

Chemie mesoskopischer Systeme

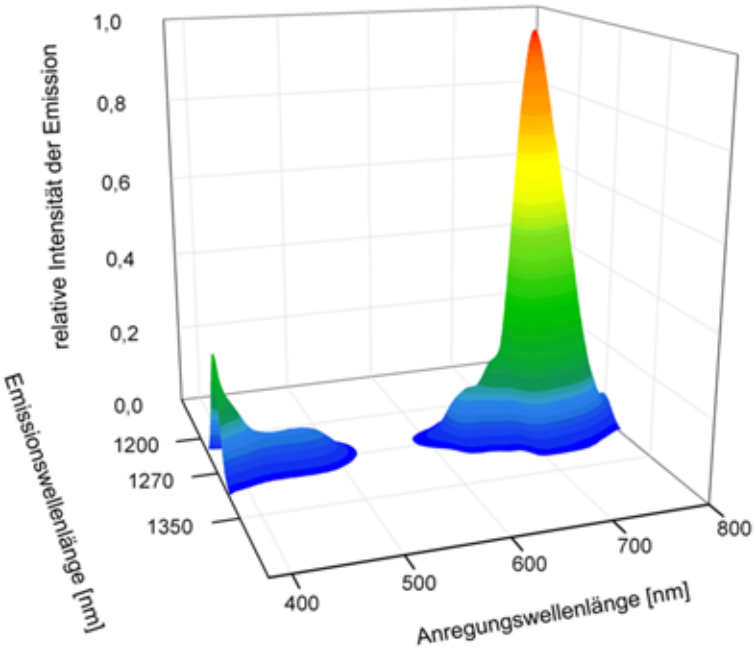
Wie Licht die Zähne putzt, Tumore tötet und Elektronen in „Optischen Computern“ durch Nanodrähte treibt

Die Ideen sind faszinierend: Licht wird umgewandelt in „chemische Energie“, regt Luftsauerstoff zu chemischen Wechselwirkungen an, so dass Krebszellen durch Oxidation zerstört oder bakterieller Zahnbefall entfernt werden. Oder aber das Licht erzeugt in Molekülsystemen, die aus starren Kohlenstoffstäbchen aufgebaut sind, eine elektrische Spannung, so dass die Stäbchen zu elektrisch leitenden Nanodrähten werden. Schaltprozesse wie jene im Computer werden auf diese Weise um ein Vielfaches schneller, elektronische Bauteile wie Transistoren lassen sich deutlich miniaturisieren und flexibler produzieren. Mit Herausforderungen wie diesen beschäftigt sich am Institut für Chemie der Universität Kassel innerhalb des wissenschaftlichen Zentrums CINSaT (Center for Interdisciplinary Nanostructure Science and Technology) Professor Dr. Rüdiger Faust.

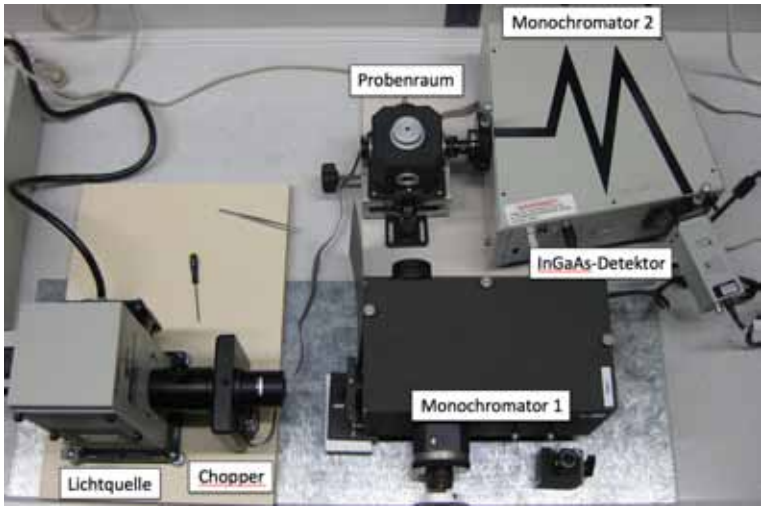
Nach dem Studium der Chemie in Dortmund und der Promotion an der University of California in Berkeley, war Faust Postdoc an der ETH Zürich und an der Universität Heidelberg. 1998 folgte er einem Ruf als Senior Lecturer in Chemistry an das University College London. Seit September 2003 ist Faust als Professor für mesoskopische Systeme in Kassel und Mitglied des CINSaT. Die von Faust untersuchten mesoskopischen Systeme bestehen aus mittelgroßen Molekülen von einigen Nanometern Durchmesser, deren Größe zwischen der von Makromolekülen und der von Molekülen liegt, die nur aus wenigen Atomen bestehen. Faust und sein Team arbeiten daran, auf der Basis von Kohlenstoff chemische Verbindungen zu synthetisieren, die mit Licht auf eine ganz besondere Weise wechselwirken. Mit diesen Verbindungen soll es gelingen, Lichtenergie auf andere Stoffe zu übertragen, Licht als Signal weiterzuleiten, chemische oder physikalische Prozesse auszulösen und zu steuern, oder auch elektrische Spannungen zu erzeugen.

