

STEFAN HECHT

Maßgeschneiderte Moleküle für die Nanowissenschaften

Laboratorium für Organische Chemie und funktionale Materialien

Die Arbeitsgruppe entwickelt innovative chemische Ansätze und Konzepte für die Nano- und Materialwissenschaften. Schlüssel hierfür ist das Design diverser Moleküle, die als winzige Bausteine zur Erzeugung von funktionalen Strukturen im Nanometerbereich dienen, sowie deren Herstellung und Optimierung mit Hilfe moderner organischer Synthesemethoden. Das Maßschneidern dieser molekularen Bausteine und ihre anschließende Organisation in funktionale Einheiten eröffnen neue Möglichkeiten von der Realisierung miniaturisierter optoelektronischer Bauelemente bis zur Generierung »intelligenter« Materialien.

Allgemeine Einführung

Naturwissenschaftler haben in den vergangenen Jahrzehnten gelernt, Materie auf immer kleineren Größenskalen bis hin zu einzelnen Atomen und Molekülen zu erkunden, sichtbar zu machen und zu manipulieren. Aufbauend auf diesem enormen wissenschaftlichen und technologischen Fortschritt und getrieben durch die fortschreitende Miniaturisierung von Bauelementen in der Mikroelektronik bemühen sich Chemiker und Physiker, Funktionen im Bereich weniger Nanometer (ein Nanometer entspricht einem Milliardstel Meter) zu erzeugen und zu verstehen. Hierzu werden maßgeschneiderte molekulare Bausteine mit spezifischen Eigenschaften benötigt und nach einer Art Baukastenprinzip in definierte Strukturen organisiert, die dann bestimmte Funktionen im Nanometerbereich ausüben sollen. Die Innovation liegt dabei zunächst im Design verschiedenster Moleküle mit neuen und verbesserten Eigenschaften,

Internet

<http://www.hechtlab.de>



Stefan Hecht, Ph.D., Professor für Organische Chemie am Institut für Chemie der Humboldt-Universität zu Berlin.

die mit Hilfe moderner organischer Synthesemethoden hergestellt werden. Nach deren Testung im Experiment – häufig in interdisziplinärer Zusammenarbeit mit Physikern – muss die Struktur der Moleküle in vielen Fällen weiter optimiert werden. Es ist vor allem die schöpferisch-kreative Komponente, ein artifizielles System mit einer gewünschten Funktion auf molekularer Ebene zunächst zu entwerfen, dann auch wirklich herzustellen und im Verlauf weiter zu entwickeln, die diese Art wissenschaftlichen Arbeitens motiviert. Der Leitgedanke

Chemical Approaches to Nanoscience

Organic synthesis enables the precise generation of functional molecular building blocks and constitutes the basis of chemical approaches and concepts that our group is developing to address various aspects of the nano and materials sciences. We are devoted to the design of custom-tailored molecular nano-objects and their integration into functional nanosized structures, which will be the key to the future bottom-up fabrication of miniaturized devices and the creation of new responsive »smart« materials.

der Arbeiten wird wohl am gelungensten durch ein Zitat des berühmten Physikers (!) Richard Feynman beschrieben: »What I cannot create, I do not understand«.

Forschungsprojekte

Aufbauend auf diesem Forschungsansatz werden in der Arbeitsgruppe um Stefan Hecht verschiedenste Projekte verfolgt, mit dem Ziel komplexe Funktionen auf kleinstem Raum zu realisieren. Diese beschäftigen sich zum einen mit der Entwicklung molekularer Schaltkreise für die Elektronik der Zukunft und zum anderen mit der Nutzung von Licht zum Antreiben und zur Kontrolle von diversen Prozessen, die zur Realisierung sogenannter »intelligenter« Materialien dienen sollen. Im Folgenden sollen einige Projektbereiche kurz näher dargestellt werden.

