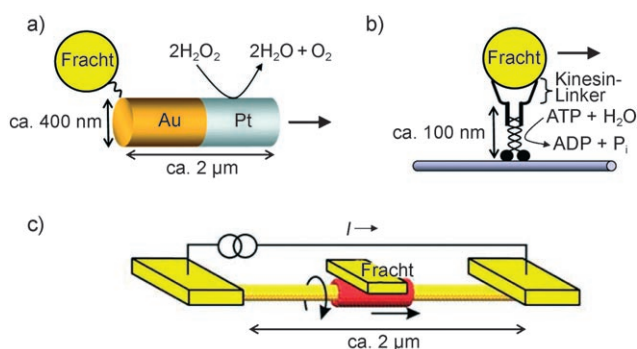


# Ein Güterzug aus Nanoröhren zum Lastentransport auf der Nanoskala

Marko Burghard\*

Aktuatoren · Molekulare Elektronik · Molekulare Funktionseinheiten · Nanomotoren · Nanoröhren

Der zielgerichtete Transport von Nanopartikeln oder Molekülen auf der Mikrometer- oder Nanometerskala ist ein aktives interdisziplinäres Forschungsgebiet,<sup>[1]</sup> das zahlreiche Anwendungen, z. B. zur definierten Einschleusung von Nanosonden oder pharmazeutischen Wirkstoffen in Zellen<sup>[2]</sup> sowie in der Biosensorik<sup>[3]</sup> und Mikrofluidik,<sup>[4]</sup> verspricht. Der Transport kann dabei prinzipiell durch Licht sowie thermische oder chemische Energie angetrieben werden. Eine erste Strategie besteht darin, das Nanoobjekt an einen katalytischen Nanomotor zu koppeln, der sich autonom innerhalb eines flüssigen Mediums fortbewegen kann. Ein Beispiel hierfür sind bimetallische Nanostäbchen, die aus einem Gold- und einem Platin-Segment bestehen (Abbildung 1 a).<sup>[5]</sup> Werden diese in eine wässrige  $\text{H}_2\text{O}_2$ -Lösung gebracht, kommt es an der Platinoberfläche zur lokalen Zersetzung des Peroxids unter Bildung von Sauerstoff. Modellrechnungen deuten



**Abbildung 1.** Drei Arten von Motoren zum Transport einer Fracht auf der Mikro- oder Nanometerskala. a) Segmentiertes Gold-Platin-Nanostäbchen, dessen Fortbewegung von der lokalen katalytischen Zersetzung von Wasserstoffperoxid gespeist wird.<sup>[5]</sup> b) Ein Kinesin-Biomotor, der sich durch Hydrolyse von Adenosintriphosphat (ATP) getrieben, gerichtet entlang eines Mikrotubulus bewegt. P<sub>i</sub>: Phosphat, ADP: Adenosindiphosphat. c) Elektrisch angetriebener Nanomotor aus einer Nanoröhrenhülle, die sich entlang einer koaxialen Nanoröhre bewegt.<sup>[21]</sup> Die Hülle führt dabei eine reine Rotations-, eine reine Translations- oder eine Schraubenbewegung aus.

darauf hin, dass die mit dem resultierenden Sauerstoff-Konzentrationsgradienten einhergehende Variation der Metall/Flüssigkeits-Grenzflächenspannung entlang des Stäbchens für den Antrieb mit Geschwindigkeiten von einigen  $\mu\text{m s}^{-1}$  verantwortlich ist.<sup>[5,6]</sup> Allerdings ist der genaue Mechanismus noch Gegenstand aktueller Untersuchungen. Unter anderem werden Ionenströme an der Stäbchenoberfläche<sup>[7]</sup> sowie das Ablösen von Sauerstoffbläschen<sup>[8]</sup> als alternative Mechanismen diskutiert. In einer vor kurzem erschienenen Arbeit wurden Polymere Nanopartikel über elektrostatische oder Protein-Ligand-Wechselwirkungen an ein Ende von Pt/Au-Nanostäbchen gebunden.<sup>[9]</sup> Das Anhängen der Last macht die bimetalischen Motoren zwar langsamer, sie können aber dennoch Partikel mit einem beachtlichen Durchmesser von bis zu ca.  $1 \mu\text{m}$  in einer  $\text{H}_2\text{O}_2$ -Lösung transportieren. Innerhalb eines  $\text{H}_2\text{O}_2$ -Gradienten erfolgt der Transport zielgerichtet zum Konzentrationsmaximum, eine Art „Chemotaxis“, die zuvor bereits für unbeladene Motoren dokumentiert wurde.<sup>[10]</sup> Durch Zwischenschalten von kurzen Nickelsegmenten in den Motor konnte ferner eine gerichtete Bewegung der Motor/Partikel-Hybride in einem Magnetfeld erzielt werden.

