

TOP-PHYSIK IM KLEINFORMAT

Spitzenforschung muss nicht Milliarden kosten. Auch mit guten Ideen und einem einfachen Labortisch gibt es immer wieder spektakuläre Ergebnisse. Wird Bescheidenheit zum neuen Trend in der Physik?

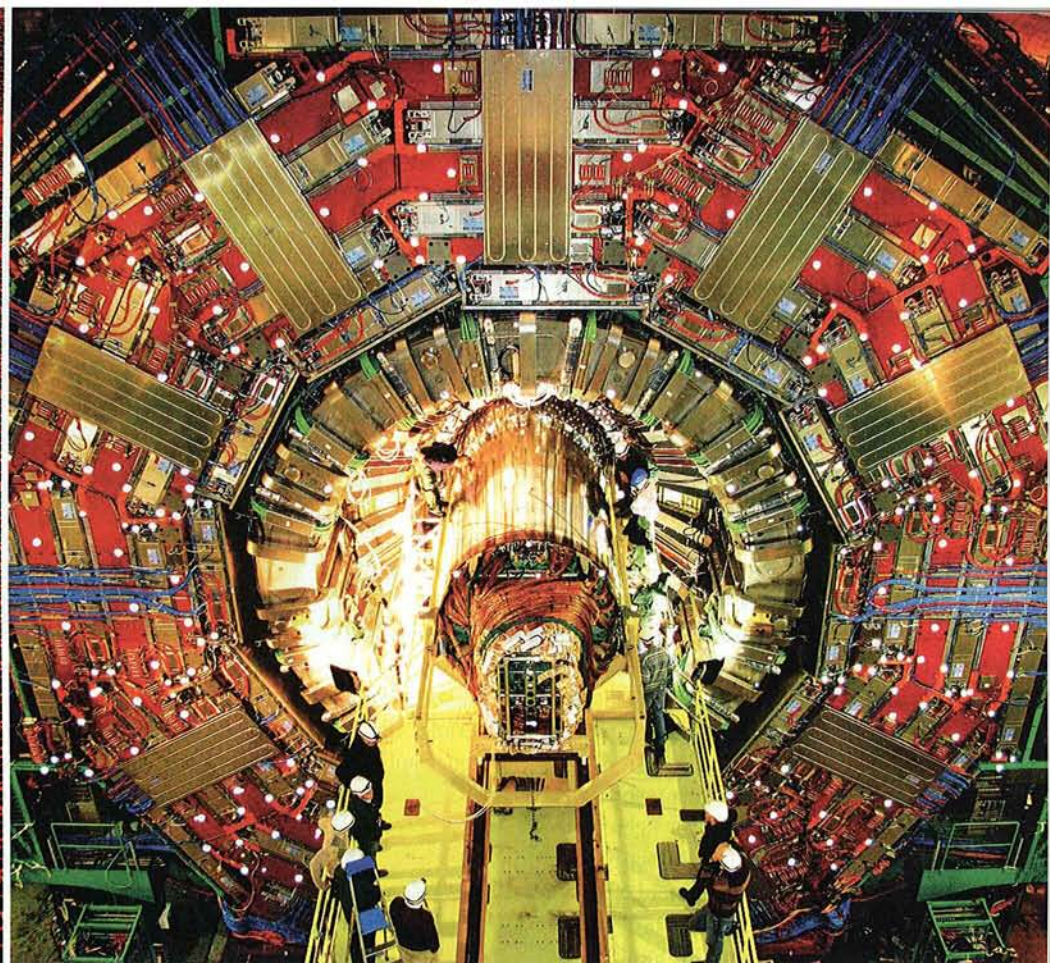
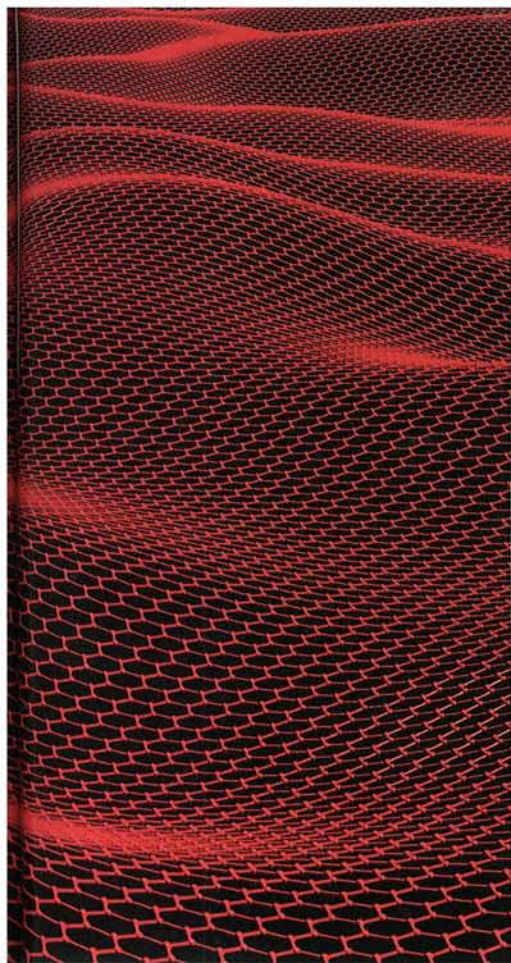
Von Bernd Müller

