

# Aromatische Chips

Druckbar, flexibel und preiswert – diese Eigenschaften versprechen Ingenieure sich von der organischen Elektronik. Wissenschaftler des **Max-Planck-Instituts für Festkörperforschung** und des **Max-Planck-Instituts für Polymerforschung** untersuchen verschiedene Materialien, aus denen sich rollbare Bildschirme oder billige Chips für Massenprodukte herstellen lassen.

TEXT **TIM SCHRÖDER**

Geldschein mit Chip: Die Transistoren, die Stuttgarter Forscher aus kleinen organischen Molekülen herstellen, arbeiten selbst auf einem rauen und geknickten Geldschein zuverlässig.

**V**ielleicht ist an Hagen Klauk ein Physiklehrer verloren gegangen. Auf jeden Fall kann er so gut erklären wie einer. Bei ihm erscheint der Elektronentransport durch Halbleiter plötzlich so klar und simpel wie ein Stromkreis mit Batterie und Birnchen. Klauk steht in einem weißen Overall mit Kapuze im staubfreien Reinraum. Die Lüftung surrt leise. „Ist ja klar, wenn die Moleküle im Halbleiter zu groß oder verdreht sind, dann bleiben die Elektronen hängen und kommen kaum voran“, sagt er und dreht und beugt und streckt seine Arme. Dann steht er stramm. „Liegen die Moleküle aber fein säuberlich und eng nebeneinander, dann können die Elektronen regelrecht durchs Material sausen.“

Die Frage, wie man Elektronen auf Trab bringt, beschäftigt ihn schon seit mehr als zehn Jahren. Man könnte glauben, dass es Spannenderes gibt. Klauk aber kommt in Fahrt, wenn er von der Vision des aufrollbaren Flachbildschirms erzählt, der so dünn ist wie Overheadfolie und so bunt wie das Display eines Smartphones. „So ein Bildschirm, der ganz aus flexibler,

dehnbarer Elektronik besteht, den man aufgerollt in die Tasche stecken kann – dazu versuchen wir unseren Teil beizutragen.“

### LEUCHTDIODEN IN PERFEKTER ANORDNUNG

Herkömmliche Displays bestehen aus Glas, auf das hauchdünn ein ungeordneter Film aus Silizium aufgedampft wird, der Elektronikwerkstoff schlechthin. Solche Displays lassen sich freilich nicht knicken. Nicht nur wegen des Glases. Auch das Silizium würde abplatzen und zerbröseln, wenn man es rollte oder faltete. Hagen Klauk interessiert sich deshalb für eine Materialklasse, die man erst seit Anfang der 1990er-Jahre so richtig ernst nimmt – Kunststoffe mit elektrischen Eigenschaften. Diese organische Elektronik besteht vor allem aus Kohlenstoff- und Wasserstoffmolekülen, den wichtigsten Ingredienzien von Kunststoffen eben. Noch aber kann es der biegsame und robuste Elektrokunststoff nicht mit dem Hochleistungssilizium aufnehmen – unter anderem, weil die Elektronen noch nicht schnell genug durch das Material flitzen.

Klauk und seine Kollegen haben sich auf Transistoren spezialisiert, die Kernkomponente aller elektronischen Bauteile und auch von Displays sind. Transistoren sind eine Art Stromventil. Sie regeln den Stromfluss in Mikroprozessoren oder in den winzigen Leuchtdioden von Flachbildschirmen. Klauk greift eine kleine Lupe vom Schreibtisch. „Hier, schauen Sie sich damit mal die Pixel auf meinem Smartphone an.“ Tatsächlich, was man sonst unscharf als kleine Pünktchen auf dem Bildschirm erkennt, ist in der Vergrößerung ein perfekt geordnetes Nebeneinander von roten, grünen und blauen Strichen – winzig klein, nur Mikrometer groß. Jeder einzelne ist eine Leuchtdiode. Und jede Leuchtdiode wird von einem eigenen winzigen Transistor gesteuert. Fließt Strom, leuchtet die Diode, je nach Stromfluss heller oder dunkler. Ein großer Bildschirm bringt es auf Millionen von Transistoren. Und die bestehen bislang ausnahmslos aus aufgedampftem Silizium.

Nicht so in Klauks Reinraumlabor am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart. Bei ihm gibt es kein Silizium mehr, sondern nur noch



Transistoren aus Kunststoff, genauer: aus kleinen, länglichen Kohlenwasserstoff-Molekülen, die wegen der Verteilung ihrer Elektronen zu den Aromaten zählen. Leuchtdioden aus Kohlenwasserstoff-Molekülen, die „organischen Leuchtdioden“, kurz OLEDs, werden bereits industriell hergestellt. Einige Elektronikunternehmen verbauen sie in ersten Displays für Smartphones oder Tablet-PCs. Ähnlich leistungsfähige organische Transistoren aber gibt es noch nicht. Genau die will Klauk entwickeln, denn für den Biege-Bildschirm der Zukunft braucht man beides: flexible Leuchtdioden und flexible Transistoren.