Alternative katalytische Nanomotoren sind  $\text{SiO}_2$ -Mikropartikel, deren Oberfläche mit einem molekularen,  $\text{H}_2\text{O}_2$  zersetzenden Katalysator belegt ist. Bislang wurden solche Partikel zur besseren Lokalisierung mit einem Fluoreszenzmarker ausgestattet;<sup>[11]</sup> sie sollten sich jedoch ebenfalls für den Transport größerer Frachten eignen. Ein weiterer vielversprechender Nanomotor wurde durch kovalente Kupplung zweier unterschiedlicher Enzyme an Kohlenstoffnanoröhren realisiert.<sup>[12]</sup> Das Funktionsprinzip besteht darin, dass in einem wässrigen Glucosemedium das eine Enzym (Glucoseoxidase)  $\text{H}_2\text{O}_2$  bereitstellt, das anschließend vom anderen Enzym (Katalase) zersetzt wird; der dabei generierte Sauerstoff sorgt für den Antrieb.

Eine zweite Strategie ist die Ex-vivo-Nutzung von Protein-Nanomaschinen als Transportvehikel.<sup>[13]</sup> Diese bieten den Vorteil, dass die Fracht unidirektional entlang einer nanostrukturierten Schiene transportiert werden kann (Abbildung 1 b). Gut untersucht ist der Biomotor Kinesin, der sich durch ATP-Hydrolyse chemisch angetrieben entlang von Mikrotubuli (zylindrischen Polymeren aus dem Protein Tubulin mit einem Durchmesser von 25 nm und einer Länge von vielen Mikrometern) bewegt.<sup>[14]</sup> Substratgebundenes Kinesin ermöglicht den Transport von Mikrotubuli, die mithilfe ge-

[\*] Dr. M. Burghard  
Max-Planck-Institut für Festkörperforschung  
Heisenbergstraße 1, 70569 Stuttgart (Deutschland)  
Fax: (+49) 711-689-1662  
E-Mail: m.burghard@fkf.mpg.de

eigneter Kanäle in bestimmte Richtungen gelenkt werden können.<sup>[15]</sup> Umgekehrt gestatten ortsgebundene Mikrotubuli den Transport von Kinesin, wobei die Tubuli z.B. durch Strömung mit identischer Polarität (jeder Zylinder hat ein „Plus“- und ein „Minus“-Ende) ausgerichtet werden können, um somit die Motoren einheitlich in eine feste Vorzugsrichtung zu bewegen.<sup>[16]</sup> Sowohl Kinesin als auch Mikrotubuli wurden zum Transport einer Fracht, z.B. mehrere Mikrometer großer Partikel aus unterschiedlichen Materialien<sup>[17]</sup> oder DNA-Moleküle<sup>[18]</sup> auf Substraten, eingesetzt. Auf diese Weise können Objekte über mehrere Millimeter mit Geschwindigkeiten von bis zu  $1 \mu\text{m s}^{-1}$  transportiert werden.<sup>[17]</sup> Aktuelle Arbeiten beschäftigen sich mit der Anwendung von Mikrotubuli zur Sortierung von Proteinen in Mikrofluidikzellen<sup>[19]</sup> oder als Shuttles, die Objekte zwischen definierten Standorten auf einer Substratoberfläche transportieren können.<sup>[20]</sup>

