



Farbige Lichtantennen: Die Lösungen in den Kolben enthalten Rylen-Farbstoffe, die in bestimmten Solarzellen Licht einfangen.

Kunststoffe mit leuchtender Zukunft

Solarzellen in der Zeltwand, transparente Leuchtfolien auf dem Fenster oder Mikrochips in der Jacke – solche Produkte verspricht die organische Elektronik.

Klaus Müllen und **Martin Baumgarten** suchen am **Max-Planck-Institut für Polymerforschung** chemische Verbindungen, die sich dafür eignen.

TEXT **CHRISTIAN BUCK**

Es ist ein wenig so, als würde der Gärtner auf einmal einen prima Bock abgeben. Jahrzehntlang verhinderten Kunststoffe in der Elektrotechnik, dass Strom fließt – nun aber gelten ausgerechnet sie als die Wegbereiter einer völlig neuen Art der Elektronik: der Polymerelektronik.

Heute beschränkt sich der Einsatz von Polymeren meist noch darauf, als Isolatoren vor elektrischen Schlägen zu schützen. Denn die meisten Kunststoffe leiten keinen Strom. Umso erstaunlicher, dass die gleiche Klasse chemischer Verbindungen in nicht allzu ferner Zukunft fast so revolutionäre Produkte liefern wird, wie sie die klassische Elektronik in den vergangenen Jahrzehnten hervorgebracht hat: Die Polymerelektronik verspricht in der Fotovoltaik, der Beleuchtungstechnik und im Chipdesign neue Lösungen – für die Industrie ergibt sich hier in den kommenden Jahren ein vielversprechender Markt.

Am Mainzer Max-Planck-Institut für Polymerforschung suchen rund 40 Wissenschaftler optimale Materialien für die neuen elektronischen Bauelemente. Ihr Ausgangsmaterial ist stets eine organische Substanz – also ein Molekül, das Kohlenstoff enthält. Diese Polymere bestehen aus elementaren Einheiten, die sich zu sehr großen Molekülen verbinden lassen. Solche Makromoleküle bilden nicht nur das Ausgangsmaterial für Plastiktüten oder Nylonstrümpfe, sondern begegnen uns auch überall in der Natur: Bei der Zellulose in Pflanzenzellen und dem verzwirbelten DNA-Molekül des Erbguts handelt es sich ebenfalls um Polymere. Seit Jahrzehnten beschäftigt sich die organische Chemie mit diesen Substanzen. Die Industrie nutzt sie gerne, weil sie Polymere relativ einfach herstellen und zu unzähligen Produkten verarbeiten kann.

Für die Mainzer Wissenschaftler ist vor allem eine Klasse von Polymeren interessant. „In der Polymerelektronik

verwenden wir ausschließlich konjugierte Moleküle“, erklärt Privatdozent Martin Baumgarten, der eine der beteiligten Arbeitsgruppen am Mainzer Max-Planck-Institut leitet. „Bei ihnen wechseln sich Einfach- und Doppelbindungen streng ab.“ Die Elektronen, die Doppelbindungen knüpfen, sind in konjugierten Polymeren nicht mehr zwischen zwei Atomen eingezwängt, sondern können sich im Molekül relativ frei bewegen – Chemiker nennen sie delokalisiert. Diese mobilen Elektronen machen das Polymer zu einem Halbleiter, der ganz ähnliche elektrische und optische Charakteristika zeigt wie etwa kristallines Silizium.

LEITENDE KUNSTSTOFFE

Ganz ähnlich wie in der klassischen anorganischen Elektronik muss das Ausgangsmaterial in manchen Fällen gezielt mit anderen Substanzen verunreinigt werden, bevor es die gewünschten Eigenschaften – etwa eine besonders hohe Leitfähigkeit – annimmt. Dotieren heißt dieser Prozess, bei dem sich p-Doping und n-Doping unterscheiden lassen. In der Praxis versetzen Chemiker ein Polymer beim p-Doping beispielsweise mit Jod, dessen Atome den Polymerketten jeweils ein Elektron entreißen. Im Elektronen-Gerüst des Polymers bleiben dann Löcher zurück. Diese Fehlstellen können sich in einem elektrischen Feld – wenn der Polymerfaden etwa die beiden Pole einer Spannungsquelle überbrückt – genauso bewegen wie positiv geladene Teilchen.