Ganz gleich, ob ein Transistor aus Silizium oder Kohlenwasserstoffen gefertigt wird, an seinem Aufbau ändert das zunächst einmal nichts. Da wäre zunächst das Substrat, der Träger, auf dem die Schichten des Transistors in einer Art Sandwich aufgebracht werden. Als Träger dient gewöhnlich Glas. Klauk und seine Mitarbeiter nehmen hauchdünne Folie aus dem Kunststoff PEN, Overheadfolie. Auf das Substrat dampft man eine dünne Schicht Aluminium auf. Gate-Elektrode heißt dieser Metall-

klecks. Über sie lässt sich das Stromventils regeln: Sie steuert den Elektronenfluss durch den Halbleiter.

Es folgt eine dünne Isolierschicht, das Dielektrikum. Das trennt die Gate-Elektrode unten von dem Halbleitermaterial oben, welches anschließend auf das Dielektrikum aufgetragen wird. Ein solcher Halbleiter kann je nach Zustand Strom leiten oder wie ein Isolator wirken. Gesteuert wird sein Verhalten über die elektrische Spannung an der Gate-Elektrode. Natürlich fließt Strom nur dann durch den Halbleiter, wenn das Material von zwei elektrischen Kontakten berührt wird, zwischen denen die Elektronen wandern können. Source und Drain nennt man diese Kontakte, die ganz oben auf dem Transistor sitzen.

Transistoren mit Siliziumherz sind etabliert und ausgereift. Bei den organischen Transistoren, den organischen Feldeffekttransistoren, den OFET, mussten Klauk und seine Kollegen aber gleich an mehreren Stellen feilen. Entscheidend ist unter anderem die Wandergeschwindigkeit der Elektronen oder besser: ihre Mobilität im Halblei-

termaterial. Je schneller sie reagieren, desto schneller kann man den Transistor schalten. Licht an, Licht aus. Diode an, Diode aus. Das muss flott gehen, damit das Bild auf dem Display später flimmerfrei leuchtet. Punkt zwei ist die Betriebsspannung. Manche Transistoren brauchen eine Spannung von 50 bis 100 Volt, damit sich das Stromventil überhaupt öffnet. Für den aufrollbaren Bildschirm für unterwegs wäre das irrwitzig viel. Er sollte mit höchstens drei Volt arbeiten – der Spannung einer herkömmlichen kleinen Batterie.

### GERINGE SPANNUNG FÜR DAS STROMVENTIL

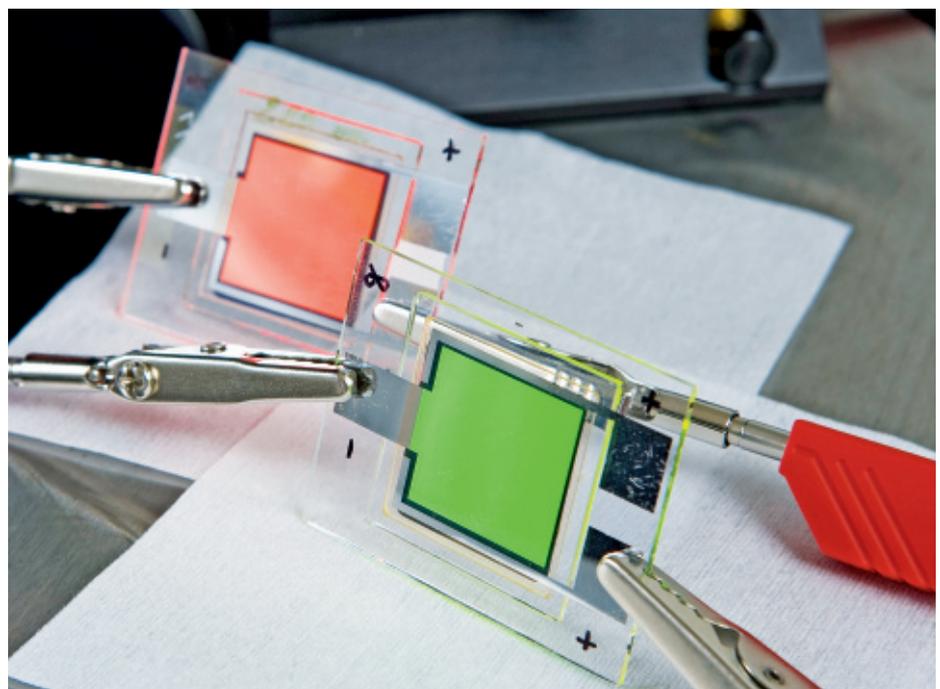
Schon vor einiger Zeit hatte sich Klauk durch eine ganze Reihe von Fachpublikationen anderer Wissenschaftler gearbeitet und die Artikel nach den Betriebsspannungen verschiedener organischer Transistoren durchforstet. Die Werte waren gewaltig. Die meisten lagen zwischen zehn und 200 Volt. An ein tragbares Elektro-Gimmick wäre da nicht zu denken gewesen. Einige Labors hatten