Licht kann chemisch nutzbar gemacht werden

Trifft Licht zum Beispiel auf eines der von Faust speziell entwickelten Moleküle, nimmt dieses Molekül Lichtenergie auf. Der Energieüberschuss des Moleküls kann entweder über Schwingungen in Wärme umgewandelt werden. Er wird dann nahezu wirkungslos verpuffen. Der Energieüberschuss kann aber auch auf



Die durch Licht angeregte Erzeugung von reaktivem Sauerstoff durch den Farbstoff ist bei verschiedenen Abschnitten des Lichtspektrums möglich (siehe Anregungswellenlänge auf der x-Achse). Dies kann durch die Lichtaussendung (Emission) des reaktiven Sauerstoffs bei rund 1270 nm spektroskopisch gemessen werden (y-Achse). Hierbei ist die Intensität der Emission (z-Achse) direkt proportional zur Menge des erzeugten, reaktiven Sauerstoffs.



Fotografie des optischen Messplatzes, mit dem die Erzeugung des reaktiven Sauerstoffs wellenlängenabhängig gemessen werden kann. Das Ergebnis einer solchen Messung ist auf der vorigen Seite dargestellt.

andere Moleküle oder Molekülteile übertragen und so chemisch nutzbar gemacht werden.

Licht macht Sauerstoff hochreaktiv

Sauerstoff zum Beispiel kann durch Wechselwirkung mit den von Faust entwickelten Molekülen jenen Energieüberschuss aufnehmen, den das Licht dort erzeugt hat. Der gewöhnliche Sauerstoff wird auf diese Weise zu reaktivem Sauerstoff. Diese energiereiche Form des Sauerstoffs geht Verbindungen ein, die „normaler“ Sauerstoff nicht einginge. Wenn Sauerstoff mit einem anderen Stoff reagiert, tritt eine Oxidation ein, die einen Abbauprozess einleiten kann, ähnlich wie man ihn aus Verbrennungsreaktionen kennt. Unerwünschte Moleküle, wie jene von Krebsgeschwüren oder kariösem Zahnbefall, aber auch Ablagerungen im Gefäßsystem des Menschen lassen sich auf diese Weise zerstören, sofern sich die synthetisierten Wirkstoffmoleküle, der Sauerstoff, und das Licht, als der Auslöser des chemischen Prozesses, an jene Stelle bringen lassen, wo die Lichtenergie den chemischen Prozess auslösen soll. Das Zusammenwirken der drei Komponenten Wirkstoff, Licht und Sauerstoff nennt man einen photodynamischen Prozess. Schwierig wird es, wenn das Licht nicht zum Wirkstoff vordringen kann, etwa weil ein Tumor - wie das häufig der Fall ist - gut durchblutet ist, und das Blut das Licht absorbiert, es regelrecht schluckt. Oder aber wenn die Farbigkeit des Wirkstoffs, eben jener synthetisierten Moleküle, ästhetisch unerwünscht ist. Diese Problematik tritt etwa bei einer wirkstoffimprägnierten Zahnpasta auf, die, verrieben mit einer „Lichtbürste“, über Photoabbaureaktionen die Zähne antibakteriell reinigen soll.