Beim n-Doping dagegen spenden etwa Metallatome dem Polymer ihre Elektronen. Die überschüssigen Elektronen in dem Polymer steigern wie die Löcher, die beim p-Doping entstehen, dessen Leitfähigkeit – und zwar dramatisch: Durch eine besonders starke Dotierung haben Wissenschaftler Polymere hergestellt, die Strom so gut leiteten wie Kupfer. Für die Entdeckung dieser organischen Metalle Ende der 1970er-Jahre bekamen Alan Heeger, Alan MacDiarmid und Hideki Shirakawa im Jahr 2000 den Nobelpreis für Chemie.

„Dem sprunghaften Anstieg der Leitfähigkeit folgte ein sprunghafter Anstieg des Interesses an diesem Gebiet“, erinnert sich Baumgarten. Denn nun war klar, dass sich die dotierten Polymere zu Transistoren, Solarzellen oder Leuchtdioden kombinieren lassen würden. Zwar gibt es solche Bauelemente bereits seit Jahrzehnten auf der Basis von Silizium und anderen anorganischen Halbleitern, aber die Polymere versprechen Produkte mit manchen Vorteilen. „Die Bauteile aus der organischen Elektronik sind leicht zu verarbeiten, flexibel, und ihre elektronischen Eigenschaften lassen sich durch das Moleküldesign in weiten Grenzen einstellen“, erklärt Klaus Müllen, Direktor am Max-Planck-Institut für Polymerforschung.

Dank dieser Qualitäten könnten Solarzellen in Zukunft beispielsweise in Kleidung Strom erzeugen, und organische Dioden könnten in aufrollbaren Bildschirmen oder elektronischem Papier leuchten. Denn im Gegensatz zu ihren Pendanten aus Silizium sind diese

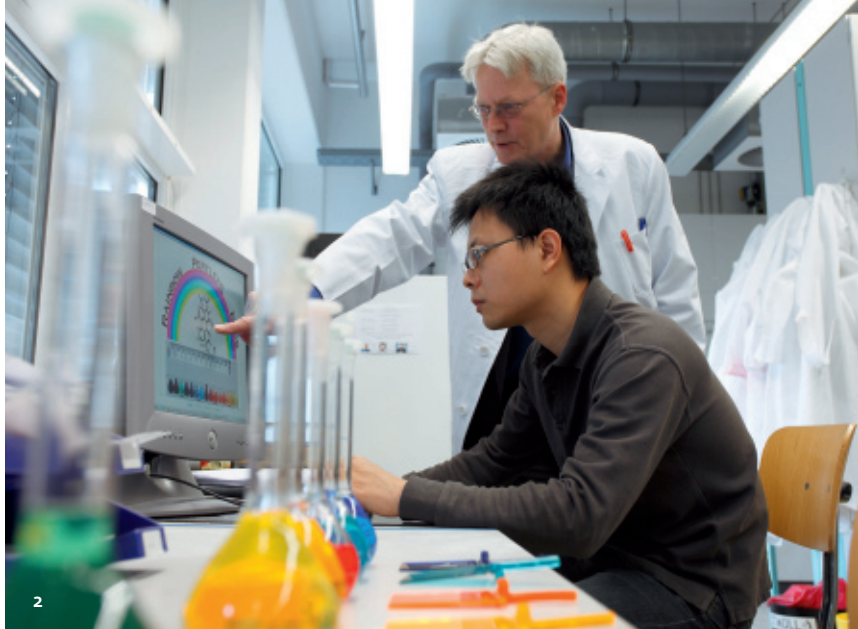
Bauelemente nicht starr und spröde, sondern überaus flexibel, weil sie aus dünnen Filmen auf einem elastischen Substrat – beispielsweise einer Folie – bestehen.