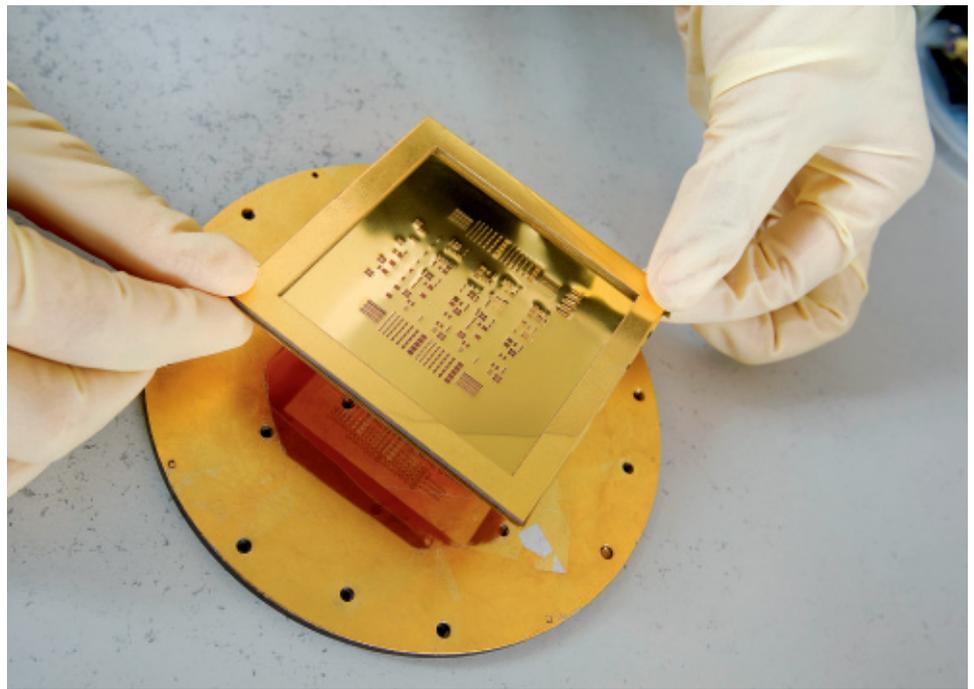
linke Seite	Nur in der staubfreien Atmosphäre eines Reinraums kann das Team von Hagen Klauk aussagekräftige Experimente mit organischen Halbleitern machen. Ute Zschieschang (im Vordergrund) untersucht zunächst per Augenschein, ob sich die einzelnen Schichten auf einer Folie sauber abgeschieden haben.
unten	Transistoren im Test: Am elektrischen Messplatz arbeitet Hagen Klauk (oben) an der elektrischen Charakterisierung eines organischen Transistors. Das Substrat, auf dem die Forscher die Transistoren angefertigt haben, ist die dünne, kreisförmige Polymerfolie vorne links auf dem Probenstisch. Das Bild unten zeigt zwei organische Leuchtdioden (eine rote und eine grüne), die sich mithilfe des Transistors elektrisch ansteuern lassen.

sich der Fünf-Volt-Marke genähert. Aber weniger war nicht drin. Bekannt ist, dass sich die Spannung vor allem dann verringert, wenn man ein dünneres Dielektrikum verwendet. Doch in einer dünnen Isolierschicht machen sich Löcher und Fehlstellen sofort bemerkbar. Die Leistung des Transistors nimmt erheblich ab, weil der Elektronentransport gestört wird. Damit begann die Suche nach einem dünneren und zugleich dichten Dielektrikum.