Den bisher beschriebenen Transportsystemen ist gemeinsam, dass sie ausschließlich in einem flüssigen Milieu funktionsfähig sind. Vor kurzem wurde ein neuartiger, elektrisch angetriebener Motor auf Kohlenstoffnanoröhrenbasis zum Transport von Nanoobjekten vorgestellt, der in Festkörperstrukturen integrierbar ist.<sup>[21]</sup> Zu dessen Herstellung wurde mithilfe von Elektronenstrahlolithographie eine mehrschalige Nanoröhre mit zwei Goldelektroden kontaktiert und mit einem nanostrukturierten Goldplättchen (Seitenlänge ca. 500 nm) versehen. Durch Anlegen eines elektrischen Stroms kommt es zu einem Aufheizen der Röhre und einem Wegbrennen ihrer äußersten Schale(n), mit Ausnahme des durch das Metallplättchen geschützten Abschnitts. Im letzten Schritt wird durch Ätzen des Substrats zwischen den Elektroden eine freitragende Struktur erzeugt, in der eine kurze (ca. 500 nm), die Fracht tragende Nanoröhrenhülse um eine längere (ca. 2  $\mu\text{m}$ ), fest aufgehängte Nanoröhre als Achse vorliegt (Abbildung 1c). Ein Stromfluss durch die Achse kann nun dazu genutzt werden, das Plättchen über eine Distanz von mehr als 1  $\mu\text{m}$  zu transportieren. Dabei wird eine Geschwindigkeit von bis zu  $1 \mu\text{m s}^{-1}$  erreicht, was in etwa den von Kinesin-Biomotoren erreichten Werten entspricht.<sup>[13]</sup>

Entscheidende Weiterentwicklungen gegenüber den bereits 2004 beschriebenen Rotoren aus Nanoröhren<sup>[22]</sup> sind der zweite Freiheitsgrad (Translation) sowie der Antriebsmechanismus. Während der Rotor elektrostatisch angesteuert wurde, erzeugt der in den Motor eingespeiste Strom Joulesche Wärme, die zu einem starken Aufheizen der Nanoröhren führt. Da an den Metallkontakten die Wärme effektiv abgeführt wird, entsteht dabei ein thermisches Gefälle von ca. 1000 °C in der Mitte der Röhre bis zu nahe Raumtemperatur am Kontakt. Die Kraft, welche die Hülse zur näher liegenden Elektrode treibt, wird dem Strom aus Gitterschwingungen in Richtung des Temperaturgefälles zugeschrieben. Die Art der Hülsenbewegung entlang der koaxialen Nanoröhre hängt von der Struktur der beiden Nanoröhren ab. Je nach der Charakteristik des atomaren Wechselwirkungspotentials zwischen den beiden Schalen führt die Hülse bevorzugt eine reine Translation, reine Rotation oder eine Kombination aus beidem, ähnlich der Drehbewegung einer Mutter entlang einer Schraube, aus. Dabei sind Schrittweiten im Subnanometerbereich möglich, also wesentlich kleiner als die 8-nm-Schritte, mit denen sich Kinesin entlang von Mikrotubuli

bewegt.<sup>[4]</sup> Ein weiterer Vorteil des Nanoröhrenmotors ist die zu erwartende höhere Lebensdauer gegenüber ex vivo genutzten Biomotoren, die innerhalb weniger Tage einer Denaturierung unterliegen.<sup>[13]</sup>

Die Nanoröhrenmotoren sind sehr vielversprechend zur Gewinnung fundamentaler Erkenntnisse über atomare Reibungsvorgänge in Nanomaschinen. Ihrem Einsatz in der Praxis, z.B. zum Transport von Flüssigkeiten oder als Nanopipetten zur kontrollierten Freisetzung von Medikamenten, stehen allerdings noch etliche Hindernisse im Weg. Besonders problematisch ist die gegenwärtig sehr hohe Temperatur der Nanoröhre, die durch kürzere Hülsen verringert werden könnte. Um eine gewünschte Bewegungsart der Hülse zu erzielen, müsste außerdem ein Syntheseverfahren entwickelt werden, das Nanoröhren aus spezifischen Schalen liefert. Für viele Anwendungen wäre auch die Realisierung einer Vor- und Rückwärtsbewegung des Motors hilfreich.