■ Makromoleküle für die direkte Umwandlung von Licht in mechanische Energie

Während die Natur Lichtenergie zunächst in der Photosynthese in Kohlenhydrate überführt und diese dann als Treibstoff für diverse Prozesse, u.a. für Bewegung, nutzt, soll in diesem Projekt Licht direkt in mechanische Energie umgewandelt werden. Hierzu werden zunächst Makromoleküle entworfen, in die photoempfindliche Einheiten (Azobenzolmoleküle) eingebaut werden und die bei Belichtung möglichst stark ihre Form verändern. Es werden hierbei zwei Konzepte verfolgt: Zum einen molekulare Federn auf Basis von Helixmolekülen, sogenannten Foldameren, die sich bei Bestrahlung stark ausdehnen (Abb. 1), und zum anderen starre Stäbchen, die sich bei Beleuchtung aufgrund von Scharnierbewegungen in ihren Gelenken stark zusammensziehen. Die Übersetzung der so erzielten molekularen Bewegung in eine »Photomechanik« auf der makroskopischen Ebene stellt zugleich Motivation und Herausforderung zukünftiger Aktivitäten in diesem Bereich dar.

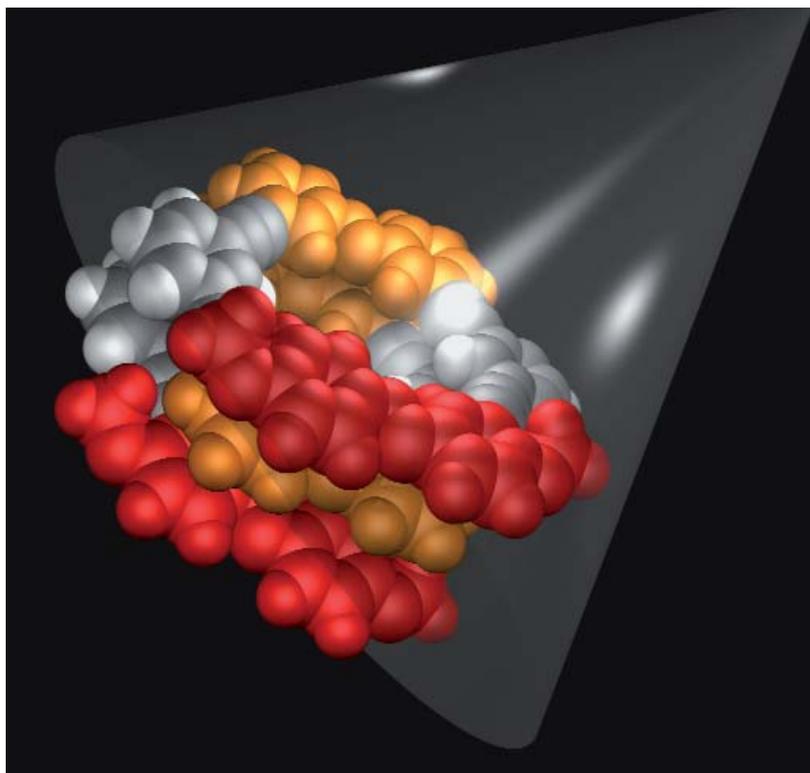


Abb. 1
Molekulare Feder im Fokus: Durch Bestrahlung dehnt sich das gezeigte Helixmolekül stark aus und wandelt dabei Lichtenergie direkt in Bewegung um. Photoschaltbare Einheiten basierend auf Azobenzolen (in Orange bzw. Rot) fungieren dabei als die lichtempfindlichen Komponenten. Ziel ist es, Makromoleküle zu entwerfen und herzustellen, die bereits bei geringer Belichtung einer besonders großen Veränderung ihrer Gestalt unterliegen und somit eine effiziente »Photomechanik« ermöglichen.