Klauks Mitarbeiterin, Ute Zschieschang, hatte die zündende Idee. Frühere Versuche mit dünnen Dielektrika aus Alkylsilanen, länglichen Molekülen mit einer Silan-Ankergruppe, hatten gezeigt, dass Silane gut auf Silizium haften, aber nicht auf Aluminium. Zschieschang blätterte in Fachjournalen und fand heraus, dass Phosphonsäure-Ankergruppen wesentlich besser am Aluminium haften. Statt des Alkylsilans nahm Zschieschang jetzt Alkylphosphonsäure. Das zeigte Wirkung. Diese Moleküle ordneten sich wie die Borsten eines Schrubbers dicht an dicht auf der Gate-Elektrode an – zu einem hauchdünnen, dichten Dielektrikum von nur zwei Nanometer Dicke. Die Betriebsspannung sank auf unter zwei Volt!

Doch noch waren die Transistoren zu langsam, ihre Schaltfrequenz zu gering. Zwar benötigt das menschliche Auge nur 24 Bilder pro Sekunde, damit ein Film nicht flimmert und Einzelbilder zu einem Bilderfluss verschmelzen. Für einen Flachbildschirm reicht das aber längst nicht aus. Bei diesem wird ein Bild zeilenweise von oben nach unten aufgebaut, die Dioden Reihe für Reihe aktiviert. Ein großer Bildschirm bringt es leicht auf mehr als tausend Zeilen, die in rasender Geschwindigkeit an- und abgeschaltet werden müssen. Letztlich ist das nur möglich, wenn der





Transistor im Megahertz-Bereich schaltet, also etwa eine Million Mal pro Sekunde. Genau das aber konnten die organischen Transistoren lange nicht. Ein neuer Halbleiter musste her.

Eine ganze Zeit lang hatten Klauk und seine Mitarbeiter mit dem Standard-Halbleiter Pentacen experimentiert – einem aromatischen Kohlenwasserstoff-Gerüst. Doch Pentacen wird schnell von Luftsauerstoff angegriffen. Die Halbleiter-Eigenschaft ist damit schon nach wenigen Wochen perdu. 2007 stolperte Klauk über die Veröffentlichung von Forschern der Universität Hiroshima. Die hatten eine Art Pentacene-Zwilling synthetisiert, dem sie zusätzlich zwei Schwefelatome implantierten: das Halbleitermolekül Dinaphthothienothiophen, kurz DNTT.

## NEUER HALBLEITER MACHT ELEKTRONEN MOBIL

Das DNTT war ausgesprochen robust gegen Sauerstoffangriffe. Klauk stellte fest, dass das längst nicht alles war. Im Versuch zeigte sich, dass die Elektronen, die Ladungsträger, in diesem Halbleiter sehr viel mobiler sind – rund dreimal schneller als zuvor. Und das liegt vor allem daran, dass sich die DNTT-Moleküle feinsäuberlich in Reih und Glied anordnen. Doch bis zum Megahertz-Transistor sollte es noch dauern.

„Die Kunst liegt nicht nur darin, die richtigen Materialien zu wählen, sondern in der Gestaltung des gesamten Herstellungsprozesses“, sagt Klauk. In seinem Reinraum stehen mikrowellen-

große Heizschränke, allerlei andere mannshohe Geräte und einige Mikroskope. Eines der wichtigsten Werkzeuge ist die Vakuumanlage – ein schwarzer Kasten mit Reglern und Leuchtanzeigen. An der Seite hängt eine Art stählerne Käseglocke. Darin dampfen die Wissenschaftler ihren flexiblen Kunststofffolien Schicht für Schicht die organischen Transistoren auf.

Im Grunde, sagt Klauk, ist alles ganz einfach. Am Boden des Gefäßes werden nacheinander das Aluminium und die Kohlenwasserstoffe verdampft. Der Dampf wabert nach oben und kondensiert auf der Kunststoffolie. Eine hauchfein strukturierte Lochmaske, eine Schablone, steuert exakt, wo sich die Stoffe niederlassen. So wächst Schritt für Schritt die feine Transistor-Sandwich-Struktur. Doch nur mit langjähriger Erfahrung können die Forscher die Geräte so steuern, dass sich die Substanzen perfekt, dicht und wohlgeordnet auf der Kunststoffolie und übereinander ablagern. Ganz obenauf ruhen die Source- und Drain-Kontakte als eine Lage aus Gold.

„Ich glaube, dass wir wohl eines der wenigen Reinraumlaborare in Deutschland sind, die organische Halbleiter-substanzen so schnell und gründlich testen können“, sagt Klauk ganz selbstverständlich, ohne Eitelkeit. Gleich mehrere Industrieunternehmen und Forschungslabors schicken ihm regelmäßig Materialproben. „Wer weiß“, sagt Klauk lächelnd, „vielleicht sind wir ja diejenigen, die den perfekten Halbleiter für den flexiblen Monitor der Zukunft entdecken.“

Die Stuttgarter verarbeiten ihre organische Elektronik bei vergleichsweise moderaten Temperaturen – bei unter 100 Grad Celsius, manche Substanzen gar bei Raumtemperatur. Silizium hingegen wird bei mehreren Hundert Grad Celsius verarbeitet. Auch das ist ein Grund, warum es so schwierig ist, Silizium und flexible Substrate zu vereinen. Plastikfolien überleben die Hitze nicht. Beim Blick durch eine der Folien, die Klauks Team mit Transistoren und Schaltkreisen versehen hat, kann man kaum glauben, dass diese wirklich Strom leiten oder dosieren können. Sie sind so dünn, so unscheinbar und wirken wie eine gewöhnliche bedruckte Overheadfolie.