Darum arbeitet Faust an Wirkstoffen, die mit Licht jenseits des sichtbaren Spektrums reagieren. Faust nimmt den Wirkstoffen die Farbigkeit und macht sie unsichtbar. Denn Farbigkeit ist nichts anderes als die Reflexion von Licht einer bestimmten sichtbaren Wellenlänge - Ein für den Betrachter rotes Auto reflektiert aus dem gesamten Spektrum des weißen Lichts eben nur das für unser Auge sichtbare rote Licht. Faust synthetisiert komplexe Moleküle, die mit Infrarotlicht wechselwirken. Dieses Licht ist für das menschliche Auge nicht sichtbar. Die Wirkstoffe, wie die in der Zahnpasta, erscheinen daher farblos. Da deutlich weniger Substanzen mit Infrarotlicht wechselwirken, kann diese Strahlung tiefer in die Materie eindringen und erreicht Schichten, die für sichtbares Licht nicht ohne Weiteres zugänglich sind. So lässt sich mit infrarotem Licht das Tumorgewebe erreichen, obwohl es von rotem (!) Blut umströmt wird. Faust nutzt zudem den Vorteil, dass langwelligeres Licht energetisch ärmer ist, diese Prozesse also einen geringeren, schonenderen Energieeinsatz erfordern. Dadurch treten weniger unerwünschte Nebeneffekte auf, da das Licht nur seine Arbeit mit den speziell darauf eingestellten Molekülen verrichtet. Um diese Ziele zu erreichen, „dekorieren“ die Chemiker um Faust Farbstoffe auf eine Weise, dass sie Strahlung im infrarotnahen Bereich aufnehmen können. Hier haben sich Kohlenstoff-Stäbchen bewährt, in denen zwei Kohlenstoff-Atome wie im Acetylen-Molekül über eine starre Dreifachbindung miteinander verbunden sind. Werden Moleküle mit dieser Bindungsstruktur von einem Lichtimpuls getroffen, werden sie diesen Energieüberschuss wegen ihrer starren Struktur, nicht so leicht durch unproduktive Schwingungen (z.B. Wärme) wieder los, sondern können ihn besser auf andere Moleküle - etwa auf den Sauerstoff - übertragen.

Die Kohlenstoff-Stäbchen, die etwa 0,1 Nanometer lang sind, haben zwei Enden. Eines dient zur Anbindung an die Farbstoffmoleküle. Das andere aber lässt sich nutzen, um die physikalischen



Fotografie eines Pulvers, das mit Hilfe von Lichtenergie Schadstoffe abbauen kann Es besteht aus einem im Sichtbaren photoaktiven, grünen Farbstoff und dem Weißpigment TiO_2, bekannt als UV-aktiver Photokatalysator. Dieses neuartige Material stellt ein sogenanntes „photokatalytisch aktives Hybridmaterial“ dar.

Eigenschaften des Wirkstoffs zu verändern und zu modulieren. So lassen sich die Lösungseigenschaften - etwa in Wasser oder eher in fettähnlichen Lösemitteln - gezielt auf die Bedürfnisse des Anwenders einstellen. Ebenso lässt sich ausgehend vom zweiten Ende der Stäbchen eine schützende Hülle um den Wirk- oder Farbstoff bauen. Faust befasst sich zum Beispiel mit der Herstellung von Dendrimeren, wiederholt aneinander gereihten, verästelten Molekülstrukturen, deren exponentielles Wachstum dem Gesamtmolekül eine Kugelform gibt, in deren Inneren der Wirkstoff eingebettet ist. Die engmaschige Struktur der äußeren Hülle schützt den Farb- oder Wirkstoff im Inneren, lässt aber zugleich Licht und Sauerstoff durch, um den photodynamischen Prozess auszulösen.

