

Wunderwaben aus Atomen

Das erste 2-D-Material war Graphen. Es löste eine Revolution in den Materialwissenschaften aus. Inzwischen gibt es einige Dutzend der vielseitigen Exoten. VON UTA NEUBAUER

Mit Graphen fing alles an. Das bizarre Material aus Kohlenstoff ist nur eine Atomlage dünn und besitzt geradezu magische Eigenschaften: Graphen leitet Wärme und Strom deutlich besser als Kupfer, wiegt fast nichts und ist trotzdem mehr als 100-mal so zugfest wie Stahl. 2004 berichteten Andre Geim und Konstantin Novoselov von der Universität Manchester, ihnen sei die Isolierung der Wundersubstanz gelungen. Sie hatten sie mit einem simplen Klebstreifen von einem Stück Grafit abgeschält. Das funktioniert, weil Grafit aus leicht spaltbaren Schichten von Kohlenstoff besteht. Die Atome innerhalb einzelner Schichten aber, angeordnet im regelmässigen Bienenwabenmuster, halten fest zusammen.

Zweidimensionale Substanzen mit so wohlgeordneten Atomen galten lange als eine Unmöglichkeit, bis Geim und Novoselov das Gegenteil bewiesen – und Forschern weltweit Appetit auf mehr machten. Einige Dutzend solcher 2-D-Materialien wurden in den vergangenen Jahren hergestellt, wie Thomas Müller von der Technischen Universität Wien schätzt. Zur wachsenden Familie um Graphen gehören Schichten aus einer Atomsorte ebenso wie solche aus zwei oder mehr chemischen Elementen. Einige leiten Strom wie ein Metall, andere gar nicht. Halbleitende sowie magnetische 2-D-Materialien gibt es mittlerweile ebenfalls.

Ein Cousin namens Plumben

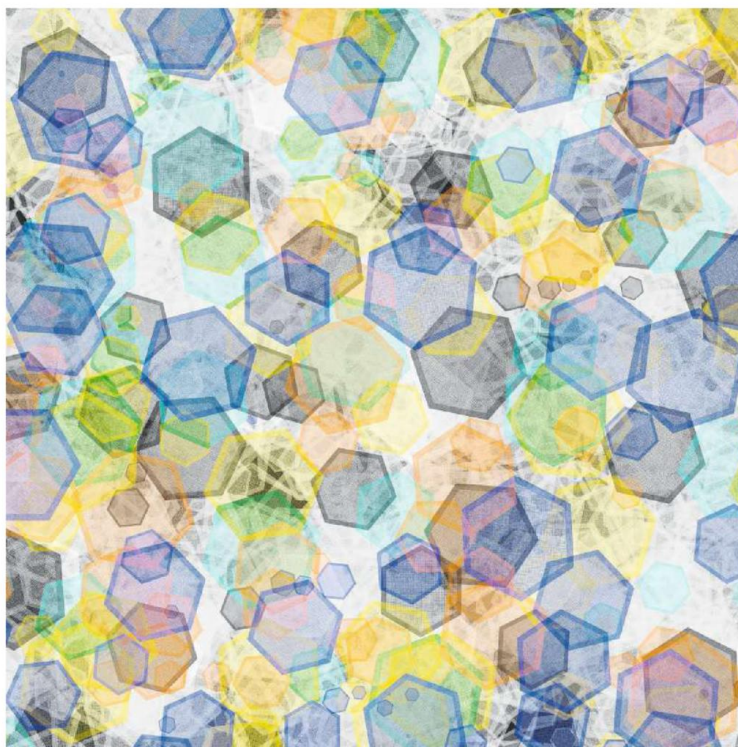
Das neueste Familienmitglied besteht aus einer Atomlage Blei. «Graphens jüngster Cousin», wie Junji Yuhara die Substanz nennt, die er kürzlich an der Universität Nagoya in Japan herstellte, trägt den Namen Plumben. Dessen elektronische Eigenschaften sind speziell: In der Fläche leitet das Material laut bisherigen Berechnungen als Isolator keinen Strom, aber an den Rändern sogar fast verlustfrei.

