



Von der Umwelt abgekoppelt:
In einem neuen Stuttgarter
Präzisionslabor gibt es für jedes
Experiment eine Messkabine,
die störende Einflüsse von außen
optimal abschirmt. So können
die Max-Planck-Forscher Quanten-
phänomene in Nanostrukturen
extrem präzise untersuchen.

Quantenwelt im Kubus

Die Nanoelektronik ist Verheißung und Herausforderung gleichermaßen. Denn in ihren winzigen Dimensionen zeigen Elektronen, die das Betriebsmittel elektronischer Bauteile bilden, manche exotischen Quanteneffekte. Ihr Verhalten in Nanostrukturen untersuchen die Wissenschaftler in **Klaus Kerns** Abteilung am **Max-Planck-Institut für Festkörperforschung** in Stuttgart mit extrem empfindlichen Methoden.

TEXT **ROLAND WENGENMAYR**

Bernstein hieß im alten Griechenland *élektron*, und die Menschen der Antike wussten bereits, dass das fossile Harz sich durch Reiben elektrisch auflädt. So lag es im späten 19. Jahrhundert nahe, ein damals neu entdecktes Teilchen mit negativer Elementarladung „Elektron“ zu taufen. Heute wissen wir, dass das Elektron der Kitt unserer Welt ist. Als Quantenkleber verbindet es Atome zu Molekülen und Moleküle zu all der organischen und anorganischen Vielfalt, wie wir sie kennen. Die gesamte Chemie basiert auf den Quanteneigenschaften von Elektronen. Und ohne das Elektron als Träger von Energie und Information stünde unsere Gesellschaft vor dem Blackout.

So verwundert es nicht, dass Elektronen nach wie vor zu den wichtigsten Untersuchungsobjekten der Grundlagenforschung gehören. Das gilt auch für Klaus Kerns Abteilung „Nanowissenschaften“ am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart. Wie ein roter Faden zieht sich das Verhalten

von Elektronen in winzigen Nanostrukturen durch den gesamten Forschungsbereich. Der Fokus der Forschung liegt auf grundlegenden, auch exotischen Quanteneigenschaften, die Elektronen in verschiedenen Umgebungen zeigen können.

DIE FORSCHER KÖNNEN EINZELNE ATOME BEOBACHTEN

Mit welchen Spezialitäten Elektronen in Nanostrukturen aufwarten, untersuchen die Wissenschaftler an einzelnen Molekülen ebenso wie an ultradünnen Schichten etwa aus einer einzigen Lage von Kohlenstoffatomen, die als Graphen zahlreiche neue Anwendungen elektronischer Bauteile ermöglichen könnten (siehe Seite 34, *Chips vom Blatt*). Dem Verhalten der Elektronen in Nanodimensionen kommen die Forscher aber nur auf die Spur, weil sie einzelne Atome und Moleküle anfassen und beobachten können. Dabei gehen sie mit ihren Experimenten bis an die Grenze des technisch Möglichen und verschieben diese auch zu immer neuen Extremen. >



Ein einzelnes Atom ist so klein, dass es sich neben einem Hühnerei so ausnehme wie das Ei neben dem kompletten Planeten Erde. Es hat einen Durchmesser von wenigen zehntel Nanometern, ein Nanometer ist ein milliardstel Meter. „Nano“ geht auf das altgriechische Wort für Zwerg zurück, und wer mit solchen Zwergen hantieren will, der braucht das feinste Werkzeug, das man überhaupt aus Atomen herstellen kann. In Klaus Kerns Abteilung besteht es vor allem aus ultrafeinen Metallspitzen, an deren Ende im Extremfall nur ein einziges Molekül oder Atom sitzt.

EIN HARTER KAMPF GEGEN EINE UMWELT VOLLER STÖRUNGEN

Diese ultimativen Spitzen stecken in sogenannten Rastertunnelmikroskopen, die tatsächlich einzelne Atome sichtbar machen können. Sie fahren über eine Oberfläche und ertasten dabei einzelne Atome. Die Information über die atomare Gestalt liefern Elektronen, welche das Vakuum zwischen den Atomen auf der Probenoberfläche und den Atomen an der Spitze überwinden: Physiker sprechen davon, dass die negativen Ladungsträger durch die luftleere Zone tunneln, in der sie sich nicht aufhalten dürfen.

