

# Smarte Moleküle für die Elektronik

**MATERIALWISSENSCHAFTEN** An der Berliner Humboldt-Universität entwirft ein Team um den Chemiker Stefan Hecht funktionale Moleküle als vernetzbare Einheiten zum Aufbau steuerbarer, intelligenter Materialien. In Sachen molekulare Elektronik sind gut untersuchte Molekülmodelle und neue Konzepte gefragt.

Zwar hat die aktuelle Wirtschaftskrise auch Auswirkungen auf die Elektronikindustrie, jedoch: «Wir befinden uns im «Elektronikzeitalter», also wird die Branche sich auf Dauer in der Weltwirtschaft behaupten.» Das versicherte Walt Custer, Berater der Elektronikindustrie, bei der «IPC Executive Market & Technology Forum-Konferenz» vergangenen November in Singapur. Zurzeit liegt der Umsatz der Branche bei ca. 800 Mrd. Euro. Will sie sich weiterhin an der Spitze der produzierenden Industrien behaupten, sind vom allgemeinen wirtschaftlichen Aufschwung abgesehen langfristig neue Konzepte nötig, dank derer sich die Ziele «Leistungssteigerung» und «Kosteneffizienz» auch zukünftig vereinen lassen.

Das Erfolgsrezept bilden immer effizientere Design- und Fabrikationsmethoden. Da die Erzeugung von Nanostrukturen mittels Top-Down-Herstellungsvorgängen wie der Lithografie limitiert ist, werden in zahlreichen internationalen Forschungsgruppen derzeit die Grundlagen für eine «molekulare Elektronik» erarbeitet, die die ultimative Verkleinerung elektronischer Schaltkreise verspricht. Reproduzierbare Strukturen in Nanometerdimensionen sollen durch sich selbst organisierendes Wachstum erzeugt werden; organische Moleküle – auf dem Weg der chemischen Synthese preiswert in großen Mengen zugänglich – könnten als elektrische Drähte, Widerstände, Dioden, Gleichrichter, Schalter und Transistoren fungieren. Auch wenn mit Anwendungen frühestens in fünfzehn, zwanzig Jahren zu rechnen ist, die auf dem Trendgebiet aktiven Chemiker warten bereits mit immer neuen funktionalen Molekülnetzwerken und verblüffenden Nanomaschinen auf. Einer der kreativen Köpfe ist Stefan Hecht, Professor am Institut für Chemie der Berliner Humboldt-Universität. Wie viele seiner Kollegen (siehe auch CR 1-2/2009: «Moleküle unter der Fuchtel des Rastertunnelmikroskops»; CR 11/2006: «Elektronik verlangt Rokoko-Moleküle») beschäftigt er sich mit der Erzeugung und Untersuchung chemischer Strukturen auf der Nanometerskala. Diese werden in seinem knapp 20-köpfigen Team insbesondere in Zusammenarbeit mit der Gruppe des Experimentalphysikers Dr. Leonhard Grill von

der Freien Universität Berlin im Ultrahochvakuum auf festen Oberflächen realisiert und mit dem Rastertunnelmikroskop (scanning tunneling microscope, STM) untersucht.

## Kovalente Bindungen bevorzugt

Während die Konkurrenz meist auf supramolekulare Molekülverbände setzt, in denen die Moleküle über relativ schwache Wasserstoff- und andere Brückenbindungen zusammengehalten werden, verwendet Hecht vielfach molekulare Bausteine, die schon beim Aufbringen auf einen festen Träger – in der Gasphase, beim Verdampfen im Ultrahochvakuum – miteinander reagieren

die freien Mono- oder Polyradikalspezies (Moleküle mit ungepaarten Elektronen) daraufhin entweder geordnete Ketten oder zweidimensionale Netzwerke aus. «Aus den geringen Abmessungen der Porphyrine würde sich in einem solchen 2D-Netzwerk bereits eine Dichte von über 300 Milliarden Molekülen pro Quadratmillimeter ergeben», berechnet Hecht. Zum Vergleich: 2006 wurden auf Halbleitersubstraten Dichten von bis zu einer Million Transistoren pro Quadratmillimeter erreicht.