Doch sie haben es in sich. Zuletzt hat die Stuttgarter Forschungsgruppe den Sprung zum Megahertz-Takt geschafft – dank einer neuen Lochmaske. Bislang hatte Klauk das Kunststoffsubstrat beim Bedampfen stets mit einer Schablone abgedeckt, die ebenfalls aus Kunststoff gefertigt wird. In diese Negativform werden die feinen Transistormuster mit einem Laser computergesteuert eingeschnitten. Das übernimmt ein Spezialunternehmen. Doch der Lochmaskenkunststoff lässt sich nicht beliebig fein schneiden. Und damit war lange Zeit auch der Abstand zwischen Source- und Drain-Elektrode limitiert – kleiner als zehn Mikrometer ging es nicht. Doch die Transistoren schalten umso schneller, je dichter Source und Drain beieinanderliegen.

Lange wusste Klauk nicht, wie er den Spalt verengen sollte. Doch vor einiger Zeit lernte er das Stuttgarter Mikroelek-

linke Seite: In einem Verdampfer scheiden die Stuttgarter Forscher organische Halbleiter auf Overhead-Folie, aber auch auf Geldscheinen ab. Damit dabei die Strukturen von Transistoren entstehen, dampfen sie die Substanzen durch eine Lochmaske auf das Trägermaterial.

troniklabor IMS Chips kennen. Das ätzt Muster in einem hochpräzisen Plasmaprozess auf weniger als einen Mikrometer genau in die Membran-Schablonen. Source und Drain rücken so deutlich zusammen. Damit haben Klauk und seine Kollegen im vergangenen Jahr erstmals die Megahertz-Schaltfrequenz erreicht.

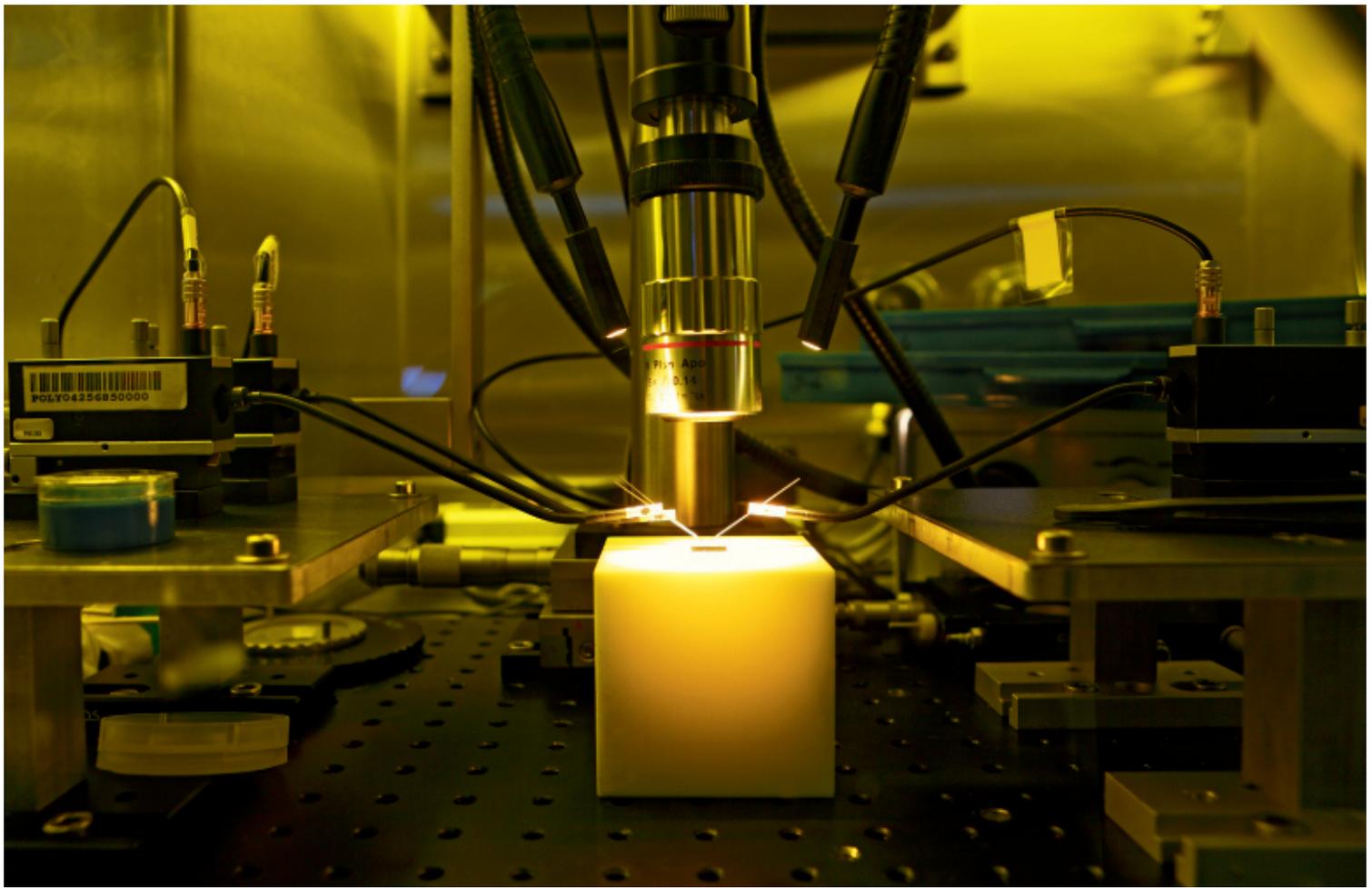
## TRANSISTOREN ÜBERLEBEN DEN BIEGESTRESS