Wer mit superspitzen Nadeln einzelne Atome erfassen will, führt allerdings einen harten Kampf gegen eine Umwelt voller Störungen. In grober Form kennen das Problem viele, die gern Vinylplatten auflegen und in Altbauten wohnen. Läuft man über den schwingenden Dielenboden, dann hüpfet die Nadel über die Plattenrillen. Genauso, nur unvorstellbar viel empfindlicher, reagiert die Nadel eines Rastertunnelmikroskops

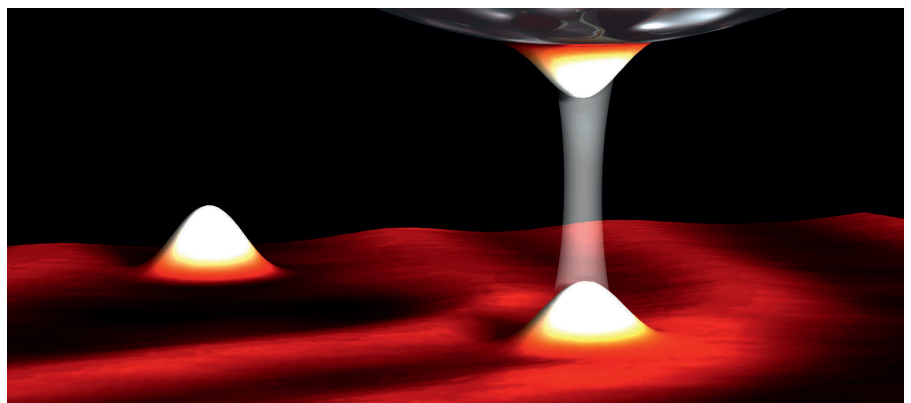
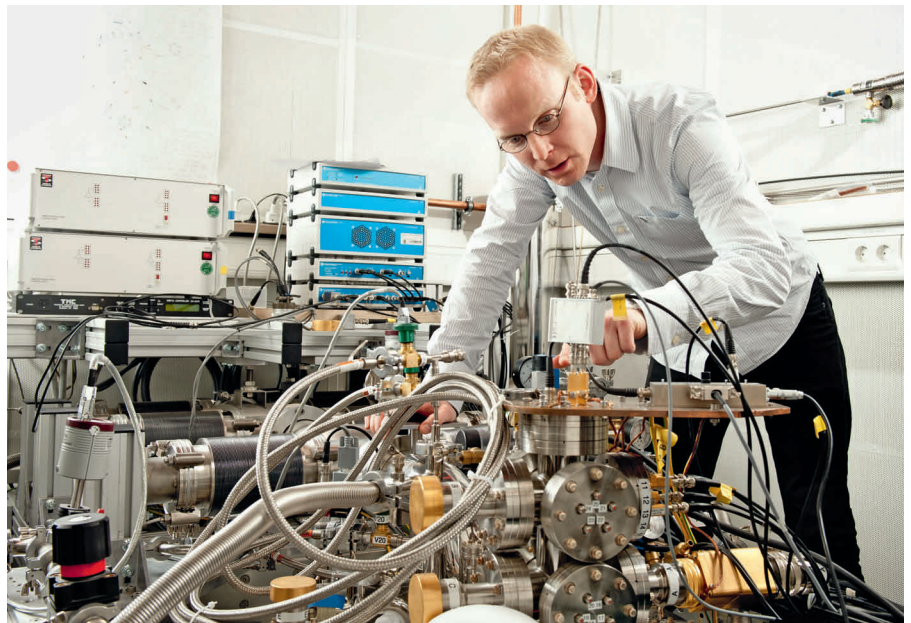
Forschung über zwei Ebenen: Der Techniker Wolfgang Stiepany justiert eine Blende in einem Rastertunnelmikroskop, dessen äußerer Vakuumtopf durch ein Loch in der Decke ins obere Stockwerk ragt. Zahlreiche Pumpen und Kompressoren sowie viel Steuerelektronik schaffen im Innersten der Apparatur die nötigen Bedingungen für die Präzisionsexperimente.

auf geringste Erschütterungen. Allein schon der Linienbus, der hundert Meter entfernt vor dem Institut hält, kann so eine Messung zerdieseln.