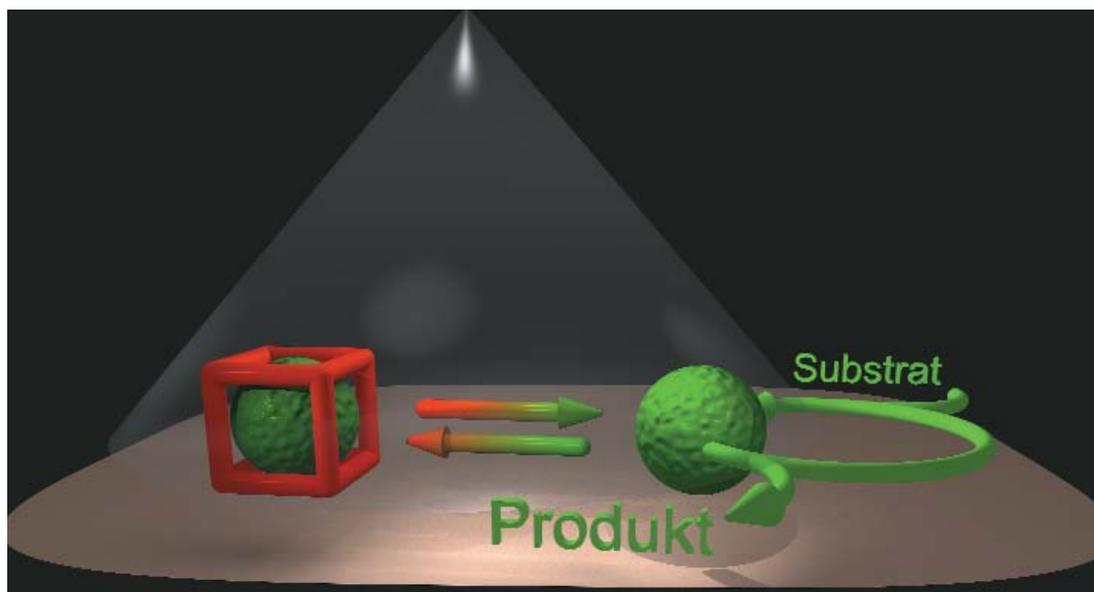
■ Katalysatoren mit integrierter Fernsteuerung

Eine Vielzahl chemischer Prozesse wird erst durch die Verwendung von Katalysatoren ermöglicht. Es wäre jedoch wünschenswert, wenn man die Aktivität (und Selektivität) dieser synthetischen Werkzeuge von außen steuern könnte, um sie gezielt an- und auszuschalten. Um eine solche externe Kontrolle zu erreichen, werden in verschiedenen Projekten diverse Photoschalter in die Katalysatormoleküle integriert. In Folge dient Licht als Stimulus, der selektiv entweder den aktiven oder den inaktiven Zustand des Katalysators auswählt – eine Art fernge-

Abb. 2

Ferngesteuerte Katalysatoren:

Mit Hilfe von Licht kann ein Katalysator zwischen zwei Formen – einer inaktiven quasi »eingesparten« Form (links) und einer aktiven Form, die Substratmoleküle in Produktmoleküle überführen kann (rechts) – hin- und hergeschaltet werden. Somit können sowohl der Ort als auch die Zeit einer chemischen Umsetzung von außen exakt gesteuert werden.



steuerter Katalysator (Abb. 2) entsteht. Ziel ist es, den somit erreichbaren zeitlichen und räumlichen Einfluss auf katalysierte chemische Reaktionen zu nutzen, um beispielsweise den Verlauf und den Ort von Polymerisationen präzise zu kontrollieren.