Vor allem vereinfachen organische Polymere die Produktion der Bauelemente: Sie werden schlicht in einem Lösungsmittel gelöst und beispielsweise mit einem Tintenstrahldrucker auf ein Trägermaterial aufgetragen. „Dazu kann man zwar kein herkömmliches Gerät aus dem Elektronik-Markt verwenden, aber die Technik ist schon lange bekannt, und speziell angepasste Geräte kann man problemlos kaufen“, erklärt Baumgarten. Im Gegensatz dazu lassen sich konventionelle elektronische Bauteile nur mit großem Aufwand fabrizieren: Aus dem extrem reinen Silizium züchten die Hersteller perfekte Einkristalle, die sie in mühevoll staubfrei gehaltenen Reinräumen in zahlreichen Schritten zum Endprodukt – etwa einer kristallinen Solarzelle – verarbeiten. Das kostet viel Energie und Geld.

Das Beispiel Solarzellen zeigt aber auch, warum sich die organische Elektronik noch nicht durchgesetzt hat. Zwar gibt es bereits Polymere, die als Farbstoffe Licht aufnehmen und seine Energie in Strom verwandeln. Doch sie erreichen derzeit nur einen schlechten Wirkungsgrad von maximal sechs Prozent – ungefähr der Wert, auf den Solarzellen aus amorphem Silizium kommen. Außerdem ist ihre Lebensdauer noch viel zu kurz: Sauerstoff und Feuchtigkeit setzen den empfindlichen Mole-

- 1 | Der Chef zeigt, wie es geht: Klaus Müllen justiert die Synthese-Apparatur.
- 2 | Molekulares Design: Martin Baumgarten und Chen Li diskutieren Variationen der Rylen-Farbstoffe.





külen zu und machen sie innerhalb weniger Monate unbrauchbar. „Um das zu verhindern, muss man die Farbstoffe entweder rigide einkapseln oder nach Molekülen suchen, die in Anwesenheit von Luft und Wasser stabiler sind“, erklärt Klaus Müllen.

AUF DER SUCHE NACH EINFACHEN VERFAHREN

Die Suche nach neuen Polymeren bildet einen der Schwerpunkte der Gruppe am Mainzer Institut. Dabei greifen die Wissenschaftler auf den in vielen Jahrzehnten gesammelten Erfahrungsschatz der organischen Chemie zurück. „Es gibt beispielsweise sehr viele Leitlinien dafür, welche Substituenten man in ein Molekül einführen muss, um seine Eigenschaften gezielt zu verändern“, sagt Müllen. „Und mithilfe von Computersimulationen können wir diese Modifikationen heute auch im Voraus berechnen.“ Trotzdem bleibt die effektive Synthese neuer Moleküle eine Herausforderung: „Die neuen Bausteine lassen sich im Labor anfangs nur mit hohem Aufwand herstellen“, sagt Baumgarten. „Wir arbeiten intensiv daran, diese Prozesse zu optimieren, denn die Industrie verlangt einfache Verfahren – wir streben für die Massenproduktion möglichst wenige Syntheseschritte an.“

In ihren Laboren bauen die Wissenschaftler neue Polymere auf, bestimmen deren Eigenschaften und fertigen mit ihnen organische Bauelemente. Unverzichtbar ist dafür eine Glovebox – ein allgegenwärtiges Requisite in Hol-

lywood-Filmen über „Killerviren“. Dieser Glaskasten ist mit reinem Stickstoff gefüllt, damit die Moleküle nicht mit dem Luftsauerstoff reagieren. Um darin zu arbeiten, greifen die Forscher in schwarze Gummihandschuhe, die in die Box hineinreichen, und stellen so etwa organische Transistoren her oder messen deren Schaltgeschwindigkeit. Parallel dazu untersuchen sie die Substanzen auch ohne die schützende Stickstoff-Atmosphäre und stellen so fest, ob der Sauerstoff die Polymere angreift.