Online veröffentlicht am 24. September 2008

- [1] V. Vogel, H. Hess, *Lect. Notes Phys.* **2007**, 711, 367.
- [2] G. D. Bachand, S. B. Rivera, A. Carroll-Portillo, H. Hess, M. Bachand, *Small* **2006**, 2, 381.
- [3] S. Ramachandran, K. H. Ernst, G. D. Bachand, V. Vogel, H. Hess, *Small* **2006**, 2, 330.
- [4] C. T. Lin, M. T. Kao, K. Kurabayashi, E. Meyhofer, *Small* **2006**, 2, 281.
- [5] a) W. F. Paxton, K. C. Kistler, C. C. Olmeda, A. Sen, S. K. St. Angelo, Y. Y. Cao, T. E. Mallouk, P. E. Lammert, V. H. Crespi, *J. Am. Chem. Soc.* **2004**, 126, 13424; b) W. F. Paxton, S. Sundararajan, T. E. Mallouk, A. Sen, *Angew. Chem.* **2006**, 118, 5546; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2006**, 45, 5420.
- [6] N. Bala Saidulu, K. L. Sebastian, *J. Chem. Phys.* **2008**, 128, 074708.
- [7] Y. Wang, R. M. Hernandez, D. J. Bartlett, J. M. Bingham, A. Sen, T. E. Mallouk, *Langmuir* **2006**, 22, 10451.
- [8] N. L. Kovtyukhova, *J. Phys. Chem. C* **2008**, 112, 6049.
- [9] S. Sundararajan, P. E. Lammert, A. W. Zudans, V. H. Crespi, A. Sen, *Nano Lett.* **2008**, 8, 1271.
- [10] T. R. Kline, W. F. Paxton, T. E. Mallouk, A. Sen, *Angew. Chem.* **2005**, 117, 754; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2005**, 44, 744.
- [11] N. Heurieux, F. Lusitani, W. R. Browne, M. S. Pshenichnikov, P. H. M. van Loosdrecht, B. L. Feringa, *Small* **2008**, 4, 476.
- [12] D. Pantarotto, W. R. Browne, B. L. Feringa, *Chem. Commun.* **2008**, 1533.
- [13] M. G. L. van den Heuvel, C. Dekker, *Science* **2007**, 317, 333.
- [14] J. Howard, A. J. Hudspeth, R. D. Vale, *Nature* **1989**, 342, 154.
- [15] S. G. Moorjani, L. Jia, T. N. Jackson, W. O. Hancock, *Nano Lett.* **2003**, 3, 633.
- [16] R. Yokokawa, S. Takeuchi, T. Kon, M. Nishiura, K. Sutoh, H. Fujita, *Nano Lett.* **2004**, 4, 2265.
- [17] K. J. Böhm, R. Stracke, P. Muhlig, E. Unger, *Nanotechnology* **2001**, 12, 238.
- [18] S. Diez, C. Reuther, C. Dinu, R. Seidel, M. Mertig, W. Pompe, J. Howard, *Nano Lett.* **2003**, 3, 1251.
- [19] C. T. Lin, M. T. Kao, L. Kurabayashi, E. Meyhofer, *Nano Lett.* **2008**, 8, 1041.
- [20] C. Brunner, C. Wahnes, V. Vogel, *Lab Chip* **2007**, 7, 1263.
- [21] A. Barreiro, R. Rurali, E. R. Hernandez, J. Moser, T. Pichler, L. Forro, A. Bachtold, *Science* **2008**, 320, 775.
- [22] B. Bourlon, D. C. Glattli, C. Miko, L. Forro, A. Bachtold, *Nano Lett.* **2004**, 4, 709.