PHYSIK IST FURCHTBAR kompliziert. So denkt der Normalbürger. Und so denken Schüler, die mit dem „Hammerfach“ auf Kriegsfuß stehen. Wie sehr sich dieses Vorurteil ins kollektive Bewusstsein eingebrannt hat, erlebte Jurgen Smet beim letzten Tag der offenen Tür am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart. Smet führte vor, wie man „Graphene“ herstellt, die aus genau einer Atomschicht Kohlenstoff bestehen: ein Klebeband auf ein Klötzchen aus Graphit pressen, abziehen, die silbergraue Schicht an einer anderen Stelle des

Klebandes erneut abziehen – und so weiter, bis nach wenigen Sekunden nur noch winzige Graphen-Flöckchen am Tesafilm haften. Doch die Schüler fühlten sich ausgetrickst. „Und wie machen Sie das wirklich?“, fragte einer. Smet antwortete irritiert: „Genau so.“

Graphen-Forscher gehören zu einer Spezies, die lange vom Aussterben bedroht schien. Während ihre Kollegen händeringend nach Argumenten suchten, warum die Menschheit unbedingt über drei Milliarden

Euro ausgeben muss, um im Large Hadron Collider (LHC) bei Genf Atomkerne aufeinander zu schießen, müssen sie einer verblüfften Öffentlichkeit erklären, dass ihre Forschung tatsächlich so einfach ist, wie sie aussieht, und dass im Prinzip jeder zu Hause die faszinierenden Kohlenstoff-Schichten herstellen kann. Markieren die Graphene einen Wendepunkt in der Physik? Die Rückbesinnung auf einfache Experimente, die auf einen Labortisch passen, die für einen einzelnen Forscher überschaubar und auch von kleineren Forschungseinrichtun-



Quanten, Atome und Elementarteilchen: Physik-Nobelpreisträger Theodor Hänsch mit einem seiner raffinierten Quanten-Experimente (links), ein Modell von Graphen, das nur aus einer einzigen Atomschicht von Kohlenstoff besteht und erst 2004 entdeckt wurde (Mitte) und der CMS-Detektor des Large Hadron Colliders bei Genf, des größten Teilchenbeschleunigers der Welt (rechts).

gen finanzierbar sind? Im Gegensatz zur öffentlichen Wahrnehmung scheinen „kleine Experimente“ die Physik neuerdings zu dominieren – etwa bei der Nanoforschung oder bei der Untersuchung ultrakalter Atome. Von den Teilchenphysikern mit ihren Anlagen größeren Kalibers hört man dagegen außer Pannemeldungen wenig. Tausende Wissenschaftler kämpfen zurzeit am Europäischen Kernforschungslabor CERN mit den Tücken des LHC, der nach wenigen Wochen wegen eines Defekts am Kühl-

kreislauf seinen Betrieb schon wieder einstellen musste. Zuletzt machten Meldungen von Fehlberechnungen der Detektoren die Runde. Neue Einfachheit also statt nicht mehr beherrschbarer Komplexität?

VOM KLEBEBAND ZUM SUPERMIKROSKOP

Die Wahrheit liegt wie immer dazwischen. Ganz unrecht hatten die Schüler beim Tag der offenen Tür am Stuttgarter Max-Planck-Institut nicht: Auch wenn zur Herstellung der Graphene Klebeband und Graphit genügen – hinterher wird es dafür recht kompliziert. Etwa beim Nachweis der meist nur wenige Dutzend Mikrometer langen und breiten atomaren Schichten, die sich unter dem Mikroskop als schwach grauer Schleier zeigen. Damit seine Doktoranden sich nicht die Augen verderben und die Suche schneller vonstatten geht, hat sich Smets Team ein Mikroskop mit automatischer Bildauswertung besorgt, das die Hauptarbeit übernimmt. Im Gegensatz zu Tesafilm gibt es das nicht im Baumarkt – ein paar Hunderttausend Euro kostet die Grundausstattung schon.