Trotz vieler Fortschritte wird den Wissenschaftlern die theoretische und experimentelle Arbeit so schnell nicht ausgehen, denn die Kohlenstoff-Chemie liefert eine unvorstellbar große Anzahl von Molekülen. Daher schöpfen die Forscher aus einem schier unerschöpflichen Pool von Polymeren, um Materialien für die organische Elektronik maßzuschneidern. „Der unendlichen Vielfalt an möglichen Molekülen entspricht eine unendliche Vielfalt an Veröffentlichungen“, scherzt Baumgarten: „Alle Variationen werden intensiv erforscht.“ Allerdings gibt es inzwischen schon einige Standards – weit verbreitete Materialien für Solarzellen sind Poly-3-Hexylthiophene in Kombination mit Fulleren-Derivaten, in Leuchtdioden erzeugen Polyphenylene Licht, und speziell als blaue Lichtquelle dienen Polyfluorene.

Neben den riesigen Polymeren spielt derzeit eine andere Klasse organischer Moleküle eine wichtige Rolle: *small molecules*, also kleine konjugierte Mole-

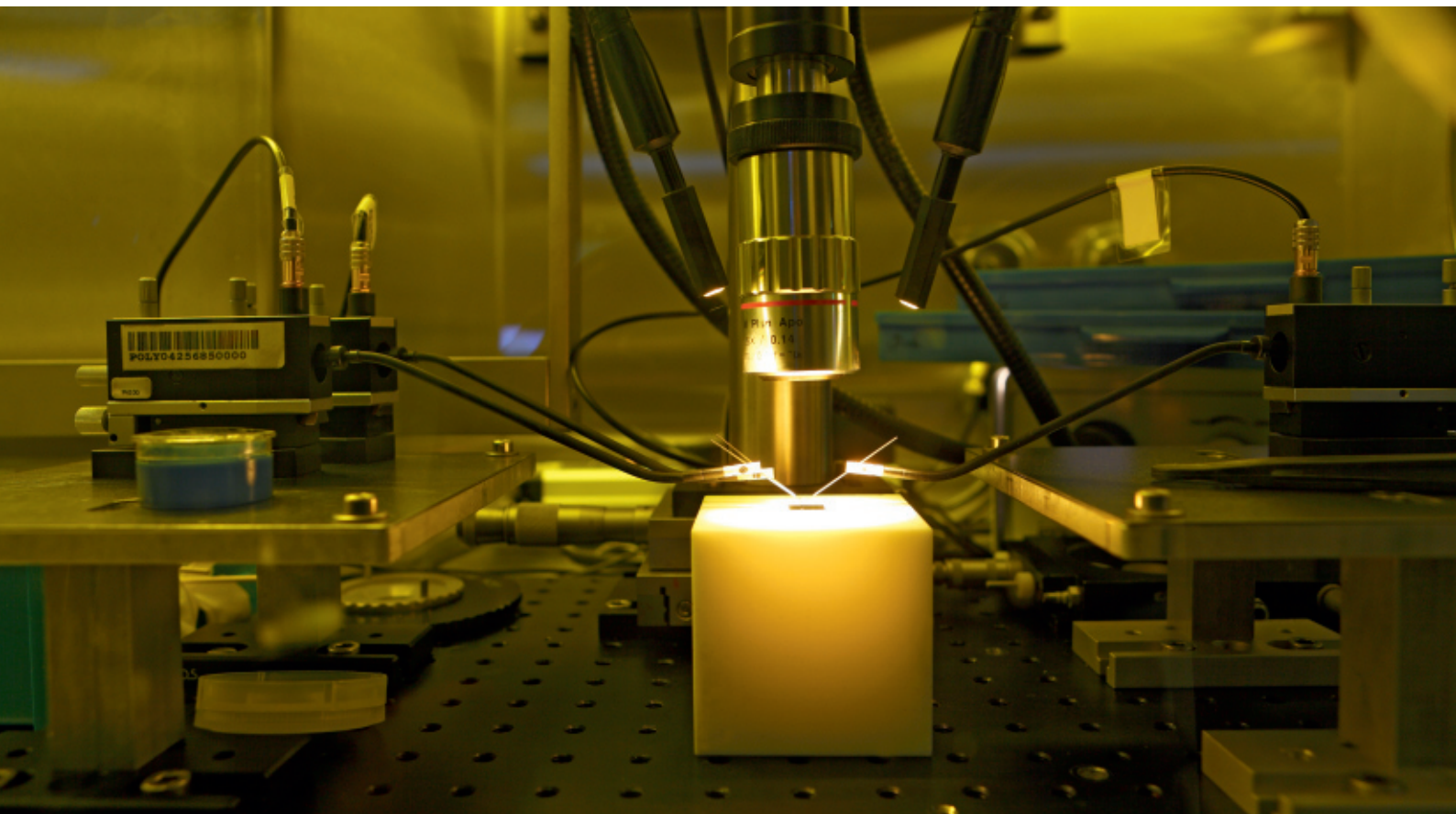
küle. Aus ihnen bestehen die organischen Leuchtdioden (OLEDs), die heute schon kommerziell vertrieben werden. Die kleinen Moleküle liefern sehr gute Farben, bilden aber in Lösung oft keine homogenen Filme, sodass sie sich nicht kostengünstig drucken lassen. Stattdessen werden sie im Hochvakuum auf das Substrat aufgedampft, was relativ teuer ist. „Heute kann niemand sagen, wer aus dem Wettbewerb zwischen Polymeren und kleinen Molekülen als Gewinner hervorgehen wird“, sagt Klaus Müllen. „Darum untersuchen wir beide Stoffklassen – schließlich wollen wir bei den Siegern sein.“

