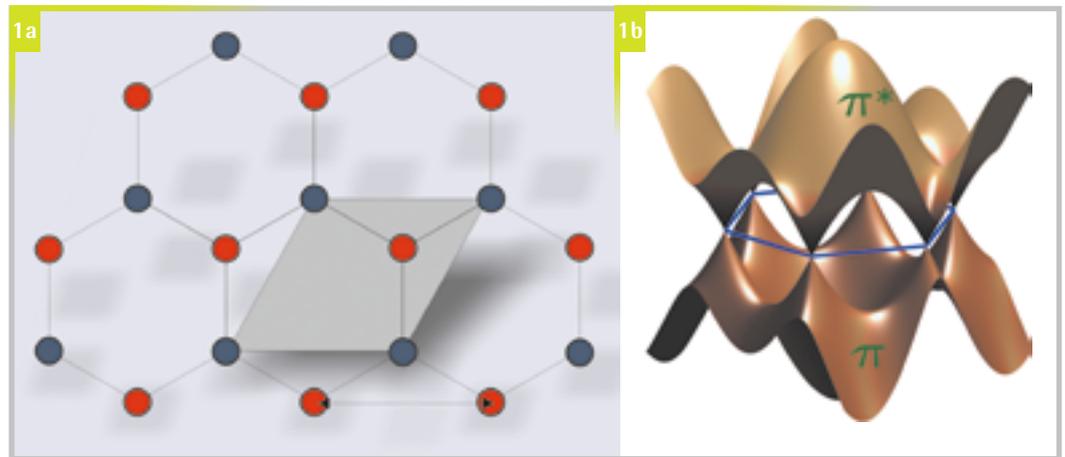
Wundermaterial Graphen

DIE AUSSERGEWÖHNLICHEN EIGENSCHAFTEN EINES ALLGEGENWÄRTIGEN MATERIALS

Nur sechs Jahre nach der »Entdeckung« wurde der Nobelpreis für Physik im vergangenen Jahr »für grundlegende Experimente mit dem zweidimensionalen Material Graphen« an die Physiker Andre Geim und Konstantin Novoselov verliehen.

Gemessen an anderen Nobelpreisen ist diese Zeitspanne zwischen Entdeckung und Vergabe extrem kurz und untermauert die Besonderheit dieses Materialsystems.

Ein Wissenschaftler vom Institut für Festkörperphysik erläutert die außergewöhnlichen Eigenschaften des Graphens.



Graphen ist eine einatomar dicke, planare Kohlenstoffschicht. Die allotropische Vielfalt der Kohlenstofffestkörper ergibt sich aus den Hybridisierungsmöglichkeiten der Kohlenstoffatome. Entscheidend für die Ausbildung niedrigdimensionaler Strukturen wie Graphen (2d), den Kohlenstoffnanoröhrchen (1d) oder den Buckminster-Fullerenen (0d) ist dabei die so genannte sp^2 -Hybridisierung der Kohlenstoffatome.

Die charakteristische Honigwabenstruktur des Graphengitters ist das Resultat dieser Hybridisierung (Bild 1). Die σ -Bindungen in der Atomenebene verleihen dem Material dabei seine außergewöhnlichen mechanischen Eigenschaften, während die periodische Anordnung der p_z -Orbitale als so genannte π -Bänder beschrieben werden, in denen

sich die restlichen Elektronen der C-Atome als frei bewegliches Gittergas befinden und für die optischen und elektrischen Eigenschaften verantwortlich sind. Im Vergleich zu anderen Festkörpern ist die Bandstruktur des Graphens besonders: Wie in Bild 1b) dargestellt, berühren sich die besetzten π - und unbesetzten π^* -Bänder. Die Dispersion der Elektronen ist an diesen Punkten innerhalb eines kleinen Energieintervalls linear und die Elektronen werden in diesem Zusammenhang oft mit masselosen, relativistischen Fermionen identifiziert.

Das Wundermaterial ist allgegenwärtig. Mit jedem Bleistiftstrich hinterlassen wir Unmengen von Graphen auf einem Blatt Papier. Entscheidend im Hinblick auf fundamentale physikalische Fragestellungen, wie zum Beispiel

den elektronischen Transport oder Anregungen, ist jedoch, dass das Graphen nahezu defektfrei vorliegt. In der Vergangenheit sind daher verschiedene Methoden zur Anwendung gekommen. Neben dem naheliegenden Ansatz der kontrollierten Exfoliation von Graphit lassen sich Graphenschichten auch durch einfaches Heizen von SiC-Einkristallen oder Pyrolyse von Kohlenwasserstoffen auf Metalloberflächen gewinnen. Der katalytische Ansatz wird heute bereits in großtechnischen Verfahren angewendet, so dass sich Graphen bereits als Massenprodukt, zum Beispiel als transparentes und leitfähiges Anodenmaterial, auf den Weltmärkten anbieten lässt.