Deshalb müssen die Stuttgarter ihre Experimente mit enormem Aufwand abschirmen. Was das bedeuten kann, das erfährt man bei Christian Ast und Markus Etzkorn. Die beiden Physiker arbeiten an einem Rastertunnelmikroskop der Superlative. Ast hat das Experiment seit 2003 im Team geplant und aufgebaut. Doch erst Anfang 2011 lief es zuverlässig, davor lag ein wissenschaftlicher Langstreckenlauf voller technischer Hürden. Für die gewaltige Stahlsäule des äußeren Vakuumpotfes musste sogar ein kreisförmiges Loch in die Betondecke des Labors gesägt werden. Zwei Stockwerke füllt das Gerät, dessen Innenleben wie eine Hightech-Zwiebel aufgebaut ist.

Im Innersten der vielen Schalen aus Kühlstufen und Abschirmungen steckt das eigentliche Rastertunnelmikroskop. „Der Scankopf ist gerade einmal faustgroß“, erklärt Ast. In die innerste Kammer des weltweit nahezu einmaligen Gerätes gelangen die Proben durch ein aufwendiges Schleusensystem. Dort herrscht seit Januar 2011 eine Kälte, die so extrem ist, dass dagegen auch sibirische Winter extrem heiß sind. Bis auf wenige tausendstel Grad robben sich die Forscher an den absoluten Temperaturnullpunkt bei minus 273,15 Grad Celsius heran. Die Wärme fast komplett aus dem Gerät auszusperrern ist nötig, denn Wärmeenergie ist nichts anderes als störendes Gewackel von Atomen und Elektronen.

So liefert das Gerät ultrascharfe Bilder – und mehr: Bei diesen Temperaturen werden viele Metalle supraleitend, verlieren also ihren elektrischen Widerstand. Supraleitung ist ein kollektives Quantenphänomen, das Elektronen durch eine Massenhochzeit hervorbringen. Je zwei Elektronen verheiraten sich zu einem Cooperpaar, und diese Cooperpaare tanzen gemeinsam eine Art Quantenballett durch das Ma-



Alles im Blick: Christian Ast prüft die Anschlüsse des Rastertunnelmikroskops (oben). Mit solchen Geräten machen die Forscher aus der Abteilung Nanowissenschaften ihre meisten Experimente. Das Prinzip ist dabei stets dasselbe (unten): Zwischen einer extrem feinen Spitze und einer Nanostruktur auf einer Oberfläche fließt ein Tunnelstrom (angedeutet durch den transparenten Balken), der Aufschluss über die Quanteneigenschaften der Probe gibt. Hier wird ein Atom untersucht, das als heller Hügel erscheint; auch an der Spitze des Mikroskops sitzt nur ein einziges Atom.

terial, ohne sich daran zu reiben. Doch die komplexe Elektronenchoreografie wirft auch über hundert Jahre nach ihrer Entdeckung viele Fragen auf.

DIE SUPRALEITUNG ÜBERLEBT EIN STARKES MAGNETFELD

Die Stuttgarter fragten sich zum Beispiel: Wie verhält sich Supraleitung, wenn man sie in der Spitze eines Rastertunnelmikroskops einsperrt? Um das zu untersuchen, nutzt Asts Team einen extrem starken Elektromagneten, der ebenfalls in den Zwiebelschalen ihres Gerätes steckt. Magnetfelder erzeugen in Supra-

leitern – wie in einem perfekten Dynamo – kreisende Gegenströme. Diese Wirbelströme versuchen, das Magnetfeld aus dem Supraleiter hinauszudrängen. Ist das Magnetfeld allerdings zu kräftig, dann bricht die Supraleitung zusammen. „Einfach gesagt, werden diese Kompensationsströme zu stark“, erklärt Ast. Sie zerfetzen sozusagen die Cooperpaare.