HALTBARE STOFFE FÜR BLAUE DIODEN

Gerade auf dem Gebiet der organischen Leuchtdioden hat das Mainzer Institut in jüngster Zeit wichtige Fortschritte erzielt. Besonders intensiv suchen die Wissenschaftler nach blauen Emittern, denn ohne sie funktioniert keine weiße Lichtquelle für Beleuchtungszwecke. Aber genau diese Substanzen bereiteten den Forschern in der Vergangenheit auch die größten Schwierigkeiten: „Bei den organischen Leuchtdioden bilden die blauen Emittter derzeit den Flaschenhals, weil sie relativ instabil sind“, erklärt Baumgarten. Während rote und grüne OLEDs schon auf beachtliche Lebensdauern kommen, halten ihre blauen Pendanten für die meisten Anwendungen noch nicht lang genug. Aber auch hier zeichnen sich Fortschritte ab: Baumgarten und seine Mitarbeiter



- oben | Arbeiten ohne Luft: In der Glovebox arbeiten die Mainzer Forscher unter reinem Stickstoff. Der Überdruck im Kasten stülpt die nicht verwendeten Handschuhe nach außen.
- unten | Ein Computer steuert Elektroden zu einer Platine, auf der die organischen Halbleiter der Mainzer Forscher aufgetragen sind. Auf diese Weise wird die Leitfähigkeit der Substanzen getestet.



haben unlängst zwei Stoffe identifiziert, die sich sehr gut als blau leuchtendes Diodenmaterial eignen.

Bei der ersten Verbindung handelt es sich um ein Dendrimmer – eine Art molekularen Baum: Um ihren Kern wachsen in verschiedene Richtungen ausladende molekulare Äste. Das Besondere daran: Nicht nur der Kern, sondern auch die Bausteine der Äste leuchten. Bislang sollten die Äste solcher Moleküle den Kern nur vor Berührungen mit Nachbarmolekülen schützen. Denn bei dem unerwünschten Kontakt verändert sich die Farbe des ausgestrahlten Lichts. Kern und Ästen Licht zu entlocken steigert die Lichtausbeute beträchtlich.

KONTAKT ZWISCHEN MOLEKÜLEN VERFÄLSCHT DIE FARBE

Die Effizienz der Dendrimere hat aber ihren Preis: „Das ist schöne Chemie, erfordert aber mehrere Syntheseschritte und somit einen beträchtlichen Aufwand“, erklärt Müllen. Als Alternative dazu entwickelten Baumgarten und seine Mitarbeiter einen blauen Leuchtstoff aus dem kettenförmigen Polypyrenylen. Dieses Polymer lässt sich leicht in einem Schritt produzieren, leuchtet allerdings nicht ganz so kräftig wie das Dendrimmer. Außerdem treten die Moleküle untereinander noch in farbverfälschenden Kontakt. Doch dafür haben die Max-Planck-Wissenschaftler schon eine Lösung gefunden: Sie mischen das leuchtende Polymer mit Polystrol, damit die Moleküle sich nicht gegenseitig in die Quere kommen.

