

# WUNDERSTOFF aus dem BLEISTIFT

Graphen, eine kürzlich entdeckte Form von Kohlenstoff, verspricht nicht nur interessante praktische Anwendungen, sondern bietet auch neuartige grundlegende Physik.

Von Andre K. Geim und Philip Kim

**W**enn Sie einen simplen Bleistift betrachten, werden Sie kaum glauben, dass er einmal ganz oben auf der Liste der neuesten Technikprodukte stand. In England unterlagen die heute alltäglichen Schreibgeräte wegen der strategisch-militärischen Bedeutung des enthaltenen Graphits sogar einem Exportverbot. Doch auch derzeit steht der Bleistift wieder an vorderster Front des technischen Fortschritts; denn jeder damit gezogene Strich enthält kleine Mengen eines Materials, das zum Aufregendsten zählt, was es heute in der Nanotechnologie gibt: Graphen – mit Betonung auf der zweiten Silbe.

Die Bezeichnung kommt von Graphit – dem Stoff, aus dem die Bleistiftmine besteht. Dabei handelt es sich um eine Kohlenstoff-Modifikation, die aus übereinandergestapelten ebenen Schichten aufgebaut ist. Seit diese Struktur zu Anfang des 20. Jahrhunderts aufgeklärt wurde, haben Physiker und Werkstoffwissenschaftler immer wieder versucht, den Graphit in solche einzelnen Schichten aufzuspalten; denn ein Material mit einer derart einfachen und eleganten Geometrie versprach interessante Eigenschaften. Die Kohlenstoffatome sind darin in Form sich wiederholender Sechsecke angeordnet, wodurch ein ebenes Gitter entsteht, das so genanntem Hasendraht ähnelt. Die Schichtdicke beträgt nur genau ein Kohlenstoffatom.



Jahrelang schlugen alle Versuche zur Herstellung von Graphen jedoch fehl. Die beliebteste Methode war damals, Moleküle als Keile zwischen die Schichten zu schieben und diese dadurch voneinander zu trennen – Chemiker sprechen von Interkalation. Obwohl bei diesem Vorgehen hin und wieder bestimmt auch Graphen-Schichten anfielen, wurden sie nie als solche erkannt. Letztlich entstand ein Brei aus graphitischem Material, der kaum von nassem Ruß zu unterscheiden war. So schwand allmählich das Interesse an der Methode.

Später versuchten Forscher die Trennung auf direkterem Weg. Durch Reiben oder Kratzen von Graphitkristallen an anderen Oberflächen zerspannten sie diese in immer dünnere Scheiben. Eine solche »mikromechanische Spaltung« ist zwar etwas grobschlüchtig, funktioniert aber erstaunlich gut. Es gelang damit, Graphitfilme aus weniger als hundert atomaren Schichten herzustellen. Schon 1990 erzeugten Physiker an der RWTH Aachen Exemplare, die so dünn waren, dass man hindurchsehen konnte.

Ein Jahrzehnt später konnte einer von uns (Kim) in Zusammenarbeit mit Yuanbo Zhang, damals Doktorand an der Columbia University in New York, das mikromechanische Spaltungsverfahren wesentlich verfeinern; das Resultat war die Hightech-Variante eines Bleistifts: der »Nanobleistift«. Beim Schreiben damit entstanden Plättchen aus nur 20 bis 50 atomaren Schichten (siehe Kasten auf S. 89). Es handelte sich jedoch im-

mer noch um Graphit, nicht Graphen. Kaum jemand glaubte mehr im Ernst daran, dass monoatomare Schichten tatsächlich herstellbar und stabil wären.

Doch die Pessimisten wurden 2004 eines Besseren belehrt. Zusammen mit Kostya S. Novoselov und seiner Gruppe an der University of Manchester prüfte einer von uns (Geim) eine Vielzahl von Möglichkeiten, noch dünnere Graphitproben zu erzeugen. Damals nutzten die meisten Laboratorien dafür Ruß als Ausgangsstoff, aber Geim und seine Mitarbeiter bewiesen ein glückliches Händchen, als sie stattdessen Graphit zerkleinerten und die Bruchstücke als Ausgangsmaterial verwendeten. Sie nahmen ein Plastikklebeband, bogen es mit der klebenden Seite um einen solchen Splitter herum und zogen es wieder glatt. Dabei wurde der winzige Kristall in zwei Teile gespalten. Je öfter die Forscher den Vorgang wiederholten, desto dünnere Plättchen erhielten sie (siehe Kasten auf S. 91). Als sie schließlich die dünnsten untersuchten, stellten sie erstaunt fest, dass einige atomare Dicke hatten. Und was noch frappierender war: Die Graphenfolien erwiesen sich bei Normaldruck und Raumtemperatur als stabil.

Diese Entdeckung löste eine wahre Forschungswelle aus. Graphen ist nicht nur das dünnste bekannte Material, sondern, wie sich zeigte, auch äußerst fest und steif. Zudem leitet es in reiner Form bei Raumtemperatur Elektronen schneller als jeder andere Stoff. Auf der ganzen Welt untersuchen Ingenieure