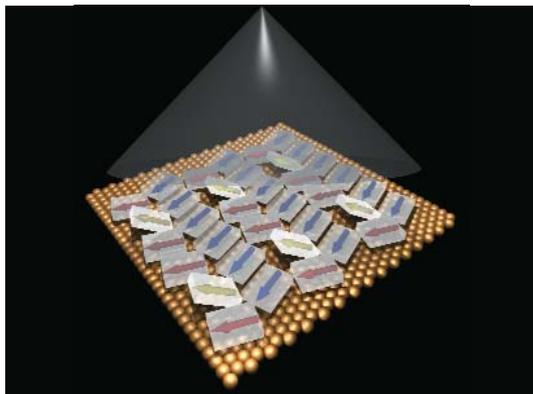
■ Periodische Nanostrukturen auf Oberflächen

Die fortschreitende Verkleinerung von elektronischen Bauelementen durch Weiterentwicklung photolithographischer, sogenannter »top down« Verfahren erreicht aufgrund der Wellenlänge des

eingesetzten Lichtes ihre physikalischen Grenzen. Um noch kleinere Strukturen zu realisieren, müssen daher konzeptionell neue und effiziente Methoden entwickelt werden. Bei der Untersuchung von Photoschaltermolekülen auf Oberflächen konnten Schaltprozesse nicht nur über große Distanzen ausgelöst werden, sondern in einer bestimmten Azobenzolverbindung konnte der Ort präzise durch die molekulare Anordnung gesteuert werden. Somit ist es nun möglich, durch einen parallelen Multischaltprozess periodische Nanostrukturen, ähnlich einer Schaltmatrix (Abb. 3), zu erzeugen. Diese könnten in Zukunft zur »bottom up« Strukturierung von Oberflächen auf der Skala weniger Nanometer dienen.

Abb. 3

Schaltmatrix: In einer Monoschicht von Schaltermolekülen auf einer Goldoberfläche erfolgen die Schaltvorgänge nur in bestimmten Positionen in einer periodischen Anordnung. In dieser Matrix schaltet jedes dritte Azobenzolmolekül in jeder zweiten Reihe (mit gelbem Pfeil) und kann selektiv entfernt werden. Somit ist es prinzipiell möglich, Oberflächen auf der Skala von wenigen Nanometern zu strukturieren. Diese Arbeiten wurden in Zusammenarbeit mit Dr. Leonhard Grill (FHI) durchgeführt.



■ Drähte und Schalter für die Einzelmolekülelektronik

Die ultimative Verkleinerung von elektronischen Bauelementen ist durch Verwendung einzelner Moleküle als Drähte und Schalter vorstellbar. Allerdings stellt die Realisierung dieses Traumes einer »molekularen Elektronik« eine enorme wissenschaftliche und technologische Herausforderung

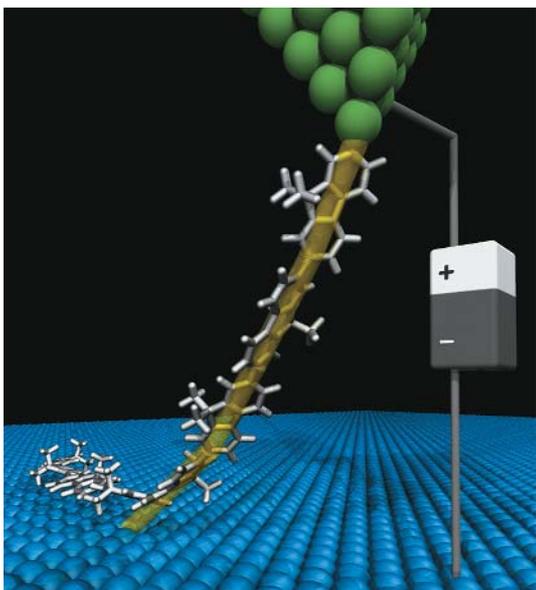


Abb. 4
Drähte aus einzelnen Molekülen: Ein einzelnes Polyfluorenmolekül (im Stäbchenmodell) wird mit Hilfe der Spitze eines Rastertunnelmikroskops (grün) hochgezogen und der Stromfluss durch das Drahtmolekül in Abhängigkeit seiner Länge gemessen. Grundlage dieser Arbeiten ist die von uns entwickelte Methode zur Herstellung kovalent verknüpfter Nanostrukturen direkt auf Oberflächen. Mit Hilfe dieser Methode werden derzeit erste Prototypen molekularer Schaltkreise entwickelt. Diese Arbeiten wurden in Zusammenarbeit mit Dr. Leonhard Grill (FHI) durchgeführt.