Das Beispiel zeigt, dass die Eigenschaften der Bauelemente nicht ausschließlich von den verwendeten Molekülen abhängen – es kommt ebenso sehr auf deren nachbarschaftliche Beziehungen und die gegenseitige Ausrichtung an. Die Wissenschaftler sprechen hier von supramolekularen Phänomenen oder Morphologie. Für leistungsfähige Transistoren aus organischen Materialien kommt es beispielsweise darauf an, dass sich die Po-

lymere nicht kreuz und quer, sondern möglichst gleichmäßig anordnen – ganz ähnlich wie bei herkömmlichen elektronischen Bauelementen, in denen perfekt geordnete Einkristalle arbeiten. Nur dann wandern die Ladungsträger relativ ungestört durch das Material. Und je besser sich die Ladungsträger bewegen können, desto schneller lassen sich die Transistoren ein- und ausschalten.

„Während das Design maßgeschneiderter Moleküle noch relativ wenig Probleme bereitet, ist es sehr schwierig, die gewünschte supramolekulare Struktur zu erhalten“, berichtet Müllen. Um etwa den gegenseitigen Abstand und die Löslichkeit der Moleküle zu variieren, verändern die Wissenschaftler ihren Aufbau und damit ihre Wechselwirkungen, die etwa von Wasserstoffbrücken oder von elektrostatischen Kräften dominiert werden. Heften die Chemiker beispielsweise Alkyl- oder Phenyl-Alkyl-Gruppen an die Moleküle, lösen sich die Stoffe besser. Zudem halten die Anhängsel – je nach ihrer Größe – die Moleküle auf Distanz.

„Wir suchen einen Quasi-Kristall, in dem die Einzelmoleküle nah beieinander und hoch geordnet liegen“, so Müllen. Aber auch die Art des Substrats, auf das die Polymere aufgebracht werden, bestimmt deren Ausrichtung. Und schließlich nehmen die Chemiker auf die Ordnung der Moleküle Einfluss, indem sie mit unterschiedlich rasch verdampfenden Lösungsmitteln einen Film der organischen Verbindung erzeugen. Besonders interessieren sie dabei die Regionen an der Grenze verschiedener Materialien. So wird der Strom in einem organischen Transistor nur in einer schmalen Schicht unmittelbar über dem Trägermaterial transportiert. Daher müssen die Chemiker herausfinden, wie sich die Polymere in genau diesem Bereich ausrichten.