Bereits 1970 fragten sich Physiker, was mit der Supraleitung passieren müsste, wenn man sie zu eng für diese zerstörenden Stromwirbel einklemmt. Sie sagten voraus, dass ein starkes Magnetfeld dann den Supraleiter durchdringen müsste, ohne die Cooperpaare aufzu-

Schafft die Grundlage für eine organische Elektronik: Mit ihrem Rastertunnelmikroskop erforscht Uta Schlickum, wie ein elektrischer Strom durch einzelne Atome und Moleküle fließt. Im Hintergrund ist die Anlage zu erkennen, in der ein Ultrahochvakuum herrscht und in der sich das Rastertunnelmikroskop befindet. Den oberen Teil der Apparatur bildet ein Kryostat, der das Innere des Instruments auf Temperaturen weit unter dem Gefrierpunkt kühlt.

trennen. Experimente bestätigten diese gesteigerte Überlebensfähigkeit tatsächlich für sehr dünne supraleitende Filme. Dank Asts Team weiß man nun, dass dies auch für die supraleitenden Spitzen von Rastertunnelmikroskopen gilt. Diese Erkenntnis ist nicht zuletzt wichtig, um supraleitende Tunnelspitzen in weiteren Experimenten anwenden zu können.

AUF LUFTFEDERN SCHWEBEN DIE EXPERIMENTE

„Wir werden den Einfluss von Störungen noch spürbar verringern“, blickt Christian Ast in die Zukunft, „wenn wir mit unserem Rastertunnelmikroskop in das neue Präzisionslabor umziehen.“ Dort, im erst 2012 eingeweihten, architektonisch faszinierenden Laborgebäude gegenüber, wartet ein optimal abgeschirmter Platz auf das Experiment. Er befindet sich in einem von elf haushohen Kuben, die in einer großen Halle stehen. Als Orientierungshilfe hat jeder Kubus eine andere Farbe, weshalb dieses Arrangement unwillkürlich an bunte Bauklötze eines Riesenkindes erinnert.

In einem auf Luftfedern schwebenden Obergeschoss beherbergt jeder Kubus ein superempfindliches Experiment. Im Untergeschoss ist, davon nahezu perfekt entkoppelt, die nötige Infrastruktur aus vibrierenden Vakuumpumpen und sonstigen störenden Geräten untergebracht. Neben dem Schutz vor Vibrationen kommt es dabei auch auf eine aufwendige Abschirmung gegen die allgegenwärtige elektromagnetische Strahlung an. All die Störungen sperren die tresorartigen Türen aus, sobald sie sich schließen.

In einem Kubus steht das Rastertunnelmikroskop von Uta Schlickum. „Wir können mit unseren Nadeln ein einzelnes Molekül aufpicken oder zum Beispiel ein Metallatom an eine bestimmte Stelle eines Moleküls setzen“, erklärt die Physikerin, die eine Emmy Noether-Nachwuchsgruppe leitet. Schlickums Werkzeug ist eine Tunnelspitze, an deren Ende ein einziges Metallatom sitzt.