Die organischen Transistoren aus Klauks Reinraum sind inzwischen recht ausgereift. Sie sind robust und vor allem ungeweicht flexibel. Vor einem Jahr sorgte sein Team mit Transistoren auf einem Fünf-Euro-Schein für Aufsehen. Plastik ist glatt. Geld nicht. Obwohl das Baumwollfasergewirk der Banknote rau ist, arbeiten die Transistoren überraschend gut. „Wir haben die kleinen Transistoren einzeln vermessen – mehr als 90 Prozent waren funktionstüchtig“, sagt Klauk.

Zusammen mit japanischen Forschern setzte er noch eins drauf. In einem Versuch knickten sie eine Folie scharf. „Um einen Zehntel-Millimeter-Radius“, sagt Klauk. Wenn man so will, um eine Rasierklinge. Die Transistoren überlebten auch diesen Biegestress. In dem gemeinsamen Fachartikel spekulierten die japanischen Kollegen bereits über mögliche Anwendungen. Eine solche Elektrofolie, sagen sie, könnte man zu einem hauchdünnen Katheter zusammenrollen, um damit direkt in den Adern den Blutzuckergehalt zu messen oder vielleicht sogar Viren aufzuspüren. >

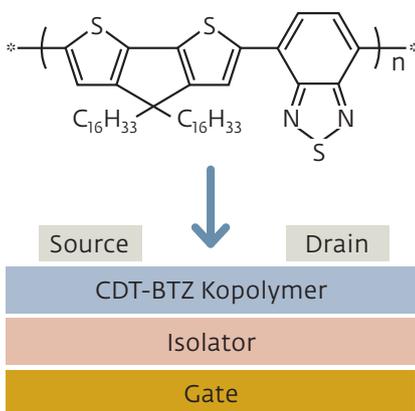


Ute Zschieschang und Hagen Klauk haben organische Halbleiter und ihre Verarbeitung so weiterentwickelt, dass sie daraus heute leistungsfähige elektronische Bauteile auf flexiblen und durchsichtigen Materialien herstellen können.



oben: Am Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz arbeiten Forscher mit ähnlichen Geräten wie ihre Kollegen in Stuttgart, allerdings untersuchen sie lange oder weitverzweigte Polymermoleküle als Ausgangsmaterialien preiswerter elektronischer Bauteile.

unten: Ein organischer Transistor funktioniert nach demselben Prinzip wie die etablierten Siliziumtransistoren: Über die Gate-Elektrode wird der Stromfluss zwischen den Source- und Drain-Elektroden gesteuert. Als Halbleiter verwenden die Mainzer Wissenschaftler etwa das Polymer CDT-BTZ.



An medizinische Anwendungen denkt auch Klaus Müllen, Direktor am Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz. Wie Klauk entwickelt Müllen unter anderem organische Feldeffekttransistoren. Als Synthesechemiker hat er es vor allem darauf abgesehen, das perfekte Molekül für den organischen Halbleiter der Zukunft zu kreieren. Die Stärke der organischen Elektronik, sagt Müllen, liegt darin, dass sie im Vergleich zum Silizium sehr günstig ist.