Das Institut für Festkörperphysik beschäftigt sich in erster Linie neben der Herstellung und Manipulation mit Transporteigenschaften und elektronischen Anregungen in diesem Material. Momentan befinden sich die vergleichsweise hochenergetischen kollektiven Anregungsmoden des relativistischen Elektronengases im Fokus der Forschung. Die Verlustenergien dieser so genannten Plasmonen, die im Terahertz-Bereich liegen und

Generell ist das Graphen ein ideales Testsystem zum Studium kollektiver Anregungen in niedrigdimensionalen Elektronengasen. Die Gruppengeschwindigkeit der Plasmonen liegt bei etwa 10^6 Metern pro Sekunde. Anhand dieses Materials konnte gezeigt werden, wie sich strukturelle Imperfektionen auf die Lebensdauer von Plasmonen auswirken. Atomare Stufen dämpfen effektiv diese kollektive Mode, die dann in viele Einzel-

tung Plasmonics bedarf es deshalb noch defektärmerer Schichten auf makroskopischer Skala, wie sie sich mittlerweile durch weiter optimierte Verfahren auch herstellen lassen.

Hinsichtlich fundamentaler Fragestellungen, wie die der Wechselwirkung der Plasmonen mit anderen Quasiteilchen, sind Defekte weniger wichtig. Interessant ist dabei beispielsweise, dass, im Ge-

Bild 1
 a) Graphengitter. Die roten und blauen Kreise symbolisieren die beiden Kohlenstoff-Untergitter und der grau hinterlegte Bereich die 2-atomige Einheitszelle. Die Gitterkonstante beträgt $a = 0,246$ Nanometer.
 b) Elektronische Dispersion vom Graphen. Die Untergitterentartung führt dazu, dass sich die besetzten π und unbesetzten π^* -Bänder an den so genannten K-Punkten berühren. Wie man erkennt, ist die Dispersion an diesen Punkten linear, das heißt die Elektronen lassen sich in Analogie zum Licht im Modell masseloser relativistischer Teilchen beschreiben. Die besondere Bandstruktureigenschaft ermöglicht es, dass sich zum Beispiel der Quantenhalleffekt bei Raumtemperatur (!) beobachtet lässt.