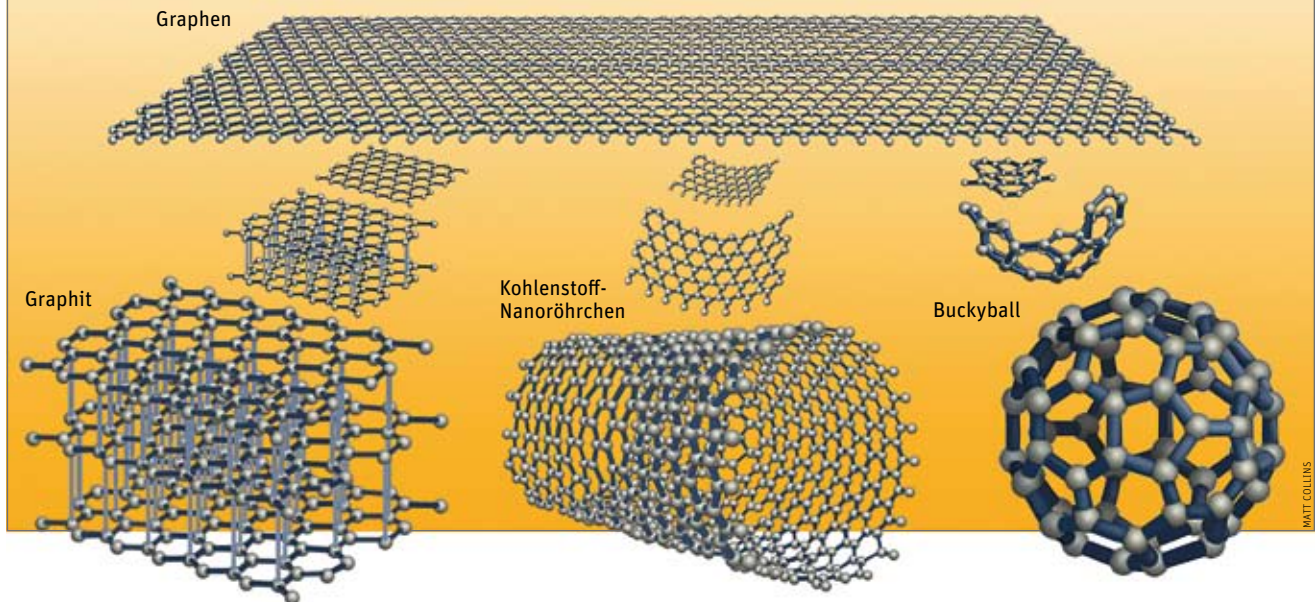
## In Kürze

- ▶ Graphen ist ein nur **eine Atomlage dickes Kohlenstoffblatt**, das Physiker erst kürzlich isolieren konnten. Im Graphit der Bleistiftmine sind viele solche Schichten übereinandergestapelt.
- ▶ Reines Graphen leitet elektrischen Strom bei Raumtemperatur besser als jede andere Substanz, weil sich die Elektronen darin fast mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Es kann deshalb zum Nachweis **exotischer Quantenphänomene** dienen, die sonst nur unter extremen Bedingungen beobachtbar wären – etwa in Schwarzen Löchern oder Hochenergie-Beschleunigern.
- ▶ Dank seiner ungewöhnlichen Eigenschaften eignet sich Graphen vermutlich auch für eine ganze Palette **innovativer Produkte** wie ultraschnelle Transistoren.

## DIE URFORM ALLER GRAPHIT-ARTEN

**In Graphen sind Kohlenstoffatome in Form von Hasendraht angeordnet.** Es bildet den Grundbaustein einer Reihe von graphitischen Stoffen. Im Graphit selbst sind die Ebenen zu einer Art molekularem Blätterteig übereinandergestapelt, der wegen der schwachen Bindung zwischen den Schichten relativ bröselig

ist. Verbiegt man Graphen – teils durch Einbau von Fünfecken – zu runden Gebilden, entstehen so genannte Fullerene. Dazu gehören fußballförmige »Buckyballs«, Zylinder mit Wabenmuster, die als Kohlenstoff-Nanoröhren bekannt sind, und verschiedene Sphäroide, die beide Formen vereinen.



die Substanz deshalb nun auf ihre Eignung für superharte Verbundwerkstoffe, intelligente Displays, ultraschnelle Transistoren und Quantenpunkt-Computer.

Dank gewisser Besonderheiten auf atomarer Ebene ist Graphen aber auch für die Grundlagenforschung hochinteressant. So erlaubt es Vorstöße in den Bereich der relativistischen Quantenmechanik. Die Untersuchung der hochgradig exotischen Phänomene, die dort auftreten, war bisher Astronomen mit ihren millionenschweren Teleskopen und Teilchenphysikern mit ihren Milliarden Euro teuren Beschleunigern vorbehalten. Am Graphen lassen sich Voraussagen der relativistischen Quantenmechanik dagegen auch mit normalen Laborgeräten testen.

### Militärisches Geheimnis

Angesichts der weiten Verbreitung des Bleistifts in unseren Tagen erstaunt es, dass er in alten schriftkundigen Kulturen wie der chinesischen oder griechischen keine Rolle gespielt hat. Erst im 16. Jahrhundert entdeckten die Engländer ein großes Vorkommen von reinem Graphit, den sie Plumbago (lateinisch für Bleierz) nannten. Sie erkannten schnell die Eignung des Materials zum Schreiben und entwickelten daraus unverzüglich ein handliches Gerät als Ersatz für Gänsekiel und Tinte. In europäischen Gelehrtenkreisen machte der Bleistift bald Furore.

Dass Plumbago kein Blei, sondern Kohlenstoff ist, fand erst 1779 der schwedische Chemiker Carl Scheele heraus. Ein Jahrzehnt später schlug der deutsche Geologe Abraham Gottlob Werner deshalb vor, die Substanz nach dem griechischen Wort für »schreiben« besser Graphit zu nennen. Inzwischen hatten die Munitionshersteller eine weitere Verwendung des bröseligen Materials gefunden: Es erwies sich als ideales Futter für die Gussformen von Kanonenkugeln – was zum streng gehüteten militärischen Geheimnis wurde. Während der Napoleonischen Kriege verfügte die englische Krone deshalb auch eine Ausfuhrsperrung für Bleistifte gegenüber Frankreich.