Auf weitere Konkurrenten von Graphen darf man gespannt sein. Die Liste ist noch lange nicht komplett: Voraussichtlich lassen sich über 1800 verschiedene 2-D-Materialien aus schichtförmig gebauten Feststoffen abspalten. Das haben Forscher von der Ecole polytechnique fédérale de Lausanne berechnet.

Zu jenen Kandidaten, die sich einfach entblättern lassen, zählt schwarzer Phosphor, der aussieht wie verkohltes Faserglas. Das daraus isolierte Phosphoren bildet wie Graphen ein wabenartiges Gitter. Doch das Phosphor-Netzwerk ist zu einem regelmässigen Rillennmuster gefaltet, ähnlich einem Acker mit Furchen. Die Struktur führe zu interessanten Eigenschaften, erklärt Thomas Greber, der sich an der Universität Zürich mit 2-D-Materialien beschäftigt. Da die Rillen Licht einer bestimmten Schwingungsrichtung bevorzugt einfangen und man die Lichtabsorption elektronisch schalten kann, bietet sich Phosphoren für den Bau von schnellen Polarisationsfiltern an. Das ist vorerst aber noch eine Vision.

Graphen hingegen, der Vorreiter der 2-D-Materialien, steckt schon in alltäglichen Produkten: Huawei setzt das Material wegen seiner hohen Wärmeleitfähigkeit zur Kühlung von Smartphones ein. Novak Djokovic, die Nummer eins der Tennis-Weltrangliste, spielt mit einem Schläger, der dank Graphenverstärkung leicht ist und trotzdem kaum flattert. Wie läge wohl ein Schläger in der Hand, der «Borophen» enthielte? Die aus dem Halbmetall Bor hergestellte Substanz ist gemäss Berechnungen noch strapazierfähiger als Graphen. Der Grund liegt auch hier in der Struktur: Im Wabenmuster von Borophen sitzen über vielen Sechsecken zusätzliche Atome, die das Netzwerk stabilisieren.

Wie Graphen ist Borophen ein exzellenter elektrischer Leiter und somit ein idealer Werkstoff für transparente, biegsame Elektroden und Leiterbahnen. Für kleine Sensoren, Transistoren und andere Bauteile der Mikroelektronik hingegen braucht die Industrie vor allem neue Halbleiter. Das US-Unternehmen



Graphen und andere 2-D-Materialien (hier eine künstlerische Interpretation) sind eine Atomlage dünn und federleicht. ALAMY

«2D Semiconductors» vertreibt halbleitende 2-D-Materialien, bis anhin aber vor allem an Forschungsinstitute, wie die Vertriebsleitung mitteilt. Zukünftige Marktchancen sieht die Firma beim Bau von Quantencomputern und in anderen Bereichen, in denen Halbleiter wie Silizium an ihre Grenze stossen.

Verpackt und gestapelt

«Wir wollen Silizium nicht ersetzen, sondern die Halbleiterelektronik erweitern», macht auch Müller von der TU Wien klar. Zudem weist er auf ein Problem hin: 2-D-Materialien mit den gewünschten elektronischen Eigenschaften sind meist nicht so robust wie Graphen, sondern reagieren empfindlich auf Sauerstoff und Feuchtigkeit.

Anfang 2015 präsentierten US-Forscher einen Transistor aus Silizien, das sie aus Silizium herstellten. Doch der Transistor überlebte an der Luft nur Minuten. «Viele 2-D-Materialien sind schwer handhabbar», unterstreicht Greber. Die empfindlichen Schichten müssen chemisch modifiziert oder eingekapselt werden. Ein hauchdünnes Verpackungsmaterial hat Grebers Team schon getestet: 2-D-Bornitrid – eine Bor-Stickstoff-Verbindung mit gleicher Wabenstruktur wie Graphen – lässt keine Luft durch. Ein internationales Konsortium hat darin schon Phosphoren verpackt. So blieb die Phosphorschicht wochenlang intakt, während sie sonst an der Luft schnell zu Phosphorsäure reagiert.