Allerdings wurde dabei auch die dritte Dimension, d.h. die Höhe, zum Stapeln benutzt, weshalb die Berliner Forscher ihre zweidimensionalen Netzwerke nun auch um

die dritte Dimension erweitern wollen. Eindimensionale Drähte aus Porphyrin- bzw. Fluoreneinheiten konnten mit der Methode ebenfalls bereits gefertigt werden.

## Molekulare Schalter auf Oberflächen

Ende Februar veröffentlichte die Berliner Gruppe im Wissenschaftsmagazin «Science» Ladungstransportmessungen an Polyfluoren-Nanodrähten. Dabei wurde eine auf einer Goldoberfläche adsorbierte Molekülkette an einem ihrer Enden mit der STM-Spitze kontaktiert und konnte anschließend schrittweise vertikal angehoben werden. Dies führt zu einer sukzessiven Ablösung der konjugierten

Fluoreneinheiten von der Auflagefläche, sodass sich mittels eines einzigen polymeren Moleküls unterschiedliche Drahtlängen bis 20 Nanometer einstellen ließen und der Tunnelstrom in Abhängigkeit vom vertikalen Abstand zwischen STM-Spitze und Substratoberfläche gemessen werden konnte.

Noch interessanter wird die Sache, wenn funktionale Moleküle – allen voran die grundlegenden Elemente logischer Operationen, nämlich Schalter – auf Oberflächen assembliert werden. Schaltbare Moleküle oder Molekülgruppen müssen mindestens zwei stabile bzw. langlebige Zustände auf-



Bild: Peiseler-Sutter

Professor Stefan Hecht, Humboldt-Universität Berlin.

und robuste, irreversible kovalente Bindungen untereinander ausbilden: die Voraussetzung für einen effizienten Ladungstransport. Oder er nutzt Moleküle, die sich nach der Abscheidung auf einer Oberfläche aus der dort eingenommenen, supramolekularen Anordnung heraus zur Reaktion bringen lassen, z.B. durch Erhitzen. Beispielsweise wurden die Brom-Kohlenstoff-Bindungen sublimierbarer Porphyrinderivate (bromierte Tetraphenylporphyrine) nach deren Verteilung auf einer Goldoberfläche thermisch gespalten. Je nach Anzahl und Positionen ihrer ursprünglichen Bromatome bildeten

weisen, die sich in wenigstens einer physikalischen Eigenschaft, z.B. der elektrischen Leitfähigkeit, unterscheiden und die sich mittels externer Stimuli kontrolliert und reversibel ineinander überführen lassen. So wie beim Aufbau von Molekülnetzwerken auf Oberflächen als Modellmoleküle gerne Porphyrinderivate verwendet werden, schwören die Chemiker in Sachen molekulare Schalter auf Azoverbindungen, die sich von dem einfachen Azobenzol ( $C_6H_5$ )- $N=N$ -( $C_6H_5$ ) ableiten. Da die Stickstoff-Doppelbindung nicht frei drehbar ist, können zwei geometrische Formen – cis- und trans-Azobenzol – unterschieden werden, je nachdem ob die Phenylringe auf der gleichen Seite (in cis-Stellung) oder auf gegenüberliegenden Seiten (trans) angeordnet sind. Die beiden physikochemisch unterschiedlichen Isomere lassen sich durch das Einstrahlen von Licht der geeigneten Wellenlänge, mittels tunnelnder Elektronen oder unter dem Einfluss elektrischer Felder ineinander umwandeln. Auch in der Natur kommen solche effiziente, sehr schnell ablaufende Fotoisomerisierungen vor; z.B. wird