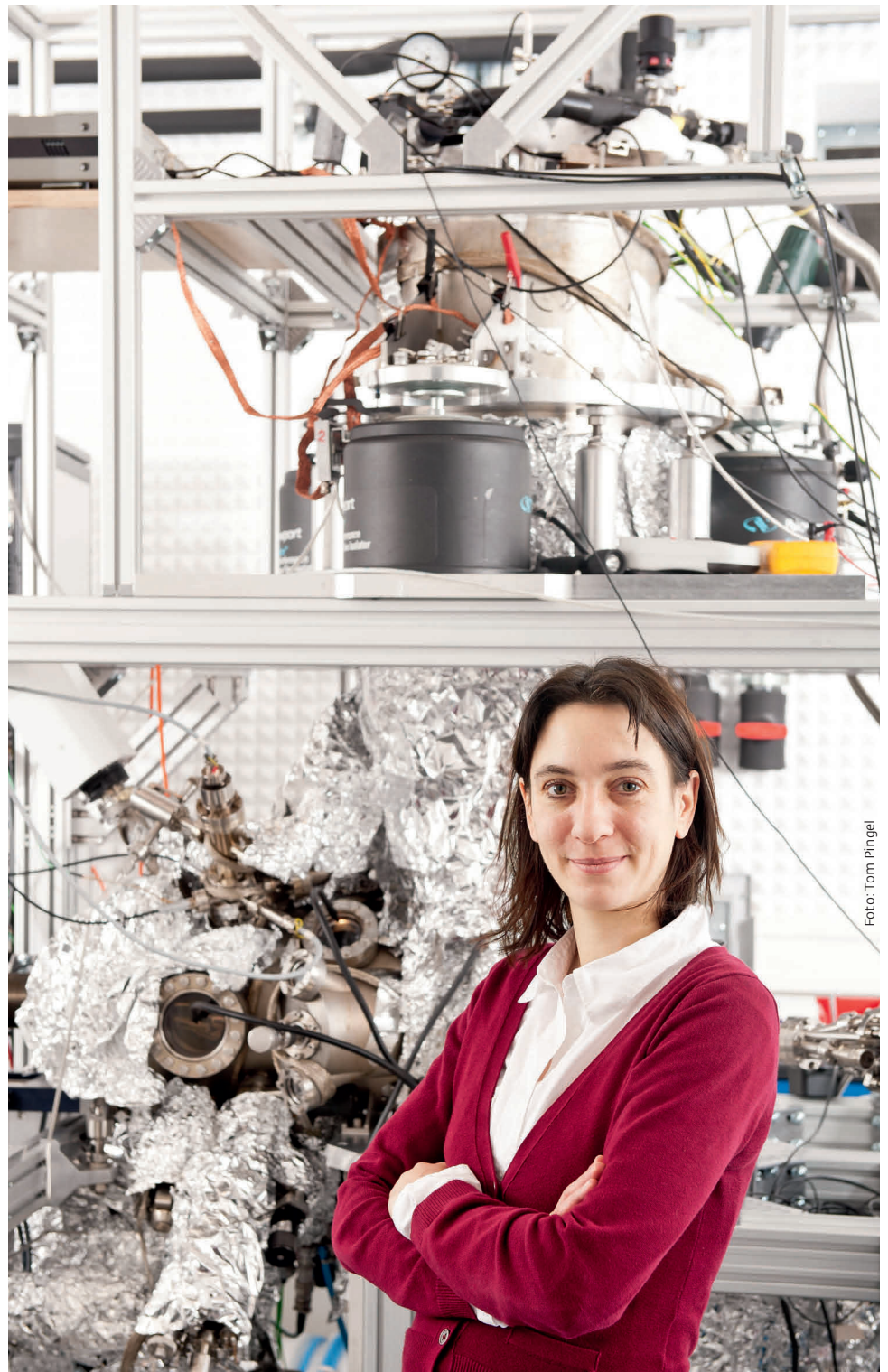
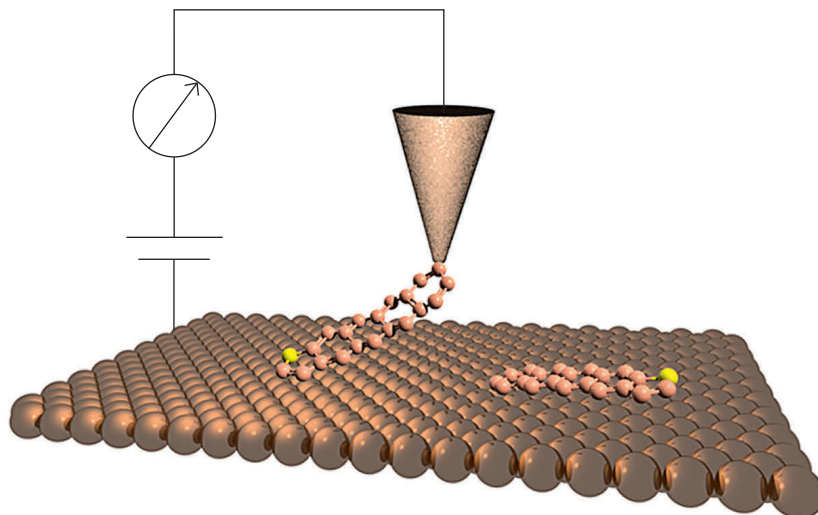


Foto: Tom Pingel



Mit diesem Quantenpunktkontakt untersucht ihr Team, wie Elektronen als winziger Quantenstrom durch ein Molekül fließen.

Für die Experimente liegt ein Molekül auf einer nahezu perfekten Oberfläche aus Kupfer. Kupfer eignet sich als Unterlage besonders gut, weil es sehr gut elektrisch leitet und zugleich chemisch nicht aggressiv ist. Letzteres ist wichtig, weil die Gruppe herausfinden will, wie kleinere chemische Veränderungen am Molekül dessen elektrische Eigenschaften beeinflussen.