Eine ungeahnte Spielweise eröffnet sich Materialforschern durch die Kombination der flachen Schichten. «Im Prinzip kann man alles auf alles stapeln», sagt Müller. Zusammen mit Kollegen hat er schon zweidimensionale Molybdän- und Wolframverbindungen zu einer leichten und biegsamen Solarzelle vereint.

Wahre Wunder kann die Verdrehung von gestapelten Schichten bewirken: Verdreht man zwei aufeinandergepackte

Einige 2-D-Materialien leiten Strom wie ein Metall, andere gar nicht. Wahre Wunder kann die Verdrehung von gestapelten Schichten bewirken.

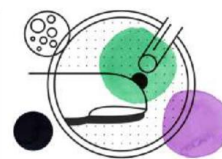
Graphen-Lagen gegeneinander um 1,1 Grad, wird das Kohlenstoffmaterial zum elektrischen Isolator, bei Anlegen einer geringen elektrischen Spannung hingegen zum Supraleiter. Dafür muss die Doppelschicht allerdings auf unter minus 270 Grad Celsius gekühlt werden, wie Wissenschaftler um Pablo Jarillo-Herrero vom Massachusetts Institute of Technology im März 2018 berichteten. Das erstaunliche Verhalten hängt mit den Wechselwirkungen der Elektronen in den beiden Schichten zusammen. Bei einem Winkel von 1,1 Grad entsteht ein sogenanntes Moiré-Muster, eine überlagerte Wabenstruktur mit einem rund 50-mal grösseren Raster. «Ein spektakulärer Effekt, der zu völlig unerwarteten Eigenschaften von Graphen führt», urteilt Greber. Mit Moiré-Mustern verneht er auch bei anderen 2-D-Materialien.

Egal ob gestapelt, verdreht oder als Einzelschicht: Auf den Markt schaffen es die neuen Materialien erst, wenn man sie in ausreichender Grösse und Menge produzieren kann. Daran aber hapert es noch. Viele 2-D-Materialien gibt es erst im Miniformat. Die bis anhin hergestellten Borophen-Schnipsel beispielsweise sind deutlich kleiner als der Querschnitt eines Haars. Zudem sitzen sie auf einem Metallträger, von dem sie sich nur schwer lösen lassen.

Graphen von der Rolle

Beim Graphen ist man schon weiter: Bis zu zehn Meter lange und zehn Zentimeter breite Graphenbahnen haben Forscher am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie in Aachen bereits erzeugt. Dafür scheiden sie Kohlenstoff aus gasförmigem Methan auf einer Kupferfolie ab. Die daraus gebildete Graphenschicht übertragen sie per Elektrolyse auf eine Kunststoffolie. Da beide Folien ohne Unterbrechung durch die Anlage laufen, taugt der Prozess für die Massenproduktion. Für Leichtbauteile mit hoher Wärmeleitfähigkeit eigne sich das auf diese Weise produzierte Graphen bereits, meint Fraunhofer-Projektleiter Martin Priwisch. Für elektronische Anwendungen reiche die Qualität allerdings noch nicht aus. Das Graphen löse sich bei der Elektrolyse nicht immer komplett vom Kupfer, und so komme es zu Materialfehlern.

Angesichts der schwierigen industriellen Produktion stellt sich die Frage, ob der Hype um die Wundermaterialien gerechtfertigt ist. «Wir brauchen einen langen Atem», betont Greber, zeigt sich aber zuversichtlich. Die jetzige Phase der Ernüchterung sei typisch für die Einführung neuer Technologien, die ganze Branchen umwälzen. Anders formuliert: Die durch Graphen ausgelöste Revolution in den Materialwissenschaften befindet sich auf einem guten Weg.



