

# Materialverformung mit Licht: photoresponsive Materialien als künstliche Muskeln\*\*

Geoffrey M. Spinks\*

Aktuatoren · Molekulare Maschinen ·  
Photoresponsive Materialien

Unsere Muskeln können Kräfte entwickeln, die die Kraft von Maschinen und Motoren vergleichbarer Größe in den Schatten stellen. Deshalb überrascht es wohl nicht, dass die Herstellung eines künstlichen Muskels mit der Kraftwirkung natürlicher Muskeln eine gewaltige Herausforderung ist, die die Forschung bislang nicht zu bewältigen vermochte. Ein künstlicher Muskel, der in einer Ansprechzeit von unter einer Sekunde bei einem Wirkungsgrad von 30% ungefähr  $100 \text{ W kg}^{-1}$  erzeugt, wäre eine nette Vorstellung. Nehmen wir noch leisen Betrieb hinzu, 10 Millionen oder mehr Betriebszyklen und die Fähigkeit zur Selbstreparatur und Selbstempfindung, und wir kämen einem echten Muskel schon recht nahe. Schließlich wären wir noch gerne in der Lage, diese Systeme in verschiedenster Form zu verbauen, von mikroelektromechanischen Systemen (MEMS) bis hin zu makroskopischen Aktuatoren für humanoide Roboter. In mancher Hinsicht können verschiedene Arten von künstlichen Muskeln die meisten dieser Muskelfunktionen nachahmen, wenn auch mit weniger ausgeklügelten Strukturen. Jedoch bleibt die Kombination all dieser Funktionen in einem einzelnen Material eine außerordentliche Herausforderung.

Die Muskelaktivität beruht auf dem chemisch angetriebenen Gleitfilamentprozess, der die Sarkomere der Muskelfasern zur Kontraktion bringt. Sarkomere sind die seriell und parallel angeordneten Grundeinheiten des Muskels, deren Kontraktion sich in Bewegung und Kraftentwicklung äußert. Viele Forscher glauben, dass eine Entwicklung verbesserter künstlicher Muskeln diesem Design folgen sollte. Tatsächlich gibt es viele Beispiele von molekularen Maschinen – Molekülen, die nach Bedarf ihre Form oder Größe ändern –, die diese Rolle erfüllen könnten.<sup>[1]</sup> Große Anstrengungen wurden unternommen, um solche individuellen Motormoleküle zu Feldern anzurufen, die in der Weise kooperativ arbeiten können, dass sich Bewegungen und Kraft akkumulieren und größere Bewegungen erzeugen. Zum Beispiel wurden DNA-

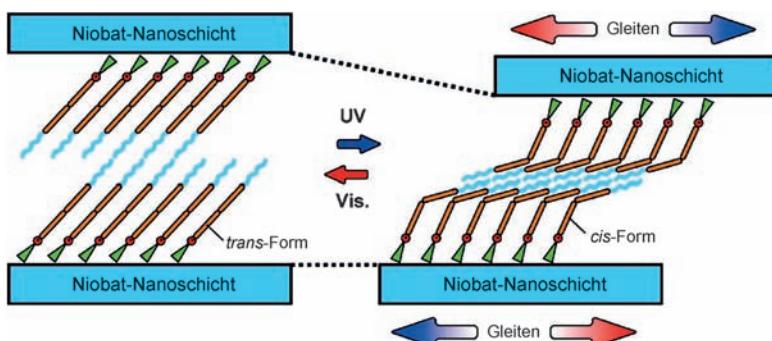
Stränge<sup>[2]</sup> oder Rotaxanmoleküle<sup>[3]</sup> zu Monoschichten auf einem flexiblen Kraftsensor angeordnet, sodass Konformationsänderungen ein Verbiegen des mikroskopischen Kraftsensors verursachten. Die Aktivität der individuellen Moleküle konnte in diesem Fall bis zur mikroskopischen Skala hochskaliert werden.