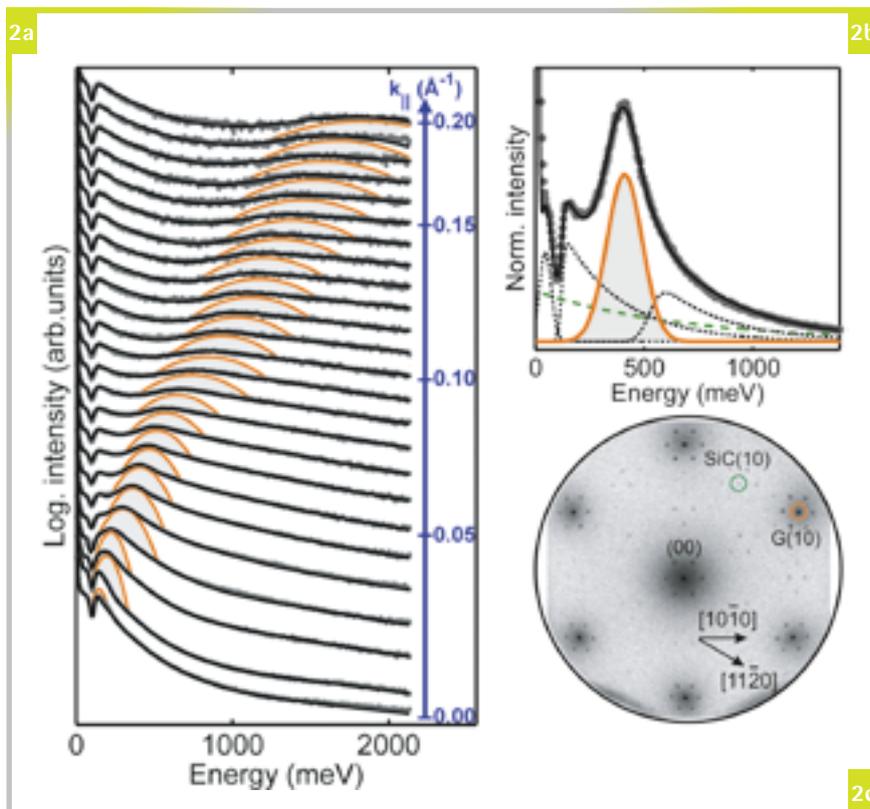


Bild 2
 a) Plasmonen-Verlustspektren von Graphen. Mit zunehmendem Streuvektor verschiebt sich der Peak zu höheren Energien.
 b) Bei der Analyse des Plasmonenverlustes (orange Linie) müssen auch andere Verluste wie Phononen und Multipol Plasmonen berücksichtigt werden.
 c) Das Beugungsbild liefert Informationen über die detaillierte Struktur des Graphens auf der SiC(0001)-Unterlage.

entsprechend der Dispersion durchstimmbare sind, sind dabei formal durch die gleichen Parameter bestimmt wie die Leitfähigkeit, so dass elektrische Transportmessungen (siehe unten) hier einen komplementären Zugang liefern. Bild 2 zeigt eine typische Sequenz von Verlustspektren von Graphen bei unterschiedlichen Streuvektoren. Der dominante Verlust (orange Linie) kann dabei dem Plasmon des 2d Elektronengases zugeschrieben werden.

elektronen-Anregungen zerfällt. Für Plasmonen mit Wellenlängen von fünf Nanometern liegt die Lebensdauer bei nur circa einer Femtosekunde, wenn die Struktur etwa 100.000 atomare Stufen oder Versetzungen pro Zentimeter aufweist. Aber auch für langwellige Plasmonen, die weniger empfindlich auf atomare Defekte reagieren, ließen sich momentan nur Wege von maximal 0,1 Mikrometer zurücklegen. Für technisch interessante Anwendungen in Rich-

gensatz zum elektronischen Transport, die kollektiven Anregungen im Graphen nicht vom chemischen Potenzial, das heißt der Bandfüllung, abhängen. Eine Wechselwirkung mit Elektron-Loch Anregungen (Exzitonen) konnte dabei erstmals anhand eines Knicks in der Dispersion nachgewiesen werden. Bei Verwendung nahezu perfekter Schichten wird es sogar zur Bildung neuer Quasiteilchen, so genannter Plexzitonen, in diesem Material kommen.



PD Dr. Christoph Tegenkamp

Jahrgang 1970, ist seit 2007 Privatdozent für Physik am Institut für Festkörperphysik an der Leibniz Universität Hannover. Seine Arbeitsgebiete umfassen Oberflächenphysik, Molekulare Elektronik, Transport und Anregungen in metallischen Nanostrukturen sowie Graphen.

Kontakt: tegenkamp@fkp.uni-hannover.de

Ausblick

In den nächsten Jahren soll das Potenzial dieses Materials weiter ausgelotet werden. Die Nanostrukturierung von Graphen steht dabei stark im Vordergrund. Bänder von Graphen, so genannte Ribbons beziehungsweise Grapheninseln mit nur wenigen Nanometern Durchmesser, finden Anwendungen als plasmonische Leiter oder Einzelelektronentransistoren. Die Flexibilität dieses Material, das heißt die leichte Manipulationsmög-

Zur detaillierten Charakterisierung solcher Graphen Nanostrukturen kann die Arbeitsgruppe Pfnür seit diesem Jahr auf ein 4 Spitzen STM-SEM zurückgreifen (Bild 3).

Mithilfe des hochauflösenden Elektronenmikroskops lassen sich in vergleichbar einfacher Weise Graphen-Nanostrukturen lokalisieren und erlauben eine genaue Positionierung aller vier Spitzen der Rasterstunnelmikroskope. Neben der Möglichkeit, definierte Vierpunkt-Transportmessungen

Bild 3

Der Messbetrieb des von der DFG geförderten Großgerätes (4 Spitzen STM-SEM) ist am 21. März 2011 offiziell im LNQE-Forschungsbau aufgenommen worden.



lichkeit eines »offenen« 2d Elektronengases, das zudem de facto chemisch inert ist, wird es dabei erlauben, quasi beliebige Nanostrukturen verschiedener Dimension zu kombinieren.

auch auf kleinen Skalen durchzuführen, lassen sich ebenso die Topographie der Nanostruktur sowie die lokale elektronische Struktur bestimmen und entsprechend mit Transporteigenschaften korrelieren.