„Diese Zusammenhänge sind von Molekül zu Molekül verschieden“, betont die Physikerin. Kürzlich lag Pentacene unter der Tunnelspitze. Dieses Molekül ist ein guter organischer Halbleiter und damit ein heißer Kandidat für eine zukünftige organische Elektronik. Was genau im Molekül beim Fließen der Elektronen passiert, ist allerdings noch unbekannt. Auch wie chemisch an das Molekül geheftete Metallatome oder kleinere Molekülbausteine dessen Eigenschaften verändern, ist offen.

EINE SOLARZELLE, DIE WASSER CHEMISCH ZERLEGT

In den fünf Sechseringen von Pentacene stecken immerhin 22 Kohlenstoff- und 14 Wasserstoffatome. Entsprechend viele Elektronen verkomplizieren das genaue Verständnis der elektronischen Eigenschaften des Moleküls. Denn das Verhalten der Elektronen hängt von den Quantenzuständen des Moleküls ab, und diese werden desto komplexer, von je mehr Elektronen sie gebildet werden.

Die Formen dieser Zustände erinnern an längst ausgestorbene Trilobiten. Solche Quantenkurven sind nicht nur für die Grundlagenforscher attraktiv, sondern auch für alle, die diese Moleküle künftig in einer organischen Elektronik einsetzen wollen. Organische Elektronik könnte es möglich machen, Kleidung oder Verpackungen mit flexiblen und kostengünstig sowie umweltfreund-

Elektronik, auf die Spitze getrieben: Mit der Nadel eines ihrer Mikroskope heben die Forscher um Uta Schlickum Moleküle, hier ein Pentacene-Derivat, von einer Metalloberfläche und messen, wie viel Strom bei einer bestimmten Spannung durch das Molekül fließt. So untersuchen sie den Ladungstransport in den einzelnen Teilchen.

lich herzustellenden Mikrochips, Leuchtdioden oder Solarzellen zu bestücken.

Um künftige Solarzellen geht es auch bei Soon Jung, und zwar um eine besondere Art. Die Koreanerin zeichnet zwei Striche und einen Pfeil dazwischen: So hoch soll eingefangenes Sonnenlicht die Elektronen auf einer Energie-Quantenleiter hüpfen lassen. „Wir brauchen ungefähr 1,4 Volt“, sagt sie. Denn die Solarzelle, an welcher die Koreanerin forscht, soll keinen elektrischen Strom produzieren; dafür reichen im Prinzip auch kleinere Spannungen aus. Stattdessen soll das fotovoltaische Element Wasser chemisch in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegen, und zwar hocheffizient. Liefße sich Wasserstoff auf diese Weise im großen Stil erzeugen, gäbe es für eine nachhaltige Energieversorgung einen chemischen Speicher, der den bisher besten elektrischen Batterien überlegen ist. Brennstoffzellenautos könnten ihn tanken, ein Pipelinenetz könnte ihn verteilen.

Damit das Wasserersetzen funktioniert, muss jedes von der Sonne in der Solarzelle freigesetzte Elektron eine Energie mitbringen, die diesen Sprung von 1,4 „Elektronenvolt“ ermöglicht. In der Welt der Moleküle ist das schon recht hoch. Außerdem soll die Solarzelle möglichst das komplette Spektrum des Sonnenlichts effizient nutzen. Also untersucht die von Jung geleitete Gruppe vielversprechende Molekülkandidaten in der Hoffnung, dass diese beim Auftreffen der Lichtquanten schön effizient Elektronen in der gewünschten

Energie freisetzen. Noch ist das reine Grundlagenforschung, macht die Chemikerin klar.

PER KNOPFDRECK GENAU EIN EINZIGES PHOTON

In einem anderen Kubus geht Klaus Kuhnke zusammen mit seinem Doktoranden Christoph Große einen umgekehrten Weg: Die beiden Forscher wollen mit Elektronen Licht erzeugen. Dabei geht es um ein höchst spezielles Licht. Schon länger ist bekannt, dass die feine Nadel eines Rastertunnelmikroskops zusammen mit der glatten Metalloberfläche darunter eine Art Hohlraum bildet. Zumindest fühlt es sich für die tunnelnden Elektronen wie ein Hohlraum an.