In den letzten Jahrzehnten hat Graphit etwas von diesem Nimbus als Hochtechnologie-Werkstoff zurückgewonnen; denn Wissenschaftler stießen auf neue, hochinteressante Modifikationen von Kohlenstoff mit hohem Anwendungspotenzial, die in gewöhnlichen graphitischen Materialien vorkommen. Die erste war das berühmte Buckminsterfulleren, auch salopp Buckyball genannt: ein fußballförmiges Molekül, das die US-amerikanischen Chemiker Robert Curl und Richard E. Smalley zusammen mit ihrem englischen Kollegen Harry Kroto 1985 entdeckten. Sechs Jahre später identifizierte der japanische Physiker Sumio Iijima jene zylindrischen Anordnungen von Kohlenstoffatomen mit Wabenstruktur,

### SCHON GEWUSST?

Graphit erwies sich nach seiner Entdeckung im 16. Jahrhundert in England nicht nur als ideales Material für Schreibgeräte, sondern auch als perfektes Futter für die Gussformen von Kanonenkugeln. Das verlieh ihm militärische Bedeutung. Während der **Napoleonischen Kriege** Anfang des 19. Jahrhunderts verbot England deshalb die Ausfuhr von Bleistiften nach Frankreich.

die inzwischen als Kohlenstoff-Nanoröhren bekannt sind. Obwohl schon früher darüber berichtet worden war, hatte niemand die Bedeutung des Materials erkannt. Die beiden neuen molekularen Formen erhielten die Sammelbezeichnung Fullerene (zu Ehren des visionären US-Architekten und Ingenieurs Buckminster Fuller, der analog gestaltete geodätische Kuppeln entworfen hatte).

### Molekularer Hasendraht

Die grundlegende Anordnung der Atome ist für Graphit, Fullerene und Graphen dieselbe. Jede Struktur beginnt mit sechs Kohlenstoffatomen, die in Form eines regulären Sechsecks fest miteinander verbunden sind; Chemiker sprechen von einem Benzolring.

Auf der nächsthöheren Stufe im Komplexitätsgrad steht Graphen, in dem viele solche Sechsringe zu einem ebenen Wabenmuster, das wie Hasendraht aussieht, aneinandergesetzt sind. Die anderen graphitischen Formen beruhen auf dieser Grundstruktur. Bei den Kohlenstoff-Nanoröhren sind die Graphen-Schichten zu Zylindern aufgerollt und bei den Buckyballs wölben sie sich durch zusätzlich eingebaute Fünfecke zu einer Kugel oder einem Ellipsoid. Bei Graphit schließlich sind sie, wie erwähnt, übereinandergestapelt. Dabei halten schwache molekulare Wechselwirkungen – so genannte van der Waals-Kräfte – die einzelnen Schichten zusammen. Wegen dieser lockeren Verbindung zwischen den Graphen-Ebenen genügt beim Schreiben mit einem Bleistift schon der Druck auf das Papier, dass sich Schichtpakete vom Graphit ablösen und als Strich auf der Unterlage zurückbleiben.

Wie rückblickend klar ist, waren die neu entdeckten molekularen Formen von Kohlen-

stoff schon immer präsent. So kommen Fullerene im Ofenruß vor, wenn auch nur in kleinen Mengen. Ebenso enthält jeder Bleistiftstrich zweifellos winzige Graphen-Stücke, die früher nur niemand bemerkt hat. Seit ihrer Entdeckung jedoch stehen sie im Brennpunkt wissenschaftlicher Forschung.

Buckyballs sind vor allem deshalb interessant, weil es sich um eine völlig neue Art von Molekülen handelt. Allerdings könnten sie auch bedeutende praktische Anwendungen haben – etwa bei der Verabreichung von Arzneimitteln. Kohlenstoff-Nanoröhren vereinen gleich eine ganze Reihe von ungewöhnlichen Eigenschaften – chemischen, elektronischen, physikalischen, optischen und thermischen – auf sich, was eine breite Palette potenzieller Einsatzmöglichkeiten eröffnet. So könnten die winzigen Kohlenstoffzylinder als Halbleitermaterial Silizium in Minichips ersetzen oder Fasern liefern, die sich zu sehr leichten und dabei extrem festen Tauen flechten lassen. Obwohl Graphen, die »Mutter« aller graphitischen Formen, erst seit ein paar Jahren Eingang in solche Zukunftsvisionen gefunden hat, scheinen seine Aussichten ebenfalls rosig. Wahrscheinlich wird es sogar noch faszinierendere technologische Anwendungen haben als seine Vettern aus der Kohlenstoff-Familie. Zugleich dürfte es tiefere Einsichten in grundlegende physikalische Prinzipien vermitteln.