Dass die Graphene so lange von den Physikern ignoriert wurden, liegt an einer theoretischen Vorhersage aus dem Jahr 1934, wonach es zweidimensionale Kohlenstoffgitter gar nicht geben kann. Und was es nicht geben kann, braucht man nicht zu suchen, glaubte man noch in den 1990er-Jahren. Damals sorgten die Kohlenstoff-Nanoröhrchen für Furore, die im Grunde nichts anderes sind, als aufgerolltes Graphen. Mit einem Transmissionselektronenmikroskop haben die Forscher am Stuttgarter Institut vor wenigen Jahren herausgefunden, dass die Vorhersage von damals tatsächlich stimmt. Die Kohlenstoff-Atome liegen im Graphen nämlich nicht genau in einer Ebene. Das Netz schlägt vielmehr Wellen wie Wasser, wenn man einen Stein hineinwirft. Die Kohlenstoff-Wellen sind nur einen Millionstel Millimeter hoch, aber das genügt, um Theorie und Praxis in Einklang zu bringen.

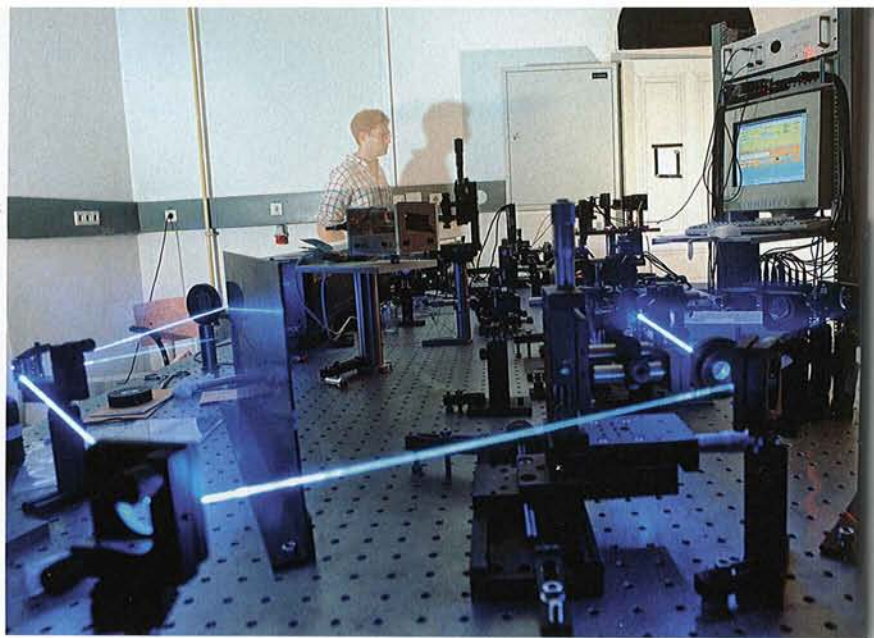
Die ersten Versuche, Graphen herzustellen, unternahmten US-Forscher Anfang dieses Jahrzehnts. Sie wollten mit der Spitze eines Rasterkraftmikroskops Graphit abschälen,

Imago; Pasieka/SPL/Agentur Focus; CERN (von links nach rechts)

KOMPAKT

- Kompakte und bezahlbare Experimente kommen in Mode, etwa in der Materialforschung und der Tieftemperaturphysik.
- Überschaubare Forschungsprojekte bieten jungen Wissenschaftlern gute Einblicke bei viel Verantwortung.
- Um Kosten zu sparen, müssen auch die Elementarteilchenphysiker neue Ansätze für einfachere Experimente entwickeln.

Physik im Keller: Im Untergeschoss der Uni Wien wurden schon vor Jahren mit Laserstrahlen verschränkte Photonen zum geisterhaften „Beamen“ erzeugt. Inzwischen passen die Experimente auf einen Tisch.



V. Steger

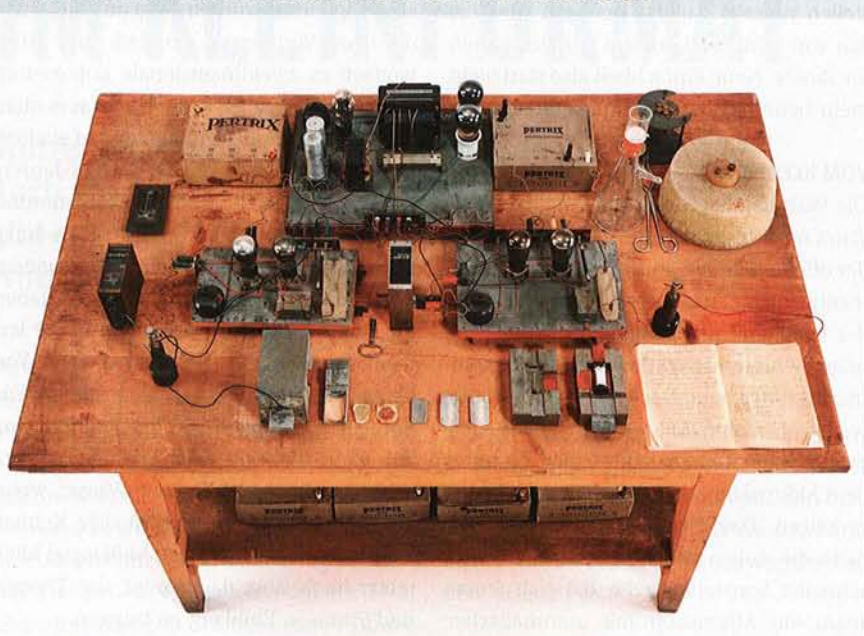
konnten dabei aber keine Monolagen erzeugen. Dass alles so viel einfacher geht, nämlich mit einem Tesafilm, entdeckte 2004 dann Andre Geim. Dafür wurde der niederländische Physiker von der University of Manchester im April in Hamburg mit dem Körber-Preis für die europäische Wissenschaft ausgezeichnet.