In einer bahnbrechenden Studie zeigten nun Inoue und Mitarbeiter, wie man Komponenten einer molekularen Maschine in der Weise selbstorganisiert, dass ihre kooperative Wirkung eine Gleitfunktion erzeugt, die in primitiver Weise an den Gleitfilamentmechanismus von Muskeln erinnert.<sup>[4]</sup> Mithilfe einer einfachen Prozedur stellten sie ein schichtartiges Hybridsystem her, bestehend aus anorganischen Kaliumhexaniobat-Nanoschichten (von 1.23 nm Dicke), zwischen die durch Ionenaustausch ein kationisches Tensid, Polyfluoralkylazobenzol (C3F-Azo), interkaliert wurde. Röntgenbeugung und Rasterkraftmikroskopie offenbarten, dass die interkalierten C3F-Azo-Moleküle bei einem Stapelwinkel von 43° nahezu dichtgepackt waren (Abbildung 1). Aus 84 Schichten bestehende Filme wurden auf einer Glasoberfläche präpariert, und die Filmkante wurde mit einem scharfen Skalpellschnitt offengelegt. Die Bestrahlung des Films mit UV-Licht (365 nm) verursachte eine Isomerisierung der Azo-Einheit der C3F-Azo-Moleküle von der *trans*- in die *cis*-Form, was zu einer Scharnier-artigen Verformung der individuellen Moleküle führte. Die kooperative Bewegung der dichtgepackten Doppelschicht von C3F-Azo führte zu einer Gleitbewegung benachbarter Niobat-Nanoschichten. Die verformte Struktur war nach der UV-Bestrahlung stabil, konnte aber durch Bestrahlung mit sichtbarem Licht (435 nm), das die umgekehrte Isomerisierung von *cis* zu *trans* auslöst, wieder in die ursprüngliche Form zurückgeführt werden. Die reversible seitliche Verschiebung der gesamten mehrlagigen Hybridschicht betrug 1500 nm, entsprechend ungefähr 18 nm pro Schicht. Wir kennen die Gesamtlänge des aktiven Hybridsfilms nicht, sodass es uns nicht möglich ist, die Längenänderung in Prozent der ursprünglichen Länge anzugeben. Jedoch scheint der Hinweis wichtig, dass einzelne Sarkomere in Muskeln eine Längenkontraktion von nur ca. 250 nm ausgehend von einer Anfangslänge von 2–3 μm erzeugen. Mit der richtigen Anordnung akkumulieren diese kleinen Bewegungen zu den sehr großen Kontraktionen um mehrere Millimeter, wie sie durch das Muskelgewebe erzeugt werden. In einer ähnlichen Weise brachten Inoue und Mitarbeiter Azo-Moleküle dazu, sich so anzurufen und miteinander zu ko-

[\*] Prof. G. M. Spinks

Intelligent Polymer Research Institute and ARC Centre of Excellence in Electromaterials Science, University of Wollongong  
Squires Way, North Wollongong, NSW, 2522 (Australien)  
E-Mail: gspinks@uow.edu.au  
Homepage: <http://www.electromaterials.edu.au>

[\*\*] Der Autor dankt dem Australian Research Council für finanzielle Unterstützung durch ein Centre of Excellence and Professorial Fellowship.



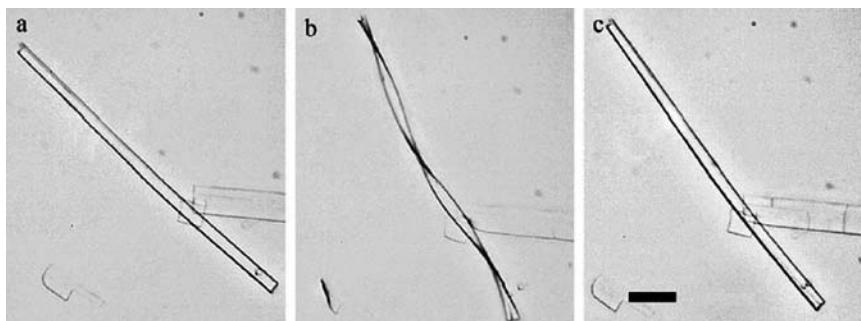
**Abbildung 1.** Aufbau der interkalierten Schichtstruktur aus gestapelten Azobenzolmolekülen zwischen Niobat-Nanoschichten und deren reversible Gleitbewegung. (Abdruck mit Genehmigung nach Inoue et al.<sup>[4]</sup> Copyright 2011 American Chemical Society.)