Bei richtiger Anordnung schaukelt sich darin eine elektromagnetische Welle auf. „Sie verhält sich wie eine schwingende Saite über einem Resonanzboden“, beschreibt Gruppenleiter Kuhnke, was geschieht. Das Resultat ist ein schwaches Licht, das aber besondere Eigenschaften hat. Praktisch jede Lichtquelle erzeugt Lichtquanten – Photonen – so zufällig, wie radioaktive Atomkerne zerfallen. Physiker möchten aber sozusagen per Knopfdruck genau zu einem gewünschten Zeitpunkt ein einziges Photon erzeugen.

„Man nennt es Photon on Demand“, sagt Kuhnke, und seit wenigen Jahren ermöglichen dies zum Beispiel aufwendige Laserexperimente. Der Physiker hofft, in Stuttgart eine alternative

„Quantenlampe“ entwickeln zu können. Diese Lichtquelle wäre für grundlegende Quantenexperimente interessant. „Man könnte damit aber auch die Sicherheit von Übertragungsleitungen prüfen“, erklärt der Physiker ganz zeitgemäß: „Wenn das garantiert abgeschickte Photon nicht ankommt, ist ein Spion in der Leitung.“

Für die Informationsverarbeitung sind Elektronen aber nicht nur als Lichtquelle, sondern auch als Träger eines Spins interessant. Dieser entspricht, bildlich ausgedrückt, der Achse, um die sich ein Elektron selbst dreht, und macht den Ladungsträger zu einem winzigen Elementarmagneten. Man kann ihn sich also wie eine kleine Magnetnadel vorstellen. Der Spin ermöglicht es, dass ein einziges Elektron zwei Bit an digitaler Information tragen kann. Ein Bit steckt wie bei der konventionellen Elektronik in seiner elektrischen Ladung, ein weiteres Bit in der Orientierung seines Spins – also der Magnetnadel.

Diese Idee hat das Forschungsgebiet der Spintronik hervorgebracht, das eine schnellere und energiesparende Elektronik verspricht. Seine Spur führt in

Stuttgart zu Marko Burghard. Der Physikochemiker arbeitet mit seiner Gruppe an zwei Materialien, die derzeit viel Aufmerksamkeit der Forschungsgemeinde auf sich ziehen: Graphen und sogenannte topologische Isolatoren. Beiden ist gemeinsam, dass sie ein superflaches, zweidimensionales Elektroensystem besitzen.

FUNKTIONALISIERUNG MACHT GRAPHEN ZU EINEM MAGNETEN

Graphen besteht aus einer einzigen Lage von sechseckigen Kohlenstoffwaben. Bis vor wenigen Jahren war unklar, ob so ein Material überhaupt stabil existieren kann. Graphenflocken sind schließlich in einer Dimension nur ein Atom dünn, in den anderen beiden Dimensionen dagegen richtig zum Anfassen groß. Überraschenderweise zeigte sich Graphen als außerordentlich stabil und sogar extrem reißfest.

Für Burghard noch interessanter sind allerdings die elektronischen Eigenschaften. Dazu gehört, dass sich die Spins der im Graphen fließenden Elektronen im Prinzip direkt manipulieren lassen. Um allerdings aus Gra-

phen eine funktionierende Spintronik zu machen, muss man daran verschiedene Moleküle chemisch anhängen. Erst diese Funktionalisierung eröffnet den Weg zu verschiedenen Schaltungselementen auf der Graphenlage. Doch die Kohlenstoffschicht durch molekulare Anhängsel zu verändern ist schwierig: „Das Problem dabei ist gerade die hohe chemische Stabilität von Graphen“, sagt Burghard. Doch kürzlich gelang es seiner Gruppe im Rahmen einer internationalen Kooperation, erstmals zu demonstrieren, dass man durch eine passende Funktionalisierung aus Graphen sogar einen richtigen Magneten – einen Ferromagneten – machen kann.

Noch mehr als Graphen faszinieren Burghard jedoch topologische Isolatoren. Ihren seltsamen Namen haben diese Verbindungen davon, dass sie in ihrem Inneren, also in der dritten Dimension, keinen elektrischen Strom leiten. Doch auf ihrer zweidimensionalen Oberfläche sind sie sogar gute elektrische Leiter.