„Graphen entsteht sogar, wenn man mit einem Bleistift auf Papier schreibt“, sagt Klaus von Klitzing. Der Physik-Nobelpreisträger aus dem Jahr 1985 ist Leiter der Abteilung, zu der Jurgen Smets Team gehört. Seit 2005 arbeiten auch die Stuttgarter Max-Planck-Forscher mit den Graphenen – wie viele andere Gruppen auf der Welt, unter anderem in China und Indien. Angelockt von der einfachen Herstellung, versprechen sie sich leichten wissenschaftlichen

Erfolg. Das wird ein paar Jahre funktionieren, glaubt Smet. Aber dann werde sich die Spreu vom Weizen trennen. Denn in jedem Forschungsgebiet, auch wenn es noch so simpel wirkt, steigen die Ansprüche rasch. Als Beispiel nennt er Silizium, das Material in Mikrochips. Als vor gut 60 Jahren die ersten Transistoren daraus gebaut wurden, war das eine rustikale Technik, die jeder nachmachen konnte. Heute würde niemand auf die Idee kommen, eine Chip-Produktion nach dem Vorbild des Branchenführers Intel von Null auf zu beginnen.

Smet warnt: „Einfache Forschungsgebiete gibt es nicht, es ist immer ein Zyklus von leicht zu schwer.“ Wobei „schwer“ nicht unbedingt groß und teuer bedeuten muss, sondern auch den intellektuellen Anspruch meinen kann. Und der ist bei Graphen ziemlich hoch. Denn um die Eigenschaften des exotischen Materials zu ergründen, müssen die Max-Planck-Forscher ihr ganzes Know-how über Festkörper und Quantenphysik aufbieten. „Graphen ist das ultimative zweidimensionale Elektronensystem“, schwärmt Smet. Die Elektronen bewegen sich darin nur entlang einer Schicht, nicht wie etwa in Silizium in alle drei Raumrichtungen.

WISSENSCHAFTLICHE REVOLUTION AUF DEM HOLZTISCH



Deutsches Museum

Große Forschung mit kleinem Gerät: Der Arbeitsplatz des späteren Chemie-Nobelpreisträgers Otto Hahn, an dem er am 17. Dezember 1938 zusammen mit Fritz Straßmann bei der Bestrahlung von Uran mit Neutronen die Kernspaltung entdeckte.

Das bietet fantastische Möglichkeiten: Aus Graphen könnten sich Halbleiter mit beliebigen Energiebändern herstellen lassen – allein durch Brechen einzelner Bindungen zwischen den Kohlenstoff-Atomen. Die Beweglichkeit der Ladungsträger wäre vermutlich zehnmal besser, Transistoren könnten höhere Ströme schalten, und Mikrochips könnten mit höherer Taktfrequenz – also schneller – arbeiten. Graphenschichten ließen sich sogar zu ganzen Transistoren-Paketen stapeln.

WEG MIT DEM TESAFILM

Doch das dachte man auch schon bei den Kohlenstoff-Nanoröhrchen. „Viele Hoffnungen haben sich dort nicht erfüllt“, sagt Smet. Aber diesmal sieht er bessere Chancen. Denn Graphen hat alle guten Eigenschaften der Nanoröhrchen – und darüber hinaus noch einige entscheidende Vorteile. So war es schwierig, die Kohlenstoff-Röhrchen mit elektrischen Kontakten zu versehen, was bei Graphenen kein Problem

ist. Und sie lassen sich mit den herkömmlichen Methoden der Silizium-Chip-Fertigung strukturieren. Doch bis dahin ist weitere Forschung nötig – darin unterscheidet sich Graphen nicht von anderen Disziplinen in der Physik. Eine Antwort wirft immer neue Fragen auf und sorgt für Beschäftigung weiterer Physiker-Generationen. So wollen die Max-Planck-Forscher den Tesafilm unbedingt loswerden und arbeiten an mehreren, leider deutlich komplizierteren Methoden. Bisher ist es nämlich reiner Zufall, wo brauchbare Graphen-Flocken entstehen – für die systematische Untersuchung im Labor ein unhaltbarer Zustand, ganz zu schweigen von einer technischen Nutzung. Immerhin: Auch die derzeit diskutierten Varianten passen auf einen Labortisch.