HAUPTSACHE, GESUND

Windige Fachsprache

Von Alan Niederer

Es gibt viele Gründe, sich für die Medizin als Studienfach zu entscheiden. Ich wollte verstehen lernen, wie der menschliche Körper funktioniert und wie Krankheiten entstehen. Mit dem an der Uni erworbenen Wissen und Können, so hoffte ich, würde ich dann Kranke von ihrem Leid befreien können.

Ich war aber auch von der medizinischen Sprache fasziniert. Im damals vorgeschriebenen «Häfel-Praktikum», einer Art Schnellleiche in Krankenpflege, hörte ich zum ersten Mal Wörter wie Thorax oder Peritonäum. Der Klang der Begriffe versetzte mich in helle Aufregung. Denn die Wörter kündeten von einer unbekanntem Welt, die ich unbedingt erobern wollte.

Später machte ich die Erfahrung, dass die geliebte Terminologie auch für Unverständnis sorgen kann. Ich erinnere mich an einen Vorfall, der sich während meiner Zeit als militärischer Schularzt ereignete. Auf der Krankenabteilung lag ein Rekrut, der starke Bauchschmerzen hatte. Bei der morgendlichen Visite wollte ich entscheiden, ob sich hinter den Beschwerden etwas Ernsthaftes verbarg und ich den jungen Mann einem Chirurgen vorstellen musste.

Ich trat an das Bett des Rekruten und untersuchte seinen Bauch. Die Bauchdecke schien mir weich zu sein, was ein gutes Zeichen war. Doch bei jungen, muskulösen Männern ist das nicht immer einfach zu beurteilen. Beim Abhören des Abdomens mit dem Stethoskop vernahm ich normal klingende Darmgeräusche, was ebenfalls beruhigend war. Um ganz sicher zu sein, stellte ich dem Mann noch eine letzte Frage: «Hatten Sie heute schon Windabgang?»

Der Rekrut schaute mich mit grossen Augen an. Hatte ich zu leise gesprochen? Ich wiederholte die Frage: «Heute schon Wind gehabt?» Erneut diesen fragende Blick, als hätte ich chinesisches gesprochen. Dann erfüllte schallendes Lachen den Raum. Es kam vom Sanitätsoldaten, der mich bei der Krankenvsiste begleitete. Während ich mich fragte, was denn so lustig sei, sagte der Sanitätsoldat, der heute Spitaldirektor einer Privatklinik ist, zum Rekruten: «Hast du heute schon kurzen können?» Die Antwort war Ja. Ich war erleichtert, denn auch das sprach gegen etwas Schlimmes.

Mit dem Begriff Windabgang wollte ich mich damals wahrscheinlich von einem körperlichen Vorgang distanzieren, der mir unangenehm und peinlich war. Aus demselben Grund sprechen Ärzte auch von Stuhlgang und Wasserlassen. Die medizinische Fachsprache kann aber auch eingesetzt werden, um sich von vermeintlich weniger gebildeten Zeitgenossen abzuhenen. Mehr als einmal habe ich Mediziner in Anwesenheit von Leuten, die ein Gespräch nicht verstehen sollten, sagen hören: «Bei Patient X liegt das Problem supranasal.» Supranasal? Oberhalb der Nase gelegen. Der Arzt sagte also, dass Patient X «spinne».

Besonders fasziniert bin ich von der Sprache der Pathologen. Keine andere Ärztesgruppe argumentiert so präzise wie sie. Das ist für eine korrekte und nachvollziehbare Diagnose auch wichtig. Denn was heisst schon, der Patient hat «Wasser auf der Lunge»? Befindet sich das Wasser in den Lungenbläschen oder zwischen Lunge und Brustfell? Im ersten Fall hat der Patient ein Lungenödem, im zweiten einen Pleuraerguss. Das hat Auswirkungen auf die Therapie. Ein wenig Faszination für die Sprache ist in der Medizin also nicht verkehrt.