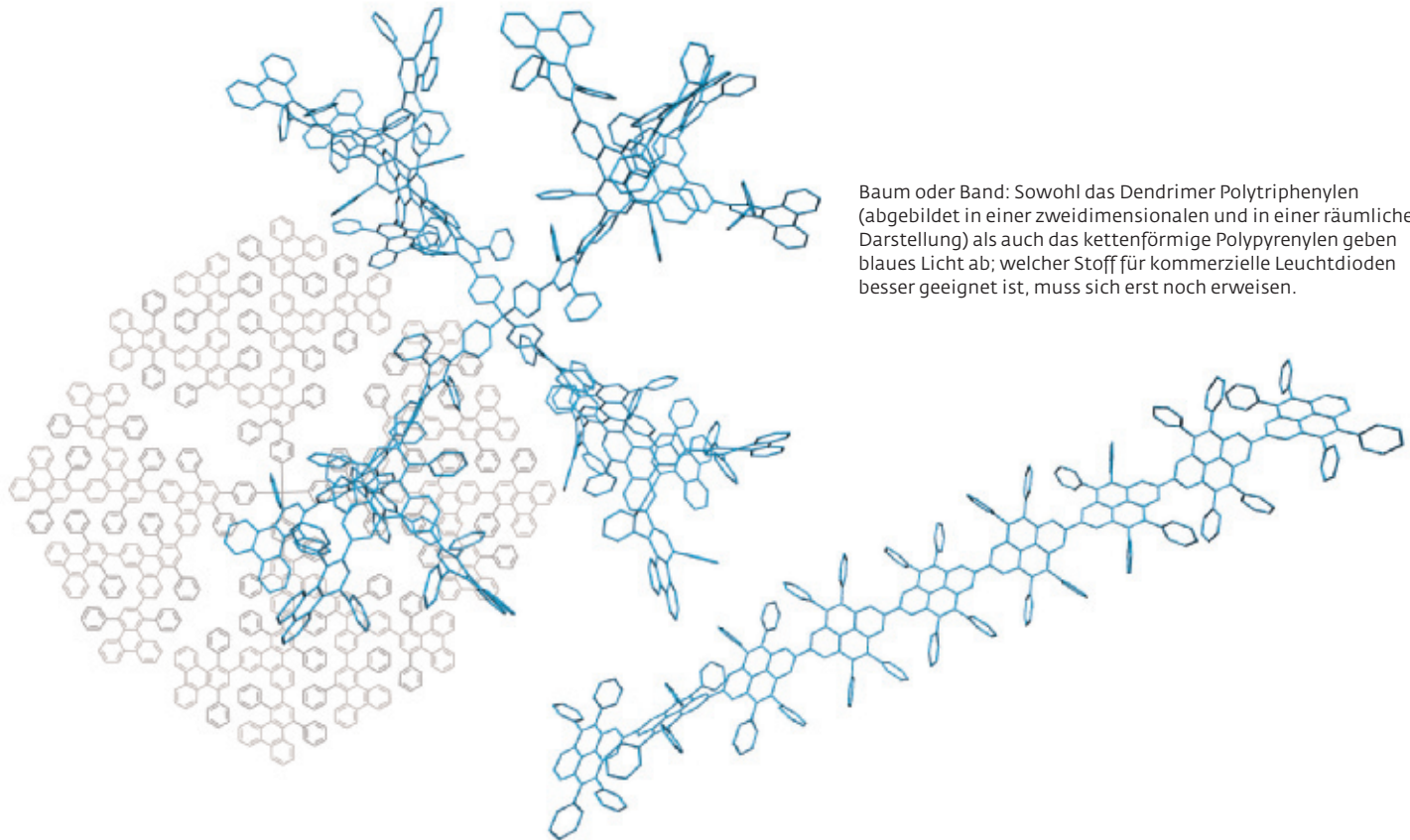
Bei den organischen Transistoren gelang den Wissenschaftlern kürzlich ein Durchbruch: Sie verwendeten ein Polymer, das den Baustein Benzothiadiazol enthält. Mit einer optimierten

Morphologie machten sie den Ladungsträgern Beine, was die Schaltgeschwindigkeit erhöhte und das On/Off-Verhältnis verbesserte. Mit dieser Kenngröße geben Elektrotechniker an, wie viel Strom im eingeschalteten und wie viel im ausgeschalteten Zustand fließt. Aber auch hier zeigen die Zahlen, wie weit der Abstand zur etablierten Silizium-Elektronik heute noch ist: Während der optimierte organische Transistor eine Schaltfrequenz von ungefähr 100 Kilohertz erreicht, schalten seine anorganischen Kollegen spielend mit vielen Gigahertz.

PREISWERTE SOLARZELLEN FÜR UNTERWEGS

Aber möglicherweise müssen organische Transistoren gar nicht zu den anorganischen aufschließen: „Man sollte organische und anorganische Elektronik nicht als Konkurrenten sehen“, sagt Müllen. Er kann sich auch ein relativ einträgliches Nebeneinander der beiden Bereiche vorstellen. „Die Erzeugung von elektrischem Strom auf Hausdächern könnte beispielsweise auch weiterhin eine Domäne von Solarzellen aus Silizium bleiben.“ Als Ergänzung dazu könnten Solarzellen aus organischen Materialien als mobile Stromquellen dienen – zum Beispiel integriert in Zeltwänden. „Die Möglichkeit, Elektrizität überall kostengünstig zu produzieren, könnte auch die Bildungschancen in abgelegenen Gebieten dramatisch erhöhen“, so Müllen. Einfache mobile Stromquellen würden nämlich auch in diesen Gegenden den Zugang zu elektronischen Medien erleichtern.