Ein großer Fan von solchen „Table-Top-Experimenten“ ist Philipp Treutlein vom Max-Planck-Institut für Quantenoptik. Er forscht auch an der Ludwig-Maximilians-Universität München, ist Leiter der „Münchener Atom-Chip-Experimente“ und gehört zum Team von Physik-Nobelpreisträger Theodor Hänsch. In seinen Vorträgen zeigt Treutlein gerne zwei Fotos: Auf dem einen ist die komplexe Apparatur zu sehen, mit der Wolfgang Ketterle vom Massachusetts Institute of Technology 1995 die ersten Bose-Einstein-Kondensate erzeugte, wofür er 2001 den Nobelpreis bekam (bild der wissenschaft 4/2000, „Mister Cool“). Das andere Foto zeigt eine recht spärliche Apparatur auf einem halben Labortisch, die das selbe ermöglicht: Atome ein millionstel Grad Celsius über dem absoluten Temperatur-Nullpunkt in einen überlagerten Quantenzustand zu versetzen.

Statt in großen optischen und magnetischen Fallen wie Ketterle halten die Münchener Forscher die Rubidium-Atome mit schwachen Magnetfeldern gefangen, die durch winzige Drähte in einem Chip nur wenige Mikrometer unter einer schwebenden Atomwolke erzeugt werden. Das Abkühlen der Atome, das bei Ketterle noch Minuten dauerte, geschieht in Treutleins Labor in Sekunden. Zur Stromversorgung reicht im Prinzip eine Autobatterie – ideal also für portable Anwendungen. Durch geschicktes Design lassen sich in dem daumengroßen Chip wandernde Magnetfelder

erzeugen und die Atome hin und her schieben – ein Effekt, den Theodor Hänsch in seinen Vorträgen „Atom-Fließband“ nennt und zur allgemeinen Erheiterung der Zuhörer mit Motorgeräuschen aus dem PC untermalt. Eine ultragenauere Atomuhr hat Treutleins Team schon gebaut, ebenso ein Atominterferometer, mit dem sich zum Beispiel die Gravitationskonstante genauestens messen lässt. Die Atomwolken lassen sich sogar zur Kollision bringen – „das gibt aber keine Effekte wie beim LHC“, sagt Hänsch. Keine Gefahr also für die Hochenergiephysiker, dass ihnen in absehbarer Zeit die Arbeit abhanden kommt. Theodor Hänsch war Pionier der Bose-Einstein-Kon-

densate auf einem Chip. „Er hat unheimlich viele Ideen, gerade wie sich Komplexität reduzieren lässt – und das verlangt er auch von uns“, sagt Treutlein. Natürlich hätte man das Ketterle-Experiment nachbauen können. Doch das hätte mehrere Jahre gedauert und das Team international zurückgeworfen. Statt dessen hat man mehrere technische Kniffe kombiniert und einen neuen, viel einfacheren Versuchsaufbau entworfen, der nun weltweit spitz ist.

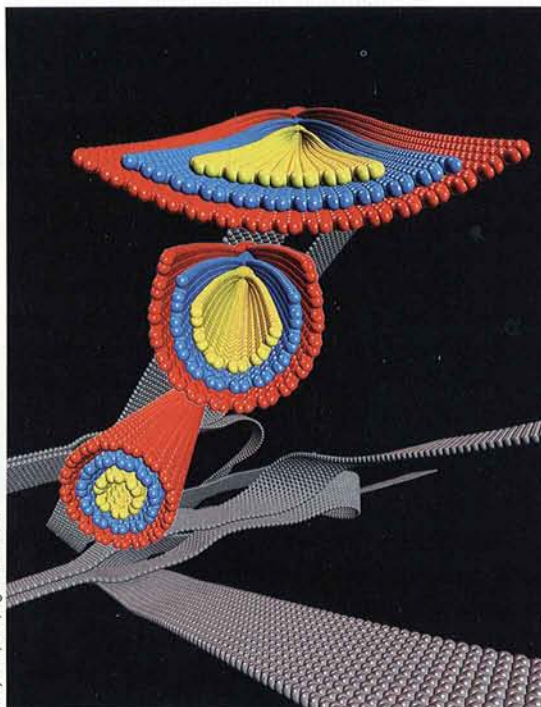
DOKTORANDEN KÖNNEN SICH AUSTOBEN

Hier sieht Treutlein gravierende Unterschiede zur Arbeit der Kollegen etwa am CERN oder am künftigen Fusionsreaktor ITER.

„Eine zündende Idee kann bei uns das ganze Projekt verändern.“ Jederzeit lässt sich eine neue vielversprechende Richtung einschlagen. „Die Doktoranden können sich bei uns richtig austoben“, sagt Treutlein. Sie sind Herr über ihr Experiment, kennen jede Schraube darin und sind für den kompletten Forschungsprozess verantwortlich – von der Idee über den Aufbau und die Messungen in langen Nächten bis zur Veröffentlichung in einem renommierten Fachblatt.