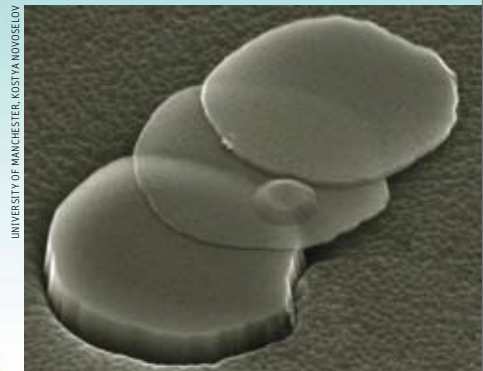
Vor allem zwei Eigenschaften machen Graphen zu einem außergewöhnlichen Stoff. So fällt es trotz der relativ groben Herstellungsmethode in bemerkenswert hoher Qualität an. Das liegt neben der Tatsache, dass es aus reinem Kohlenstoff besteht, vor allem an der äußerst regelmäßigen Struktur, in der die Atome angeordnet sind. Bisher ließ sich kein

## Die Entdeckung von Graphen löste eine wahre Forschungslawine aus

### SCHREIBEN MIT DEM NANOBLEISTIFT

**Zur Herstellung graphitischer Proben** aus möglichst wenigen Schichten – im Idealfall nur einer einzigen – bedurfte es beträchtlicher Anstrengungen. Ein Ansatz bestand darin, einen Graphit-Mikrokristall am Arm eines Rasterkraftmikroskops zu

befestigen und mit der Spitze über eine Siliziumscheibe zu scharben (links). Ein solcher Nanobleistift hinterlässt eine Spur von dünnen Graphen-»Pfannkuchen« auf dem Wafer. Das elektronenmikroskopische Bild (rechts) ist 6000-fach vergrößert.



**Die Aussagen der Quantenelektrodynamik widersprechen fast immer dem gesunden Menschenverstand**

einzigster Defekt – etwa eine unbesetzte Position im Gitter oder ein falsch platziertes Teilchen – in einer Graphen-Probe entdecken. Die perfekte Kristallordnung scheint von den starken, aber nicht starren Bindungen zwischen den Atomen herzurühren. Dadurch entsteht ein Stoff, der härter ist als Diamant, dessen blattförmige Moleküle aber biegsam sind und sich ein gutes Stück weit mechanisch verformen lassen, bevor die Spannung so groß wird, dass sich die Atome neu anordnen.

Die Qualität des Kristallgitters ist auch verantwortlich für die erstaunlich hohe elektrische Leitfähigkeit von Graphen. Die Elektronen können fließen, ohne an Gitterfehlstellen oder Fremdatomen anzustoßen und abzupralen. Sogar Rempelen von den Kohlenstoffatomen auf regulären Plätzen, die auf Grund ihrer thermischen Energie bei Raumtemperatur nicht still sitzen können, halten sich wegen der großen Stärke der interatomaren Bindungen in Grenzen.

Das zweite außergewöhnliche Merkmal von Graphen ist, dass seine Leitungselektronen nicht nur besser vorankommen, weil sie kaum an Hindernisse stoßen, sondern an sich schon viel schneller unterwegs sind – so, als

hätten sie eine weitaus geringere Masse als Elektronen, die sich durch gewöhnliche Metalle oder Halbleiter bewegen. In der Tat sollte man sie besser als elektrische Ladungsträger bezeichnen; denn es sind eigenartige Teilchen in einer bizarren Welt, wo die Gesetze der relativistischen Quantenmechanik herrschen. Ihre Art von Wechselwirkung ist, soweit bekannt, einzigartig für Festkörper. Dank diesem neuartigen Stoff aus der Bleistiftmine spielt die relativistische Quantenmechanik nicht mehr nur im Kosmos und in Teilchenbeschleunigern eine Rolle, sondern hat jetzt auch das Labor erreicht.

**Urknall im Flachland**

Um sich das merkwürdige Verhalten elektrischer Ladungsträger in Graphen klarzumachen, wollen wir es zunächst mit der Bewegung gewöhnlicher Leitungselektronen in einem Metall vergleichen. Diese gelten zwar als frei, sind es aber nicht wirklich; sie bewegen sich jedenfalls deutlich anders als im Vakuum. Da Elektronen eine negative Ladung tragen, bleibt eine positive Ladung zurück, wenn sie ihren Ursprungsort verlassen und sich durch das Metall bewegen. Bei ihrer

**TUNNELN OHNE GRENZEN**

**Da sich die Leitungselektronen** im hochgradig regulären Atomgitter von Graphen praktisch ungehindert bewegen können, erreichen sie so hohe Geschwindigkeiten, dass sich ihr Verhalten nicht mehr mit der normalen Quantenmechanik beschreiben lässt. Vielmehr braucht man deren relativistische Erweiterung. Diese so genannte Quantenelektrodynamik (QED) aber macht einige bizarre Vorhersagen, von denen die Physiker bisher dachten, dass sie nur in Schwarzen Löchern oder Hochenergiebeschleunigern beobachtbar wären. Mit Graphen sollte sich dagegen sogar eine der seltsamsten Folgerungen der QED im Labor testen lassen: das perfekte Quantentunneln.

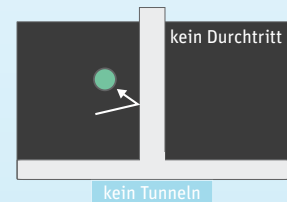
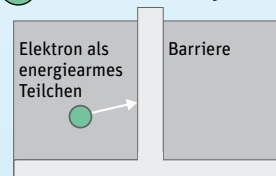
In der klassischen newtonschen Physik prallt ein Objekt an einer Potenzialbarriere ab, wenn es nicht genug Energie hat, um hinüberzugelangen (1). Das würde auch für das Elektron gelten, sofern es nur Teilcheneigenschaften hätte.