Die Industrie hat diese Chancen erkannt und beschäftigt sich intensiv mit dem Thema. „Studien gehen davon aus, dass im Jahr 2030 rund 300 Milliarden Euro mit Produkten aus organischer Elektronik umgesetzt werden“, sagt Karl-Heinrich Hahn, der beim Chemiekonzern BASF unter anderem für die Forschung im Bereich organische Elektronik zuständig ist. Allein im Jahr 2008 hat das Unternehmen mehr als 20 Mil-



Baum oder Band: Sowohl das Dendrimer Polytriphenylen (abgebildet in einer zweidimensionalen und in einer räumlichen Darstellung) als auch das kettenförmige Polypyrenylen geben blaues Licht ab; welcher Stoff für kommerzielle Leuchtdioden besser geeignet ist, muss sich erst noch erweisen.

lionen Euro für diese Forschung ausgegeben und beschäftigt rund 100 Mitarbeiter in dieser Sparte. Auch andere große Namen der europäischen Wirtschaft setzen auf die neue Technologie – darunter Merck, Bosch, Osram, Philips und Ciba. Weil das Thema die fächerübergreifende Zusammenarbeit verschiedener Disziplinen erfordert, entwickeln im Ludwigshafener Joint Innovation Lab (JIL) der BASF Chemiker, Physiker und Elektroingenieure gemeinsam neue Bauteile.

Mit dabei sind auch die Experten des Mainzer Max-Planck-Instituts. „Das Institut bietet viel Know-how bei konjugierten Polymeren, aber auch bei Farbstoffen“, so Hahn. „Davon und von den neuen Ideen der Wissenschaftler hat die BASF bei der Entwicklung der organischen Elektronik profitiert.“ Insbesondere die theoretischen Grundlagen müssten aber noch intensiv erforscht werden – hier können die Mainzer Wissenschaftler viele Erkenntnisse beisteuern, was immer wichtiger für die Produktion neuer Bauelemente wird. „Erste organische Leuchtdioden konnte man schnell durch reines Experimentieren herstellen“, sagt Hahn. „Bei blauen Lichtquellen versagt diese

Methode aber – hier braucht man unbedingt ein grundlegendes Verständnis, beispielsweise dafür, welche Prozesse zur Degradation der Bauelemente führen.“

FOLIEN, DIE WAHLWEISE STROM ODER LICHT ERZEUGEN

Und da scheinen Forschung und Industrie hierzulande auf dem richtigen Weg zu sein, denn bei der Entwicklung organischer Leuchtdioden, organischer Fotovoltaik und organischer Transistoren kann sich Deutschland mit Japan und den USA messen. Das ist gut für den Wirtschaftsstandort und vielversprechend für die Verbraucher: Denn wenn die organische Elektronik ihr Versprechen hält, kann sie zahlreiche neue Produkte liefern. So ermöglichen organische Leuchtdioden neue Fernsehgeräte, die nicht nur extrem flach und energiesparend sind, sondern auch brillante Bilder liefern, die denen heutiger LCD-Geräte deutlich überlegen sind – einen ersten Flachbildschirm dieser Art gibt es bereits.

Mit organischen Dioden ließen sich aber auch völlig neue Produkte schaffen: In dünnen und transparenten

Folien auf Fensterscheiben könnten sie tagsüber Sonnenlicht in Elektrizität umwandeln, während sie abends als flächige Lichtquellen den Raum erhellen. Und preiswerte Transistoren aus organischen Materialien könnten als Bausteine für intelligente Etiketten auf Produkten dienen, wofür Silizium viel zu teuer ist. Sollten sich diese Hoffnungen erfüllen, könnten Polymere in der Elektronik tatsächlich weit über ihre angestammte Nebenrolle als Isolatoren hinauswachsen. ◀

GLOSSAR

- Polymer**
ausladendes Molekül, in dem sich viele chemische Bausteine gleichen Typs mal als Kette, mal verzweigt aneinanderreihen.
- Dendrimer**
Polymer, in dem sich molekulare Äste von einem Kern aus verzweigen.
- Morphologie**
beschreibt, wie sich die Moleküle anordnen und welche Wechselwirkungen sie aufeinander ausüben.