Anders als die Kollegen vom nahen Max-Planck-Institut für Plasmaphysik: Dort werden Experimente von vielen fleißigen Händen gefertigt und in Schränken an den Fusionsreaktor angedockt. Daten gibt es nach einem festgelegten Betriebsplan.

Ob ein Physiker lieber ein Rädchen im Getriebe der Großforschung sein will oder sein Experiment selbst verantworten möchte, ist eine Frage der persönlichen Motivation. Die einen wollen einen gesellschaftlichen Beitrag leisten und den fundamentalen Fragen des Universum auf den Grund gehen, auch wenn sie die Antworten selbst nie finden werden, weil Großexperimente wie der LHC leicht zwei Jahrzehnte von der Konzeption bis zu den ersten Messdaten benötigen (bild der wissenschaft 9/2007, „Urknall auf Erden“). Die anderen ziehen die Motivation eher aus ihrer Neugier, wo-



Kosynkin/SPL/Agentur Focus

Einzigartiges Element: Kohlenstoff kann die komplexesten chemischen Verbindungen eingehen und sorgt auch für sich allein für molekulare Magie. Die Illustration zeigt, wie sich Nanoröhrchen in Graphen umwandeln lassen. Der Stoff könnte die Elektronik revolutionieren, denn er leitet Elektronen schneller als Silizium.

HOHE FRUSTTOLERANZ

Foto: Privat



MAX RIEDEL,
Doktorand in der
Atomchip-Gruppe
an der Ludwig-
Maximilians-Univer-
sität München

Sie haben bei der Promotion ein Table-Top-Experiment gewählt. Warum?

Weil ich hier alles selbst machen kann. Ich kenne jede Schraube meines Experiments und bekomme tiefe Einblicke in die Natur mit relativ einfachen Mitteln.

Sie hatten also keine Hilfe?

Doch. Teamwork ist in der Experimentalphysik wichtig. Die Idee zum Experiment und den Atomchip gab es bereits. Ich habe dann mit einem weiteren Doktoranden und einem Diplomanden die ganze Peripherie wie Vakuumanlage, Steuerungselektronik und Laser drum herum gebaut. Wir haben vieles selbst gemacht, sind aber keine Mechaniker. Wenn ich etwas konstruiert habe, gehe ich zu den technischen Zeichnern am Max-Planck-Institut für Quantenoptik und frage sie, ob man das so bauen kann. Das Gleiche gilt für die Elektronik. Standardbauteile wie Spiegel oder optische Schalter kann man heute kaufen, das erleichtert die Sache natürlich.

Hatten Sie nie technische Probleme?

Jede Menge. Immer wieder funktioniert mal etwas nicht. Am schlimmsten sind Geisterfehler: Man sucht zwei Wochen lang nach einem Fehler – und plötzlich ist er weg, ohne dass man weiß warum.

Wollten Sie schon mal alles hinwerfen?

Es gibt Tage, an denen man genervt ist. Eine hohe Frustration gehört zur Ausbildung eines Physikers. Trotzdem macht sie Spaß. Aufgeben wollte ich noch nie. Ein Freund am Deutschen Elektronensynchrotron DESY hat es schwerer. Er bekommt nur zwei- oder dreimal im Jahr Strahlzeit. Wenn etwas schief geht, wirft ihn das um Monate zurück.

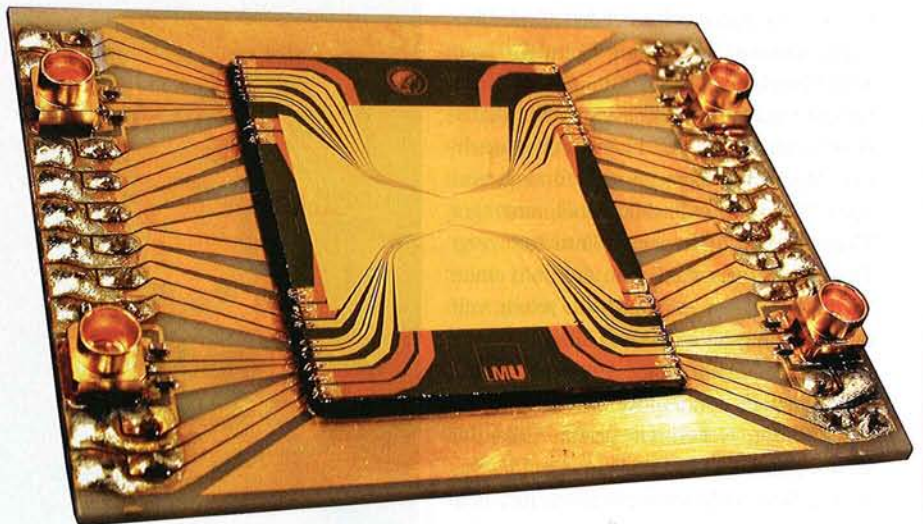
bei es um rasche Antworten geht. Auch wenn Philipp Treutlein eindeutig zur zweiten Spezies gehört, meint er: „Es ist gut, dass es beide gibt.“