operieren, dass die individuellen Änderungen ihrer Form in eine einzige Richtung koordiniert werden. Es ist zu hoffen, dass es gelingt, diese Hybridfilme vom Glassubstrat abzulösen, um eine lineare Kontraktion und nützliche Arbeit zu generieren.

Muskelfasern sind nicht immer gerade, und eine Muskelkontraktion ist nicht immer linear. Zum Beispiel sind manche der Muskelfasern im Elefantenrüssel helikal zu konzentrischen Zylindern gewunden.<sup>[5]</sup> Die Kontraktion dieser Fasern kann zu einer Drehbewegung führen. Andere Fasern verlaufen longitudinal und erzeugen eine Verbiegung. Mit dieser Anordnung sorgt die Kontraktion ausgewählter Muskelfasern für die enorm komplexe Bandbreite von Bewegungen und die unglaubliche Geschicklichkeit des Elefantenrüssels. Ähnliche Strukturen gibt es in Tentakeln, Zungen und Wurmkörpern. Mit einer hoch vereinfachten Nachbildung ist es uns gelungen, helikal gewundene Kohlenstoffnanoröhren zu Garnfasern anzugeordnen, die bei elektrischer Stimulation große und schnelle Torsionsbewegungen ausführen.<sup>[6]</sup> Die Torsionsbewegung entsteht durch die teilweise Entwindung, die auftritt, wenn die Garnfaser infolge der elektrochemischen Aufladung anschwillt. Auch eine lichtinduzierte Drehbewegung wurde kürzlich durch Bardeen und Mitarbeiter beschrieben.<sup>[7]</sup> In diesem Fall erzeugt eine UV-initiierte Dimerisierungsreaktion zwischen benachbarten 9-Anthracencarbonsäure-Molekülen in einem kristallinen Mikroband eine Grenzflächenspannung zwischen umgesetzten und nichtumgesetzten Regionen, die eine Gestaltände-

itung in Form der Verdrehung langer, dünner Bänder hervorruft (Abbildung 2). Die Verdrehung ging beim Entfernen der Lichtquelle infolge der thermischen Rückreaktion wieder zurück. Komplexe Verdrehungen und Biegungen eines flüssigkristallinen Azobenzol-Polymernetzwerks wurden von White und Mitarbeitern beobachtet.<sup>[8]</sup> In diesem Fall wurden Streifen des glasartigen Polymers mit polarisiertem Licht bestrahlt, sodass die Richtung der Biegung/Verdrehung über die Ausrichtung der Flüssigkristalle innerhalb der Filme gesteuert werden konnte.

Die hier vorgestellten Beispiele unterstreichen einige der jüngsten Fortschritte im Bereich der lichtinduzierten künstlichen Muskeln. So eindrucksvoll diese Ergebnisse sind, bleibt doch noch viel Arbeit zu tun, bevor wir über ein wirklich biomimetisches künstliches Muskelsystem verfügen, das durch Lichteinstrahlung angetrieben wird. Ein verheißungsvoller Schritt vorwärts wäre die Entwicklung eines Photoaktuators, der echte mechanische Arbeit verrichtet. Für gewöhnlich werden Experimente so beschrieben, dass sich das Aktuatorelement ohne äußere Last frei bewegen kann. In echten Anwendungen muss der Aktuator jedoch gegen eine äußere Last arbeiten. In diesem Fall ist die Nettoaktuation gleich der Summe der Verformungen, die durch den Lichtstimulus und die normale elastische Verformung infolge der äußeren Last erzeugt werden. Das Ausmaß einer elastischen Verformungen wird vom Young-Modul des Aktuatorelementes bestimmt. Bei den einfachsten linearen Systemen nimmt die Aktuatordehnung (die prozentuale Verlängerung bezo-