**Laut Quantenmechanik kann es sich** aber in manchen Situationen wie eine Welle verhalten, die eine gewisse Ausdehnung im Raum hat (2). Dabei ist die Höhe der Wellenlinie an einem bestimmten Punkt ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass sich das Teilchen in dem Moment gerade dort befindet. Nähert sich eine solche Welle einer Potenzialbarriere, so durchdringt ihr Seitenast das Hindernis teilweise. Daraus ergibt sich eine gewisse, allerdings geringe Wahrscheinlichkeit, das Teilchen auf der anderen Seite der Barriere zu finden. Das Elektron hat das Hindernis somit gleichsam durchtunnelt.

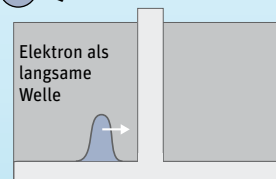
Wenn sich eine Elektronenwelle im Graphen fast mit Lichtgeschwindigkeit einer Potenzialbarriere nähert, macht die QED

eine noch erstaunlichere Vorhersage: Das Elektron durchquert sie mit 100-prozentiger Wahrscheinlichkeit (3). Die hohe elektrische Leitfähigkeit von Graphen scheint das zu bestätigen.

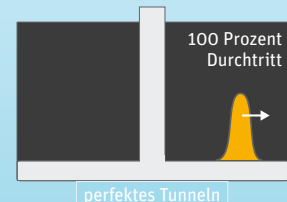
**1 Klassische Physik**



**2 Quantenmechanik**



**3 Quanten-Elektrodynamik**



DANIELA MADRI MOLNAR

Wanderung durch das Kristallgitter treten sie mit dem dortigen elektrostatischen Feld in Wechselwirkung und werden in komplizierter Weise hin- und hergezerrt und -gestoßen. Dadurch benehmen sie sich, als seien sie viel schwerer als gewöhnliche Elektronen; ihre »effektive Masse« ist deutlich höher. Physiker nennen solche Ladungsträger Quasiteilchen.

Während Elektronen im Vakuum fast Lichtgeschwindigkeit erreichen können, bewegen sie sich in Metallen wegen ihrer relativ hohen effektiven Masse sehr viel langsamer. Für ihre theoretische Beschreibung ist das von Vorteil. Bei Partikeln, die sich der Lichtgeschwindigkeit nähern, kommt nämlich Einsteins Relativitätstheorie zum Tragen, die komplizierte Korrekturen erfordert. Weil Quasiteilchen in einem Leiter so langsam sind, lassen sie sich jedoch entweder mit der vertrauten klassischen Physik oder mit normaler, das heißt nichtrelativistischer Quantenmechanik beschreiben.

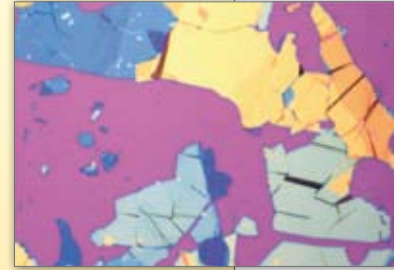
Auch Elektronen, die durch das Hasendrahtgitter von Graphen schlüpfen, verhalten sich wie eine Art Quasiteilchen. Erstaunlicherweise werden sie durch die Wechselwirkung mit dem elektrostatischen Feld der Kohlenstoffatome jedoch nicht schwerer, sondern leichter. Statt normalen Elektronen gleichen sie deshalb eher dem fast masselosen Neutrino. Zwar ist dieses Elementarteilchen, wie der Name schon sagt, elektrisch neutral, während die Quasiteilchen in Graphen eine negative Ladung tragen. Aber wie Neutrinos unabhängig von ihrer Energie oder ihrem Impuls stets fast lichtschnell unterwegs sind, bewegen sich auch die Elektronen in Graphen mit konstant hohem Tempo. Sie erreichen dabei etwa 0,3 Prozent der Lichtgeschwindigkeit. Damit sind sie schnell genug, dass relativistische Effekte auftreten können.

Statt mit der normalen Quantenmechanik muss ihr Verhalten deshalb mit der weitaus komplizierteren relativistischen Erweiterung dieser Theorie beschrieben werden: der so genannten Quantenelektrodynamik. In deren Mittelpunkt steht eine probabilistische Gleichung, die nach dem englischen Physiker Paul A. M. Dirac benannt ist, der sie 1928 formulierte. Folglich bezeichnen Physiker in Graphen wandernde Elektronen manchmal als masselose Dirac-Quasiteilchen.

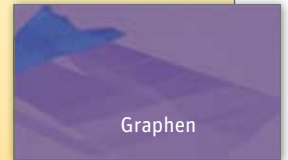
Leider widersprechen die Aussagen der Quantenelektrodynamik fast immer dem gesunden Menschenverstand. Man muss mit scheinbar paradoxen Phänomenen vertraut werden, auch wenn ein gewisses Unbehagen nie ganz verschwindet. Oft beruhen die Paradoxien der Quantenelektrodynamik darauf, dass relativistische Teilchen stets ein bizarres Alter Ego als virtuellen Partner mitschleppen:

## GRAPHEN ZUM SELBERMACHEN – EINE ANLEITUNG

- 1 Arbeiten Sie unter peinlich sauberen Bedingungen.** Jedes Staubteilchen oder Haar macht Ihre Bemühungen zunichte.
- 2 Besorgen Sie sich einen Silizium-Wafer** mit oxidiert Oberfläche, der als Unterlage zum Betrachten des Graphens im Mikroskop dient. Um die Oberfläche zu glätten und gründlich zu reinigen, behandeln Sie diese mit einer Mischung aus Salzsäure und Wasserstoffperoxid.
- 3 Bringen Sie mit einer Pinzette** eine Graphitflocke auf ein 15 Zentimeter langes Klebeband.
- 4 Falten sie das Band** unmittelbar neben der Graphitflocke in einem Winkel von etwa 45 Grad, so dass sie zwischen den klebenden Seiten eingeklemmt ist. Drücken Sie das Band rund um die Flocke behutsam zusammen und öffnen Sie es dann so langsam wieder, dass Sie sehen können, wie sich der Graphit glatt in zwei Teile spaltet.
- 5 Falten Sie das Band** neben einem der Spaltprodukte und wiederholen Sie Schritt 4.
- 6 Wiederholen Sie Schritt 5** etwa zehnmal. Die Arbeit wird dabei immer kniffliger.
- 7 Legen Sie Klebeband** mit den daran hängenden Spaltprodukten behutsam auf das Silizium, die klebende Seite nach unten. Pressen Sie mit einer Plastikzange sanft noch vorhandene Luft zwischen dem Band und Wafer heraus. Streichen Sie zehn Minuten lang fest, aber vorsichtig über die Probe.
- 8 Schälen Sie das Band langsam ab**, während Sie den Wafer mit der Zange auf die Unterlage drücken. Dieser Schritt sollte 30 bis 60 Sekunden dauern, damit das Graphen auf dem Wafer haften bleibt und Sie es nicht mit dem Band wieder herunterreißen.
- 9 Legen Sie den Wafer unter ein Mikroskop** mit einem 100-fach vergrößernden Objektiv. Dort sehen Sie reichlich Graphittrümmer: große, glänzende Bröckchen in allen möglichen Farben und Formen (oberes Bild, 115-fache Vergrößerung). Mit ein wenig Glück ist aber auch Graphen darunter: transparente, fast farblose kristalline Plättchen (unteres Bild, 200-fache Vergrößerung).



BEIDE FOTOS: GRAPHENE INDUSTRIES, PETER BLAKE



Graphen

J. R. Minkel

ihr Antiteilchen. Beim Elektron handelt es sich um das Positron. Es hat exakt dieselbe Masse, aber die entgegengesetzte Ladung.

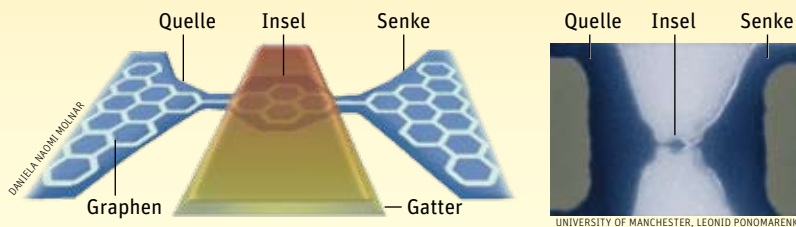
Gemäß der relativistischen Quantenmechanik kann jederzeit ein Teilchen-Antiteilchen-Paar auftauchen – und zwar direkt aus dem Nichts, nämlich dem Vakuum. Das ergibt sich aus einer der vielen Versionen von Heisenbergs Unbestimmtheitsprinzip. Demnach lässt sich bei einem Ereignis die dafür nötige Energie nur umso ungenauer angeben, je kürzer es ist. Das hat erstaunliche Konsequenzen. Auf extrem kurzen Zeitskalen kann die Energie dadurch nämlich fast beliebig hohe Werte annehmen. Da sie gemäß Einsteins berühmter Gleichung  $E=mc^2$  zur Masse äquivalent ist, gilt für diese im Prinzip das Gleiche. So kann durch eine »Energieanleihe« beim Vakuum spontan ein »virtuelles« Elektron-Positron-Paar entstehen – vorausgesetzt

## WOZU GRAPHEN GUT SEIN KÖNNTE

Da Graphen erst seit kurzer Zeit bekannt ist, konnten Ingenieure noch keine fertigen Produkte daraus entwickeln, aber die Liste möglicher Anwendungen ist lang. Hier sind zwei Beispiele aufgeführt.

## ▼ EINZELELEKTRONEN-TRANSISTOREN

Aus einem Graphen-Blatt lässt sich leicht ein Einzelelektronen- oder Quantenpunkt-Transistor herstellen. Das Diagramm (unten links) zeigt schematisch, wie zwei Elektroden, eine »Quelle« und eine »Senke«, durch eine nur hundert Nanometer breite »Insel« aus leitendem Material verbunden sind: dem Quantenpunkt. Er ist so klein, dass lediglich ein Elektron darauf Platz hat. Dessen Gegenwart oder Abwesenheit repräsentiert die Binärziffern 1 oder 0. Das Elektron tunnelt aus der Quelle quantenmechanisch zu der Insel, die hier im Zentrum einer elektronenmikroskopischen Aufnahme (unten rechts) in 40 000-facher Vergrößerung zu sehen ist, und dann weiter zur Senke. Gesteuert wird es dabei von der Spannung, die an einer dritten Elektrode, dem so genannten Gatter, angelegt ist. Sie bestimmt darüber, ob das Elektron zur Insel kommen oder sie verlassen kann.



## ► VERBUNDWERKSTOFFE

Durch Kombination von zwei oder mehr Werkstoffen lassen sich deren positive Eigenschaften oft zusammenführen. Üblicherweise bestehen solche Komposite aus einem Grundmaterial plus einem Verstärker. Man denke an einen Fiberglasbootsrumpf, der aus Plastik mit eingelegten Glasfasern besteht. Forscher prüfen derzeit die physikalischen Eigenschaften eines Komposits, in dem ein Kunststoff mit Materialien verstärkt ist, die sich von Graphen ableiten. Zu diesen zählt vor allem das besonders steife und feste Graphenoxid. Es ist einfacher herzustellen als Graphen selbst und lässt sich zu einem »Papier« verarbeiten (rechts im Vordergrund), das schon bald in Laminaten (rechts im Hintergrund) Verwendung finden könnte.