Für die Table-Top-Experimente spricht, dass sie relativ wenig Geld kosten. Ein Experiment mit dem Münchner Atom-Chip benötigt etwa 100 000 bis 200 000 Euro pro Jahr. Jeweils rund die Hälfte davon entfällt auf die Sachkosten und auf das Gehalt von zwei Forschern mit Doktoranden-Stipendium. Ganz andere Summen werden am CERN bewegt: Der LHC allein kostet gut drei Milliarden Euro, mit allen Umrüstungen der Infrastruktur sogar rund vier Milliarden. Hinzu kommen die nicht eindeutig bezifferbaren Investitionen vor allem in Personal von ungefähr 500 externen For-

gen, die Arbeit an den Großexperimenten sei international und diene der Völkerverständigung, kontert der Wiener Professor mit dem Hinweis, dass die Hälfte seines Teams nicht aus Österreich stammt. Nach Zeilingers Ansicht ist bei den Großexperimenten die Grenze des Beherrsch- und Finanzierbaren erreicht. Es wird in Zukunft eine natürliche Entwicklung hin zu kleineren Experimenten geben, ist der Quantenphysiker überzeugt, auch wenn große Experimente wie der Neutrino-Detektor Amanda am Südpol weiterhin wichtig sind.

MÖGLICHSST BREIT INVESTIEREN

Vielleicht sind die Forschungspolitiker bei der Großforschung gerne großzügig, weil sie wissen, was sie für das viele Geld bekommen – auch wenn es die möglicherwei-



Atomchip: In raffinierten Magnetfallen können ultrakalte Atome (Bose-Einstein-Kondensate) in einen verschränkten Quantenzustand oder zur Interferometrie gebracht werden.

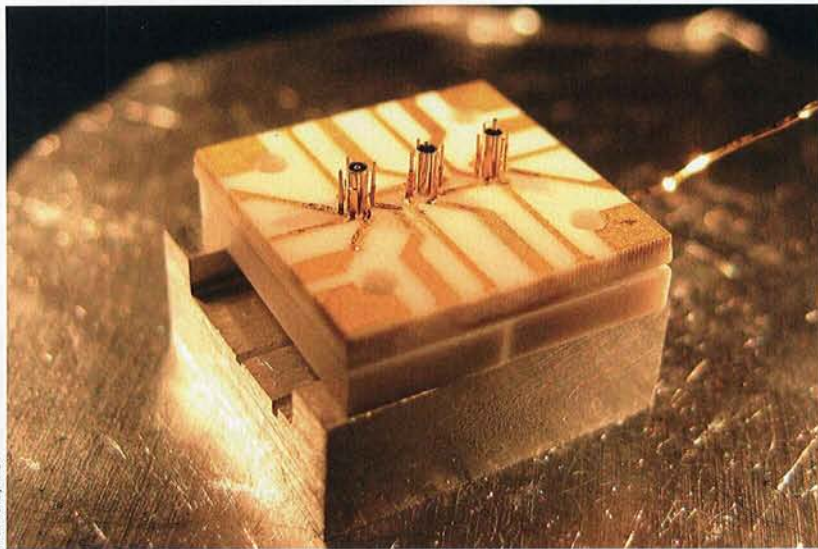
schungsinstituten und Universitäten. Legt man die immensen Kosten auf die etwa 10 000 Wissenschaftler um, die weltweit zum LHC beitragen, dürften die Pro-Kopf-Ausgaben grob geschätzt eine halbe Million Euro betragen.

„Schade ums Geld und um den Intellekt der jungen Leute“, findet Anton Zeilinger, Professor für Quantenphysik an der Universität Wien. Jedes seiner Experimente kostet etwa eine halbe Million Euro. Sechs Leute arbeiteten daran, wobei jeder alles macht – „eine bessere Ausbildung gibt es nicht“, meint Zeilinger. Das Argument der Kolle-

se nie praxisrelevante Erkenntnis ist, wie die Welt eine milliardstel Sekunde nach dem Urknall aussah. Fördert man mit dem selben Geld Hunderte kleinerer Experimente, ist das Ergebnis nicht so klar. Doch auf diese Ungewissheit müsse man sich einlassen, wenn man echte Spitzenforschung wolle, meint Zeilinger. „Wir sollten mehr ungewöhnliche Forschung unterstützen“, fordert der Österreicher, der mit seinen Experimenten zum „Beamen“ von Quanteninformation auch Populärmedien für die Physik begeistert hat (bild der wissenschaft 9/2003, „Spuk in der Quantenwelt“). Der Maßstab sollte die Qualität des Konzepts

© Treutlein/MPI für Quantenoptik und LMU München

Ionenfalle: Dieses technische Wunderwerk kann ein isoliertes geladenes Atom über jedem der drei vertikalen Zylinder halten. Damit lassen sich sehr schwache Kräfte messen oder einzelne Photonen zur Quantenkommunikation nutzen.