Licht erzeugt elektrische Spannung

Nach einem zweiten Denkansatz wird die durch Licht erzeugte Energie im Molekül auf einen anderen Teil desselben Moleküls übertragen. Faust knüpft dazu aus den oben beschriebenen Kohlenstoffstäbchen Ringe, sogenannte Annulene, und verbindet sie mit elektronenreichen, auf Licht reagierenden Metallen. Trifft Licht auf die Metallzentren, werden Elektronen freigesetzt. Die Kohlenstoff-Annulene nehmen die freigesetzten Elektronen auf. So werden durch Lichteinfluss innerhalb des Moleküls Ladungen vom Metall auf die Kohlenstoffringe übertragen, wodurch eine elektrische Spannung erzeugt wird. Elektrische Spannungen lassen sich prinzipiell zur Verrichtung elektrischer Arbeit nutzen. Die Natur beispielsweise bedient sich bei der Photosynthese eines ganz ähnlichen Verfahrens. In der Photosynthese bewirkt Licht im Zusammenspiel von Metallen und Kohlenstoffmolekülen Ladungstrennungsprozesse, die zum Aufbau von Zucker und Sauerstoff aus Kohlendioxid und Wasser eingesetzt werden. Mit den von Faust hergestellten Molekülen, in denen Metalle wie Ruthenium oder Eisen eine prominente Rolle einnehmen, soll jedoch, ähnlich wie bei einer Solarstromanlage, die Spannung direkt von einem elektrischen Leiter abgegriffen werden, um so als elektrische Energie zur Verfügung zu stehen. Vorteile der von Faust hergestellten Substanzen liegen in ihrer hohen Effizienz und in der beliebigen Formbarkeit organischer Verbindungen. An der Schnittstelle Molekül/elektrischer Leiter trifft die Nanowelt der Moleküle auf die makroskopische Welt der Alltagsgegenstände. Hier ist interdisziplinäres Know-how, wie es im CINSaT vorhanden ist, unabdingbar.



Fotografie einer wässrigen Suspension von nanopartikulärem Hybridmaterial, bestehend aus einem im Sichtbaren photoaktiven, grünen Farbstoff und einem nanopartikulär hergestellten Weißpigment TiO_2, das als UV-aktiver Photokatalysator dient.

Licht treibt Elektronen in „Optischen Computern“ durch Nanodrähte

In einem dritten Projekt schließlich sollen die starren Kohlenstoffstäbchen im Wechselspiel mit leuchtenden, d.h. lumineszierenden, Farbstoffen aneinandergereiht werden. So entstehen winzige Nanodrähte, die wiederum mit Licht wechselwirken können. Trifft Licht auf einen solchen Nanodraht, werden dort Elektronen des Lumineszenzfarbstoffs zu Bewegungen angeregt. Dadurch lassen sie sich leichter verschieben und der Draht wird leitfähig. Die Energieteilchen des Lichts, sogenannte Photonen, können somit einen elektrischen Strom auslösen. Da Photonen um ein Vielfaches schneller als Elektronen sind, laufen zum Beispiel in Transistoren, die mit solchen Nanodrähten bestückt sind, die Schaltprozesse sehr viel rascher ab. Dank der Nanowissenschaften kann von der Nutzung der Photonen eine wahre technische Revolution ausgehen. Es wird den Photonen zugetraut, im 21. Jahrhundert die Rolle zuspielen, die die Elektronen im 20. Jahrhundert inne hatten. „Optische Computer“, in denen das Licht die Elektronen durch Nanodrähte treibt, rücken dank Fausts Arbeiten von der Vision näher an die Realität heran.

Prof. Dr. Rüdiger Faust



Prof. Dr. Rüdiger Faust, Jahrgang 1963, studierte Chemie an der Universität Dortmund (Diplom1989) und promovierte 1993 an der University of California at Berkeley, USA. Nach einem Postdoc-Aufenthalt an der ETH Zürich begann er 1995 an der Universität Heidelberg mit eigenständigen Forschungsarbeiten.1998 folgte er einem Ruf als Senior Lecturer in Chemistry an das University College London, von wo aus er 2003 als Professor für die Chemie mesoskopischer Systeme an die Universität Kassel berufen wurde. Seit Februar 2004 ist er Mitglied im wissenschaftlichen Zentrum CINSaT an der Universität Kassel. Seine Leistungen wurden u.a. gewürdigt durch die Studienstiftung des deutschen Volkes und den Fonds der chemischen Industrie (Kekul-und Liebig-Stipendium). Themenschwerpunkt der Forschung seines Fachgebiets ist die organische Synthese insbesondere zur Entwicklung photodynamischer Konzepte und zur Herstellung von Modellsystemen zum Photoelektronentransfer.