dar. Dank einer eher zufälligen Entdeckung konnte in der Zusammenarbeit mit Physikern um Leonhard Grill eine Methode entwickelt werden, bei der kleine Monomerbausteine direkt auf einer Oberfläche kovalent zu Polymerketten verknüpft werden. Diese Ketten können als molekulare Drähte fungieren, deren Leitfähigkeit direkt auf Einzelmolekülniveau getestet werden kann (Abb. 4). Aufbauend auf dieser Methode werden nun, u.a. durch den Einbau von Schaltermolekülen, komplexere molekulare Schaltkreise für erste Prototypen künftiger Molekül-Chips aufgebaut.

Ausgewählte Publikationen

- Photoschaltbare Helices: *Angew. Chem. Int. Ed.* 50, 1640 (2011).

Kooperationen

- Dr. Leonhard Grill (Fritz-Haber-Institut, Berlin): Tieftemperatur-Rastertunnelmikroskopie im Ultrahochvakuum
- Prof. Norbert Koch (Institut für Physik der HU Berlin): Photoelektronenspektroskopie
- Prof. Christian Limberg (Institut für Chemie der HU Berlin): Koordinationschemie
- Prof. Jürgen P. Rabe (Institut für Physik der HU Berlin): Rastertunnelmikroskopie an der Fest-Flüssig-Grenzfläche
- Prof. Peter Saalfrank (Institut für Chemie der Universität Potsdam): Quantenchemische Rechnungen
- Prof. Paolo Samorì (Institut de Science et d'Ingénierie Supramoléculaires, Strasbourg): Herstellung und Charakterisierung von Transistoren, Rastertunnelmikroskopie an der Fest-Flüssig-Grenzfläche
- Prof. Petra Tegeder (Fachbereich für Physik der FU Berlin): Optische Spektroskopie an Oberflächen
- Prof. Andreas Thünemann und Dr. Steffen Weidner (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin): Röntgenkleinwinkelstreuung bzw. Massenspektrometrie.

- Photoschaltbare Katalysatoren: *Angew. Chem. Int. Ed.* 47, 5968 (2008).
- Schaltmatrix: *Nat. Nanotechnol.* 3, 649 (2008).
- Molekulare Drähte: *Science* 323, 1193 (2009).
- Kovalente Nanostrukturen: *Nat. Nanotechnol.* 2, 687 (2007).

Prof. Stefan Hecht, Ph.D.

Jg. 1974. Seit Oktober 2006 ist Stefan Hecht Inhaber des Lehrstuhls für Organische Chemie und funktionale Materialien am Institut für Chemie der Humboldt-Universität zu Berlin. Nach seinem Chemiestudium an der Humboldt-Universität promovierte er an der University of California in Berkeley. Als Sofja Kovalevskaja-Preisträger der Alexander von Humboldt-Stiftung baute er zunächst seine Nachwuchsgruppe an der Freien Universität Berlin auf (2001–2004) und war im Anschluss als Gruppenleiter am Max-Planck-Institut für Kohlenforschung in Mülheim an der Ruhr tätig. Für seine Arbeiten wurde er u.a. mit dem MIT Technology Review Top 100 Young Innovator Award (2004), dem ADUC-Jahrespreis für Habilitanden der Gesellschaft Deutscher Chemiker (2005) und mit dem Klung-Wilhelmy-Weberbank-Preis (2010) ausgezeichnet.

Humboldt-Universität zu Berlin • Institut für Chemie

E-Mail: sh@chemie.hu-berlin.de • <http://www.hechtlab.de>