Statt in langwierigen Produktionsprozessen Siliziumstrukturen zu züchten, stellt man quasi im Reagenzglas organische Moleküle her. Diese Substanzen sollen sich einst wie mit einem Tintenstrahldrucker auf Plastikfolien drucken lassen. Erst dadurch würde diese Technik konkurrenzlos billig. „Mir schweben kleine kostengünstige Transistoren für RFID-Chips in Funketiketten vor, für Musik spielende Weihnachtspostkarten oder aber als billige Wegwerfsensoren für medizinische Tests“, sagt Müllen. Für Zuckerschnelltests zum Beispiel. So sei es denkbar, dass sich die Glukosemoleküle zwischen Source und Drain ablagern, was den Ladungstransport stören

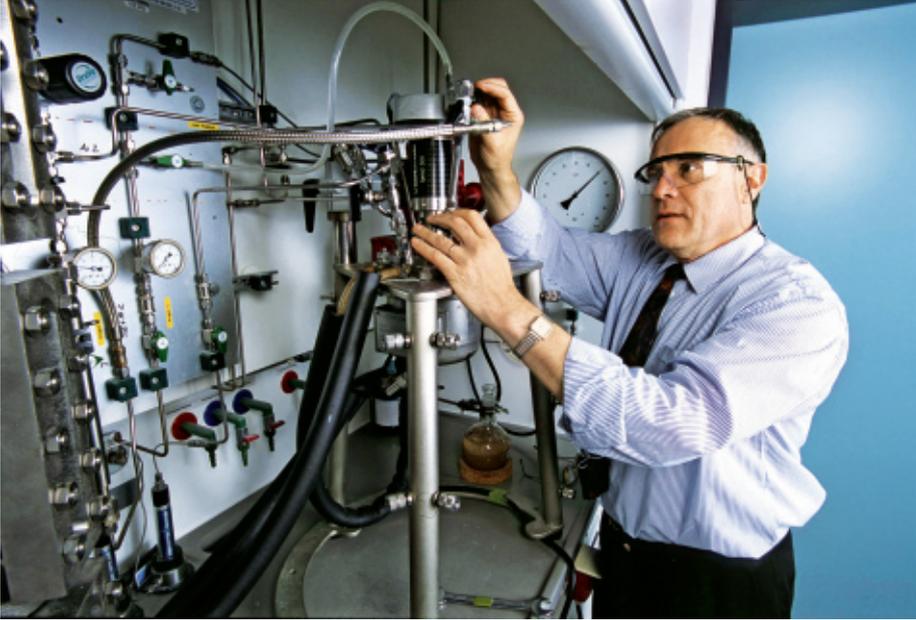
und einen Hinweis auf die Zuckerkonzentration im Blut liefern würde. „Erst mittelfristig dürfte sich die organische Elektronik im Highend-Bereich, etwa für Bildschirme, durchsetzen“, glaubt Müllen.

## WELTREKORD IN DER MOLEKÜLKETTE

Müllen hat sich in den vergangenen Jahren vor allem auf bestimmte organische Halbleitermoleküle konzentriert, die man ursprünglich als Material für Solarzellen angedacht hatte. Im vergangenen Jahr stellte er damit einen Weltrekord auf. Im Vergleich zu Klauks übersichtlicher Halbleitersubstanz DNNT sind Müllens Moleküle wahre Monster, riesige Molekülketten, sogenannte Polymere, in denen sich dieselben Molekülabschnitte vielfach wiederholen. Für Transistoren eignet sich besonders ein Kopolymer mit dem schwierigen Namen Cyclopentadithiophen-Benzothiazol oder kurz CDT-BTZ.

Diese Molekülketten vereinen zwei Eigenschaften. Sie verfügen über Abschnitte, die als sogenannter Donor fungieren, und Abschnitte mit Akzep-

Ein Pionier der Polymerelektronik: Klaus Müllen und seine Mitarbeiter synthetisieren in solchen Apparaturen Stoffe, aus denen in Zukunft Transistoren, Leuchtdioden und Solarzellen hergestellt werden könnten.



ten und zugleich flexibel sein. Noch leistet das keine organische Polymerelektronik der Welt. Müllen und Klauk wissen, dass noch ein gutes Stück Arbeit vor ihnen liegt. Wie viele Jahre, das kann keiner von beiden sagen. „Das aufrollbare Display aus organischen Dioden und Transistoren im Supermarktregal, das möchte ich aber noch erleben“, sagt Klauk und lacht. ◀

## GLOSSAR

### Aromaten

Chemische Verbindungen wie etwa Benzol. Sie besitzen meistens ein fast ebenes Kohlenstoffgerüst, das mindestens ein Ringsystem mit Einfach- und Doppelbindungen in abwechselnder Anordnung enthält. Wenn das System  $4n+2$  Doppelbindungselektronen ( $n$  ist eine ganze Zahl) aufweist, sind diese derart delokalisiert, dass Einfach- und Doppelbindung nicht mehr unterschieden werden können. Diese elektronische Struktur begünstigt den Ladungstransport.