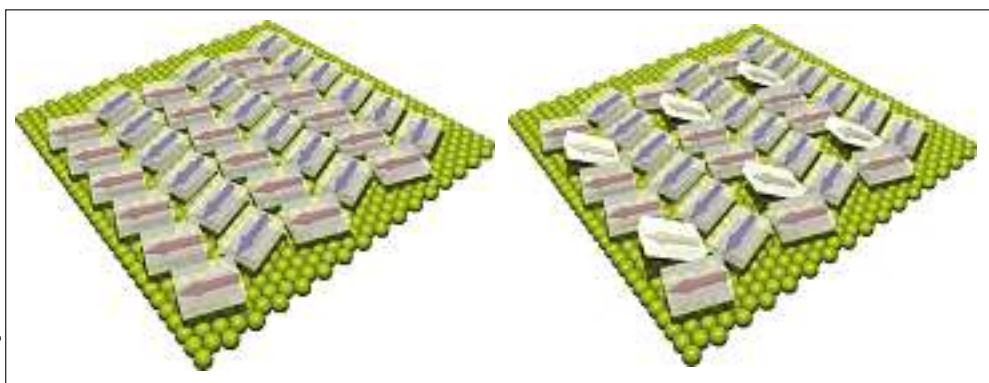


Bild: zvg

Isomerisierung von Azobenzol: vor (links) und nach (rechts) Anlegen eines Spannungsimpulses.

bei der Primärreaktion des Sehprozesses 11-cis-Retinal – ein Bestandteil des Sehpigments Rhodopsin – durch das auf die Netzhaut auftreffende Licht zu all-trans-Retinal isomerisiert.

Das Schalten funktionaler Moleküle in supramolekularen Netzwerken konnte bisher nur durch das knifflige Kontaktieren einzelner Moleküle mit der Spitze des Rasterkraftmikroskops erreicht werden. Den Forscherteams um Leonhard Grill und

Stefan Hecht gelang es Ende 2008, durch das Anlegen lokaler Spannungspulse an ein zweidimensionales Netzwerk aus massgeschneiderten 4-Methoxy-3,3',5,5'-tetra-tert-butylazobenzenen (M-TBA) auf einer Goldoberfläche nicht nur ein Molekül in der Schicht, sondern gleich mehrere davon örtlich kontrolliert und reversibel zu isomerisieren. Somit konnte erstmals eine Art Nano-Schaltmatrix aus periodisch angeordneten Schaltermolekülen erzeugt werden.



## KOMMUNIKATION KANN SO EINFACH SEIN



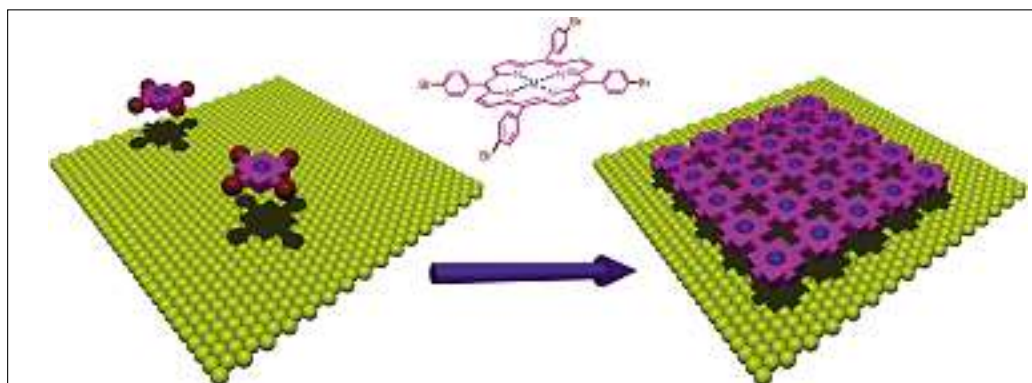
### Wir sprechen Ethernet. Und das bis in den Ex-Bereich.

Ein durchgängiger Standard ist immer besser als spezialisierte Insellösungen. Deshalb setzt Pepperl+Fuchs im Produktbereich Bedienen&Beobachten kompromisslos auf TCP/IP und Ethernet. Zum Beispiel mit VisuNet Remote, der PC-Bedienstation, für die selbst der Ex-Bereich kein Tabu ist. Sie ist nicht nur modular aufgebaut und damit individuell konfigurierbar. Sie erweitert auch das Ethernet bis in Bereiche der Kategorien II zG, II zD, Class 1 Division 2 hinein. Damit kostspielige proprietäre Lösungen endlich der Vergangenheit angehören und eine uneingeschränkt transparente Kommunikation möglich wird.

Es war eben schon immer ein Vorteil, mit den richtigen Experten zusammenzuarbeiten.