Denkbar wären sogar integrierte Schaltkreise, die sich aus einem einzigen Graphen-Plättchen ausschneiden lassen

seine Lebensdauer ist so kurz, dass es die fehlende Energie zurückzahlt, bevor das Defizit nachweisbar wird.

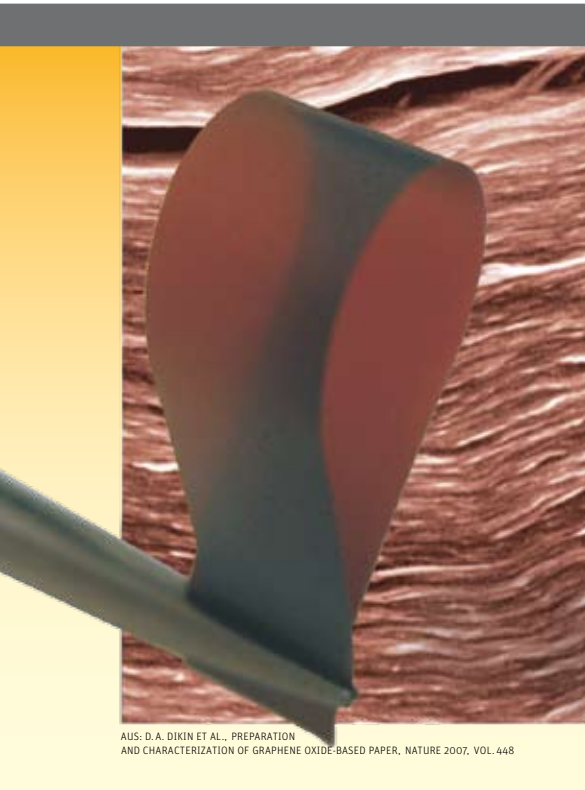
Die seltsame Dynamik des Vakuums in der Quantenelektrodynamik führt zu vielen merkwürdigen Effekten. Dazu zählt insbesondere eine von dem schwedischen Physiker Oskar Klein formulierte Paradoxie. Demnach kann ein relativistisches Objekt unter bestimmten Umständen durch jede Potenzialbarriere gelangen, egal wie breit oder hoch sie ist. Als Beispiel einer solchen Barriere denke man sich einen Berg, der aus einer Ebene aufragt. Ein Lastwagen, der mit Motorkraft hinauffährt, gewinnt potenzielle Energie. Von der Bergspitze kann er dann im Leerlauf auf der anderen Seite hinabrollen. Dabei verwandelt sich seine potenzielle in kinetische Energie.

Ein Laster ohne Benzin schafft es nicht über den Berg. Analog sitzt ein Teilchen in einem Tal zwischen zwei Potenzialbarrieren fest. Allerdings bietet die Quantenmechanik – und zwar schon in ihrer normalen, nichtrelativistischen Form – ein Schlupfloch. Eine zweite Version von Heisenbergs Unbestimmtheitsprinzip besagt nämlich, dass man von einem Objekt unmöglich sowohl den Ort als auch den Impuls genau wissen kann. Letzterer ist bei einem Teilchen, das in einem Energietal hängt, praktisch gleich null und damit sehr präzise bekannt. Folglich herrscht eine hohe Unsicherheit über den Ort. Mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit kann sich das Teilchen

demnach auch hinter der Barriere befinden: Es hat sie wie von Geisterhand durchquert. Physiker nennen das den Tunneleffekt.

Im nichtrelativistischen Fall ist die Tunnelwahrscheinlichkeit ziemlich gering und sinkt mit zunehmender Höhe und Breite der Barriere. In der Quantenelektrodynamik dagegen verhält es sich laut Klein völlig anders. Seinen theoretischen Überlegungen zufolge sollten relativistische Teilchen mit einer Wahrscheinlichkeit von 100 Prozent selbst durch sehr hohe, ausgedehnte Hindernisse tunneln. An deren Rand paaren sie sich einfach mit ihrem Antiteilchen-Zwilling, für den die Welt gleichsam auf dem Kopf steht, so dass ihm der Berg als Tal erscheint. Nach der Passage verflüchtigt sich der Ad-hoc-Gefährte wieder ins Nichts, aus dem er mit geborgter Energie kurz aufgetaucht ist, und das Elektron setzt seine Reise fort, als wäre nichts gewesen. Selbst vielen Physikern erscheint derlei Spuk allerdings suspekt.

Die Sache schreit also nach experimenteller Überprüfung. Lange war jedoch unklar, wie ein Test für das kleinsche Paradoxon aussehen könnte oder ob er vielleicht sogar prinzipiell unmöglich ist. Die masselosen diracschen Quasiteilchen in Graphen kommen da nun wie gerufen. Sie machen das kleinsche Paradoxon zum Routine-Effekt mit leicht beobachtbaren Konsequenzen. Man kann im Graphen künstlich Potenzialbarrieren unterschiedlicher Höhe und Breite erzeugen und dann die elektrische Leitfähigkeit messen. Sie



AUS: D. A. DIKIN ET AL., PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF GRAPHENE OXIDE-BASED PAPER, NATURE 2007, VOL. 448

sollte bei einer Tunnelwahrscheinlichkeit von 100 Prozent durch die Hindernisse nicht erniedrigt werden. In verschiedenen Laboratorien laufen derzeit entsprechende Untersuchungen. Auch zum Nachweis anderer ungewöhnlicher Konsequenzen der Quantenelektrodynamik bietet sich Graphen an.