**Abbildung 2.** Mikroskopische Aufnahmen (Skalierung 20 µm), die die Verdrehung eines einzelnen Mikrobandes bei Bestrahlung mit UV-Licht zeigen. Die Aufnahmen zeigen das Band a) vor, b) während und c) nach Bestrahlung. (Abdruck nach Lit. [6]. Copyright 2011 American Chemical Society.)

gen auf die Anfangslänge) mit steigender Last umgekehrt proportional zum Modul ab. Die Höchstlast (Sperrlast) ist die Last, die benötigt wird, um jedwede Aktuatordehnung zu verhindern. Die Arbeitsleistung erreicht normalerweise ein Maximum, wenn eine Last gleich der halben Sperrlast auf das Material angewendet wird. Das bedeutet, dass eine optimale Leistung nur dann erzielt werden kann, wenn der Aktuator auf die zu erwartende Beladung abgestimmt ist. Einige jüngste Ansätze zur quantitativen Modellierung der licht-induzierten Aktuation<sup>[9]</sup> sind hilfreich, allerdings bedarf es der experimentellen Validierung. Das Herstellen eines nützlichen künstlichen Muskels ist nicht nur eine Frage des Erzeugens von Bewegung, ganz gleich wie groß und schnell diese ist. Die Erforschung photoresponsiver Materialien als künstliche Muskeln wird auf der Grundlage innovativer Chemie ohne Zweifel weiter voranschreiten und hoffentlich auch durch die Gewinnung quantitativer Informationen zu Arbeitskapazitäten, Leistungsabgaben und Gesamtwirkungsgraden untermauert werden.

Eingegangen am 15. Dezember 2011  
Online veröffentlicht am 17. Januar 2012

- 
- [1] E. R. Kay, D. A. Leigh, F. Zerbetto, *Angew. Chem.* **2007**, *119*, 72–196; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2007**, *46*, 72–191.
  - [2] W. Shu, D. Liu, M. Watari, C. K. Riener, T. Strunz, M. Welland, S. Balasubramanian, R. A. McKendry, *J. Am. Chem. Soc.* **2005**, *127*, 17054–17060.
  - [3] Y. Liu, A. H. Flood, P. A. Bonvallet, S. A. Vignon, B. H. Northrop, H.-R. Tseng, J. O. Jeppesen, T. J. Huang, B. Brough, M. Baller, S. Magonov, S. D. Solares, W. A. Goddard, C.-M. Ho, J. F. Stoddart, *J. Am. Chem. Soc.* **2005**, *127*, 9745–9759.
  - [4] Y. Nabetani, H. Takamura, Y. Hayasaka, T. Shimada, S. Takagi, H. Tachibana, D. Masui, Z. Tong, H. Inoue, *J. Am. Chem. Soc.* **2011**, *133*, 17130–17133.
  - [5] W. Kier, K. K. Smith, *Zool. J. Linn. Soc.* **1985**, *83*, 302–324.
  - [6] J. Foroughi, G. M. Spinks, G. G. Wallace, J. Oh, M. E. Kozlov, S. Fang, T. Mirfakhrai, J. D. W. Madden, M. K. Shin, S. J. Kim, R. H. Baughman, *Science* **2011**, *334*, 494–497.
  - [7] L. Zhu, R. O. Al-Kaysi, C. J. Bardeen, *J. Am. Chem. Soc.* **2011**, *133*, 12569–12575.
  - [8] K. M. Lee, M. L. Smith, H. Koerner, N. Tabiryan, R. A. Vaia, T. J. Bunning, T. J. White, *Adv. Funct. Mater.* **2011**, *21*, 2913–2918.
  - [9] L. Jin, Y. Lin, Y. Huo, *Int. J. Solids Struct.* **2011**, *48*, 3232–3242.