Malwald/NIST

nen. „Wichtig ist in der Physik, an die Grenzen zu gehen. Denn da passieren neue Dinge.“ Und die geschehen im Großen wie im Kleinen. So lassen sich Graphene und auch ihre gerollten Versionen, die Kohlenstoff-Nanoröhrchen, simpel herstellen, das Verständnis der zugrunde liegenden Atomphysik ist aber extrem schwierig, wie Philips betont. Deshalb sei die Forschung daran besonders lohnend. Philips Credo: „Benutze einfache Systeme, um komplexe Systeme zu verstehen.“ Diese Forderung erfüllen die Experimente Hänschs und von Klitzings. Der LHC aber scheint dieses Prinzip geradezu auf den Kopf zu stellen, weil er mit gigantischem Aufwand 40 Jahre alte Theorien bestätigen soll. Obwohl er aus

ringe experimentelle Aufwand lockte viele Physiker, sich mit Kohlenstoff-Bällen und -Röhrchen zu beschäftigen oder jetzt mit Graphenen – einem Forschungsgebiet, das geradezu explodiert ist.

Aber: Auch wenn ein Klötzchen Graphit und ein Klebeband nur wenige Euro kosten – großartige Forschung lässt sich damit allein auf Dauer nicht machen. „Wenn die Wiese erst mal abgegrast ist, wird der Aufwand steigen“, sagt Jurgen Smet. Schon jetzt wirft das Stuttgarter Max-Planck-Institut alles in die Waagschale, um international ganz vorne mitzumischen. Sechs Wissenschaftler arbeiten an den Graphenen, Geräte für mehrere Hunderttausend Euro wurden angeschafft, um deren Eigenschaften zu studieren, zum Beispiel die Leitfähigkeit. Und Nobelpreisträger Klaus von Klitzing als Leiter des Forschungsbereichs sorgt für die nötige Aufmerksamkeit in der Fachwelt. Smet betont: „Wir haben schon einen Wettbewerbsvorteil.“ Der könnte sich noch vervielfachen, wenn man verschiedene Table-Top-Experimente verbindet, zum Beispiel die aus Stuttgart und Garching. Smet ist überzeugt: „Ultrakalte Graphene sind das nächste spannende Thema.“ ■



BERND MÜLLER, ehemaliger bdw-Redakteur, hat bei seinem Physik-Studium Experimente „aus einer Hand“ bevorzugt.

MEHR ZUM THEMA

INTERNET

Forschung von Klaus von Klitzing & Co:
www.fkf.mpg.de/klitzing/research_topics/research_topics.php

Graphene in der Physik:
www.weltderphysik.de/de/4245.php?ni=423

Atomchip-Gruppe an der LMU München:
www.munichatomchip.de

Web-Seite der Deutschen Physikalischen Gesellschaft mit vielen Beiträgen zu Forschung, Ausbildung und Arbeitsmarkt in der Physik:
www.dpg-physik.de

HÖRBUCH

Anton Zeilinger
DIE SCHÖNHEIT DER QUANTENPHYSIK
Supposé-Verlag 2005, € 24,80

sein sowie ein guter Mix aus Grundlagenforschung und anwendungsrelevanter Forschung. Von 100 Projekten seien vielleicht 2 so spektakulär, dass sie die Kosten der übrigen 98 wieder einspielten. Diese Forderung unterstützt George Smoot, Physik-Nobelpreisträger von 2006: „Man sollte nicht zu viel in einzelne Gebiete investieren, sondern möglichst breit.“

Für William Philips, der 1997 mit dem Physik-Nobelpreis für das Kühlen und Einfangen von Atomen mit Lasern ausgezeichnet wurde – die Basis für die Herstellung von Bose-Einstein-Kondensaten à la Ketterle –, sind die Kategorien „groß“ oder „klein“, „teuer“ oder „billig“ ungeeignet, um in der Forschung die Spreu vom Weizen zu tren-

dem Lager der Table-Top-Physiker stammt, sieht Philips das anders: „Die Maschine ist zwar groß, doch das Konzept des LHC ist einfach.“

HOCHENERGIEPHYSIK AM SCHEIDEWEG

Allen Caldwell, Direktor am Max-Planck-Institut für Physik in München, wo viele Großexperimente etwa für den LHC oder Neutrino-Detektoren ausgetüfelt werden, sieht sein Forschungsgebiet am Scheideweg: „Wenn die Hochenergiephysik eine Zukunft haben soll, muss der LHC eine neue Entdeckung bringen oder eine neue Technologie für kleine Beschleuniger.“ Table-Top-Experimente haben den Vorteil, dass viele Forscherteams schnell auf ein neues Gebiet aufspringen können. Der ge-