Pepperl+Fuchs AG · Sägeweg 7 · 2557 Studen BE  
Tel. +41 32 374 7680 · Fax +41 32 374 76 78  
E-Mail: pa-info@ch.pepperl-fuchs.com

 **PEPPERL+FUCHS**  
PROTECTING YOUR PROCESS



**Bildung eines Netzwerks von Porphyrinderivaten.**

Eine solche «Ketten-, besser Flächenreaktion», ist für die molekulare Elektronik und auch für die Entwicklung neuer Speichermedien von grosser Bedeutung. «Der Kniff liegt im Anbringen der Methoxygruppe, durch die sich die molekulare Selbstorganisation beeinflussen lässt – fehlt diese wie in TBA-Molekülen, erfolgt der Schaltprozess auf der Oberfläche ohne jegliche örtliche Präferenz», verrät Hecht.

**Reproduzierbare Schaltmuster**

Die Erfinder der neuen Schaltmatrix haben inzwischen eine Erklärung für das unerwartete, jedoch keineswegs willkürliche, sondern reproduzierbare Schaltmuster; in einem Experiment konnte im Bereich von «Inseln» z.B. jedes dritte Molekül innerhalb einer Molekülreihe und jedes zweite Molekül über die Molekülreihen hinweg isomisiert werden. «Damit die Azobenzole überhaupt schalten, sind die vier sperrigen tert-Butyl-Gruppen nötig, die die elektronische

Kopplung zwischen der Azo-Gruppe und dem Goldsubstrat reduzieren. Es gibt aber wohl nach wie vor elektronische Wechselwirkungen zwischen den Molekülen und dem Substrat. Wir vermuten, dass es darauf ankommt, an welchem Ort ein TBA-Molekül im Vergleich zum Kristallgitter der Substratoberfläche sitzt, ob es durch einen Spannungsimpuls an einer definierten Stelle geschaltet wird oder nicht. Dabei gibt es Positionen, die sich ähneln

und darum gleich verhalten – ein klassischer Fall von Kommensurabilität», so der Chemiker. Derzeit ist das Team mit ergänzenden Experimenten beschäftigt, die die Erklärung untermauern sollen; z.B. werden die M-TBA-Strukturen statt auf Gold- auf Silberoberflächen assembliert. Infolge der unterschiedlichen Gitterkonstante des Substrats sollten sich beim Schalten andere Periodizitäten ergeben.

*Beate Peiseler-Sutter*



M H W I M M O A G

Im Industrie- und Gewerbepark in der steuergünstigen, zentral gelegenen Gemeinde Freienbach SZ an der Wolleraustrasse 15 in 8807 Freienbach sind **diverse Gebäude per 01.07.2009 neu**

**zu vermieten**

Sie decken in besonderer Art die Bedürfnisse für:

- **technische oder kaufmännische Büros**
- **Labors, Räume für Forschung und Entwicklung**
- **Hallen und Lagerräume mit z.T. gedeckten Andockstellen**
- **Produktions-, Montage- oder Verkaufsräume ab.**

Weitere Informationen finden Sie unter [www.mhw-immo.ch](http://www.mhw-immo.ch) oder in unseren detaillierten Dokumentationen. Herr Heiner Reichmuth wird Ihre Anfrage gerne bearbeiten und Ihnen für Auskünfte zur Verfügung stehen:

**Telefon 055 416 20 20**  
**info@mhw-immo.ch**

**INDUSTRIE- UND GEWERBEPARK**

MHW Immo AG      Telefon 055 416 20 20  
Wolleraustrasse 15      Telefax 055 416 20 29  
Postfach 236      www.mhw-immo.ch  
CH-8807 Freienbach      info@mhw-immo.ch

**IST-EDELSTAHL-Anlagenbau AG**  
**CH-3645 Thun-Gwatt**

www.istinox.ch  
E-Mail: [ist@istinox.ch](mailto:ist@istinox.ch)  
Tel. +41 (0) 33 334 26 00  
Fax +41 (0) 33 336 72 66



Kompetenz in Edelstahl

**Druckgeräterichtlinie 97/23/EG**

- Druckbehälter**
- Lösungsmittelbehälter nach T1d**
- Kolonnen**
- Autoklaven**
- Rohrleitungssysteme**