Ein einfaches Bild hilft, das merkwürdige Verhalten der Materialien zu verstehen. In Leitern und Halbleitern

Für das elektronische Verhalten in zwei Dimensionen, etwa von Graphen, interessiert sich Marko Burghard. Bauelemente aus dem Material bewahrt er in einem Exsikkator auf, um sie gegen Staub und Luftfeuchtigkeit zu schützen (1). Das Graphen wird als ihr aktives Material auf einem Träger mit Elektroden versehen und in einem Chipträger integriert (2). Auch topologische Isolatoren, die Strom nur an ihrer Oberfläche leiten, erforscht Burghards Team. Kürzlich haben die Wissenschaftler festgestellt, dass es sich bei dem natürlichen Mineral Kawazulit um ein solches Material handelt (3).



Fotos: Tom Pingel (links, rechts oben), MPI für Festkörperforschung (rechts unten)



Den elektronischen Spezialitäten der Nanowelt auf der Spur: Stephan Rauschenbach, Soon Jung, Klaus Kern und Verena Schendel (von links) diskutieren über neue Experimente.

sorgen die Elektronen in den äußeren Schalen um die Atome für die Leitfähigkeit, weil sie sich lösen und frei durch das Material flottieren können. In topologischen Isolatoren sind sie aber in Orbitalbahnen um ihre Atome gefangen. An der Oberfläche des Materials sind diese Orbitale jedoch angeschnitten. Hier können die Elektronen entkommen und sich frei bewegen. Mit einem Stromfluss in diesem zweidimensionalen „Elektronengas“ sollte auch eine Ausrichtung der Elektronenspins verbunden sein. Daher sind topologische Isolatoren so interessant für zukünftige spintronische Anwendungen.

Der Fund des ersten topologischen Isolators im Labor gelang 2008. Die Stuttgarter entdeckten kürzlich sogar, dass selbst die Natur solche Materialien hervorbringt. Wie sie herausfanden, handelt es sich auch bei dem natürlichen Mineral Kawazulit um einen topologischen Isolator. „Unsere Probe stammt aus einer alten Goldmine in Tschechien“, sagt Burghard. Nicht nur das natürliche Vorkommen hat die Wissenschaftler elektrisiert. Vor allem erwies

sich das Kawazulit im Labor als perfekter topologischer Isolator, obwohl es voller natürlicher Verunreinigungen steckt. Das beweist, dass der Effekt außerordentlich stabil ist.

Wer den Forscherinnen und Forschern aus Klaus Kerns Abteilung über die Schulter schaut, lernt die zahlreichen Aspekte kennen, unter denen sie sich den elektronischen Eigenschaften von Nanostrukturen widmen. Klar wird dabei, dass sich die Ladungsträger in diesen winzigen Dimensionen oft ganz anders verhalten als in Materialien mit

greifbareren Abmessungen und dass sie einige Überraschungen bieten. Die Stuttgarter wollen mit ihrer Forschung vor allem das Wissen über die oft seltsam anmutenden Quanteneigenschaften der Nanowelt erweitern. Doch wie jede gute Grundlagenforschung hat die Nanoelektronik das Potenzial, unsere Technik auf eine Weise zu revolutionieren, die heute kaum absehbar ist. Spintronik, organische Elektronikbauteile und Solarzellen für eine nachhaltige Energieversorgung sind dabei nur einige von vielen denkbaren Möglichkeiten. ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Elektronen zeigen in Nanostrukturen andere Eigenschaften als in größeren Dimensionen, dabei treten auch exotische Quanteneffekte auf.
- Um die elektronischen Eigenschaften einzelner Atome und Moleküle untersuchen zu können, setzen die Forscher des Max-Planck-Instituts für Festkörperforschung Rastertunnelmikroskope ein, die sie aufwendig gegen jede Störung wie Erschütterungen oder Wärme abschirmen und die zu den besten der Welt gehören.
- Die Quanteneffekte, die in Nanodimensionen auftreten, erlauben die Entwicklung etwa der Spintronik oder von Lichtquellen für einzelne Photonen. Sie ermöglichen so neue Ansätze in der Informationsverarbeitung.