### Ultraschnelle Transistoren

Aber wie sieht es mit technischen Anwendungen aus? Noch ist es zu früh für eine definitive Antwort. Klar scheint jedoch: Jede Einsatzmöglichkeit für Nanoröhren – eingerolltes Graphen – steht auch der ebenen Form offen. Allerdings muss es dazu gelingen, das Material in industriellem Maßstab zu produzieren. Viele Forschungsgruppen arbeiten an der Entwicklung verbesserter Herstellungsmethoden.

Als Staub lässt sich Graphen bereits in industriellen Mengen erzeugen. Doch ausge dehnte Blätter von dem Material zu gewinnen ist noch immer sehr schwierig, weshalb es sich dabei vermutlich um den teuersten Stoff überhaupt handelt. Ein durch Spaltung mikromechanisch erzeugter Graphen-Minikristall, der dünner als ein Haar ist, kostet derzeit über tausend Dollar. Gruppen in Europa und an mehreren US-Institutionen – darunter das Georgia Institute of Technology in Atlanta, die University of California in Berkeley und die Northwestern University in Evanston (Illinois) – haben Graphen-Filme auf Siliziumkarbidscheiben abgeschieden.

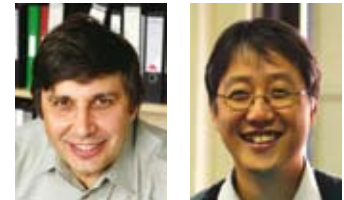
Inzwischen erkunden auch Ingenieure die einzigartigen physikalischen und elektronischen Eigenschaften, die das Material technisch so interessant machen (siehe Kasten links). Mit seinem hohen Verhältnis von Oberfläche zu Volumen sollte es sich etwa für harte Verbundwerkstoffe eignen. Als extrem dünnes Material könnte es auch effizientere Feldemitter ergeben: Geräte, die in Gegenwart von starken elektrischen Feldern aus nadel förmigen Spitzen Elektronen emittieren.

Da sich die Eigenschaften von Graphen mit elektrischen Feldern präzise regulieren lassen, bestehen gute Aussichten, mit dem Werkstoff ultraempfindliche chemische Detektoren sowie bessere supraleitende und Spin-Ventil-Transistoren zu bauen. Ferner könnten dünne Filme aus überlappenden Graphen-Stückchen transparente, elektrisch leitende Beschichtungen für Flüssigkristall-Anzeigen und Solarzellen abgeben. Die Liste ist keineswegs vollständig, und einige Nischenprodukte kommen vielleicht schon in wenigen Jahren auf den Markt.

Ein mögliches Einsatzgebiet verdient besondere Erwähnung: Elektronik auf Graphen-Basis. Wie beschrieben, bewegen sich die Ladungsträger in dem Material mit hoher Geschwindigkeit und verlieren relativ wenig Energie durch Zusammenstöße mit den Atomen im Kristallgitter. Das sollte den Bau so genannter ballistischer Transistoren ermöglichen, die viel schneller schalten als herkömmliche Geräte.

Noch faszinierender ist die Aussicht, mit Graphen die Gültigkeit einer Erfahrungsregel zu verlängern, die der Elektronikpionier Gordon Moore schon vor etwa 40 Jahren formuliert hat. Demnach verdoppelt sich etwa alle 18 Monate die Zahl der Transistoren, die sich auf einer bestimmten Fläche unterbringen lassen. Das unvermeidliche Ende dieser fortschreitenden Miniaturisierung wurde schon oft voreilig prophezeit. Dank seiner bemerkenswerten Stabilität und elektrischen Leitfähigkeit selbst im Nanometerbereich eignet sich Graphen vielleicht für Transistoren, die deutlich weniger als zehn Nanometer messen und womöglich nur aus einem einzelnen Benzolring bestehen. Vorstellbar wären sogar komplette integrierte Schaltkreise, die sich aus einem einzigen Graphen-Plättchen »ausschneiden« lassen.

Das nur ein Atom dicke Material hat also bestimmt eine große Zukunft – als Ausgangspunkt für innovative kommerzielle Produkte ebenso wie als Minilabor zum Nachweis exotischer Quanteneigenschaften. Man kann nur staunen, dass all diese Fülle und Komplexität schon Jahrhunderte lang in jedem Bleistiftstrich verborgen war. ◀



**Andre K. Geim** ist Mitglied der britischen Royal Society, Physikprofessor an der Universität Manchester (England) und Direktor des Manchester Center for Mesoscience and Nanotechnology. Als gebürtiger Russe hat er am Institut für Festkörperphysik in Tschernogolowka (Russland) promoviert.

**Philip Kim** ist Mitglied der American Physics Society und Associate Professor für Physik an der Columbia University in New York. Promoviert hat er an der Harvard University in Cambridge (Massachusetts).

**Castro Neto, A. et al.:** Drawing Conclusions From Graphene. In: Physics World 19, S. 33–37, November 2006.

**Geim, A. K. und Novoselov, K. S.:** The Rise of Graphene. In: Nature Materials 6, S. 183–191, 2007.

**Geim, A. K. und MacDonald, A. H.:** Graphene: Exploring Carbon Flatland. In: Physics Today 60, S. 35–41, August 2007.

**Wilson, M.:** Electrons in Atomically Thin Carbon Sheets Behave Like Massless Particles. In: Physics Today 59, S. 21–23, Januar 2006.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/960483](http://www.spektrum.de/artikel/960483).