### OLED

Organische Leuchtdiode, die aus halbleitenden Kohlenwasserstoffmolekülen aufgebaut ist und vorrangig bei der Herstellung von dünnen Displays zur Anwendung kommt. Sie ist kostengünstiger als die herkömmliche (anorganische) Leuchtdiode, die aus aufgedampftem Silizium besteht.

### Feldeffekttransistoren

sind unipolare Transistoren, bei denen nur ein Ladungstyp am Stromtransport beteiligt ist, also beispielsweise nur Elektronen von der Source- zur Drain-Elektrode fließen. Der Stromfluss wird über die an der Gate-Elektrode angelegte Spannung gesteuert. Ähnlich wie bei einem Ventil können dabei mehr oder weniger Elektronen durch den Halbleiter wandern. Sie werden vorwiegend aus hochreinen Halbleiterkristallen hergestellt.

### OFETs

Organische Feldeffekttransistoren, deren Halbleiter aus organischen Materialien aufgebaut ist. Verglichen mit herkömmlichen Feldeffekttransistoren sind die OFETs zwar kostengünstiger herstellbar, sie sind jedoch wesentlich empfindlicher gegenüber äußeren Einflüssen, was ihre Lebenszeit stark reduziert.

### RFID

steht für Radiofrequenz-Identifikation und erlaubt, Objekte, die mit RFID-Chips als Funketiketten markiert sind, automatisch zu identifizieren und zu lokalisieren. Damit kann die Datenerfassung, beispielsweise von Büchern in einer Bibliothek, wesentlich erleichtert werden.

toeigenschaften. Donoren geben Elektronen bevorzugt ab, Akzeptoren tendieren dazu, Elektronen aufzunehmen. Beide Eigenschaften im selben Molekül bewirken, dass Elektronen wie Wasseremier in einer Feuerwehrrkette flugs weitergereicht werden.

Bislang hatte man in derartigen Halbleitern verschiedene Substanzen mit Donor- und Akzeptoreigenschaften mischen müssen. Mit CDT-BTZ gibt es das jetzt im Kombipack. Das Ergebnis ist eindrucksvoll: Die Ladungsträger durchwandern das Material etwa dreimal schneller als bei den derzeit besten organischen Halbleitern und bei Klauks Transistoren. Weltrekord. „Allerdings mussten wir das ursprüngliche CDT-BTZ-Molekül in vielen Versuchen völlig umgestalten“, sagt Müllen. Er und seine Mitarbeiter veränderten die Seitenäste, die Molekülenden. „Es ist eine Mischung aus Erfahrung und Fantasie, die bei einer solchen Entwicklung zusammenkommen.“

Der Ladungstransport funktioniert auch deshalb so gut, weil sich die großen CDT-BTZ-Molekülketten wie Spaghetti in der Nudelpackung aneinanderschmiegen und so eine Art Renn-

strecke für die Ladungsträger bilden. Das tun sie aber nur, wenn sie richtig hergestellt werden.

Anders als Klauk dampft Müllen die Substanzen nicht im Vakuum auf. Er benetzt das Substrat mit einer Polymerlösung. Verdampft das Lösemittel, ordnen sich die Moleküle zur Halbleiterschicht an. Auch dafür braucht es einige Erfahrung. Die Moleküle dürfen nicht verklumpen. Sie müssen sich zu einer gleichmäßigen Schicht zusammenfinden. „Es kommt vor allem auf die ersten ein, zwei Moleküllagen an“, sagt Müllen, „wenn die nicht perfekt geordnet sind, kann keine funktionstüchtige Halbleiterschicht wachsen.“ Alles muss stimmen: die Temperatur, die Geschwindigkeit, mit der das Lösungsmittel verdampft. Und die Oberfläche muss extrem sauber sein.

Mit CDT-BTZ hat Müllen bereits ein beinahe perfektes Molekül synthetisiert. Und mit seinen Polymerlösungen kommt er dem Drucken schon recht nahe. Doch noch sind die Hürden hoch. Die druckfähige Polymer-Halbleitertinte der Zukunft darf nicht verlaufen, nicht schrumpfen und nicht zerbröseln. Sie muss perfekt auf dem Substrat haf-