

sein, etwa durch Fehlstellen wie Carboxyl- oder Hydroxyl-Gruppen. Und schließlich kommt es auch auf das Benetzungsverhalten von Metall zu Röhrchen an und auf mögliche Verunreinigungen an der Grenzfläche.

Den Autoren von [2], Physikern aus Stanford und Perdue, ist es nun gelungen, Nanotubes so in Metalle einzubetten, dass sich keine oder nur ganz schwache Schottky-Barrieren ausbilden. Dazu haben sie nicht wie bisher üblich die Metalle Au, Ni, Pt oder Ti verwendet, sondern Palladium, welches die Röhrchen sehr gut benetzt, und dessen Austrittsarbeit sich durch *in situ*-Behandlungen mit Wasserstoff modifizieren lässt.

So können sie das Verhalten eines 300 nm langen Röhrchenstückes mit dem eines 3 μm langen vergleichen. Im kurzen Röhrchen ist der Transport tatsächlich weitgehend ballistisch, während sich im langen Röhrchen Stöße mit Fehlstellen bemerkbar machen.

Das Fehlen der Schottky-Barriere ist für das Transistorverhalten sehr wichtig, denn die Barrieren begrenzen den Strom entlang der Röhre. Die Autoren erreichen in ihrer Vorrichtung ein Schaltverhältnis (on/off ratio) von 10^6 und Sättigungsströme von 25 μA pro Röhrchen, was einer Stromdichte von 10^9 A/cm^2 entspricht!

Die Arbeit ist nicht nur von Bedeutung für unser Verständnis von Quantendrähten und Nanotubes. Sie zeigt auch, dass in Kohlenstoff-Nanoröhrchen – infolge des ballistischen Transportes – sehr hohe Stromdichten zu erreichen sind. Schon lange bevor Nanoröhrchen als Transistoren praktisch eingesetzt werden, wird man sie als Leiterbahnen in integrierten Schaltungen verwenden. Durch die kovalenten chemischen Bindungen sind Nanotubes wesentlich stabiler als herkömmliche Metalle, sodass sich nicht so leicht kleine Partikel absondern, die am Chip herumwandern (Elektromigration) und zu Ausfällen der Bauelemente führen. Für diese „interconnects“ sind Stromdichten von über 10^6 A/cm^2 erforderlich. Mehrere große Elektronikfirmen, darunter auch Infineon in München, arbeiten intensiv am Einsatz von Kohlenstoff-Nanoröhrchen in Silizium-Chips. Von besonderer Bedeutung werden die Nanoröhrchen für die kommenden Chipgenerationen sein, bei denen man die Bauele-

mente in mehreren Stockwerken übereinander anordnen wird, die man durch hochleitfähige Vias (vertikale interconnects) aufzugartig verbinden muss.

SIGMAR ROTH

- [1] S. Iijima, Nature **354**, 56 (1991)
- [2] S. J. Taus, A. Verschueren und C. Dekker, Nature **393**, 49 (1998)
- [3] A. Javey, J. Guo, Q. Wang, M. Lundstrom und H. Dai, Nature **424**, 654 (2003)

■ Brownsche Motoren: gemeinsam stark

Brownsche Motoren erzeugen Kraft, indem sie thermische Fluktuationen gleichrichten. Da Kollisionen mit umgebenden Molekülen die Motoren nicht behindern, sondern ihnen vielmehr bei der Arbeit helfen, können diese auf extrem kleinen Größenskalen arbeiten. Diese Stärke Brownscher Motoren ist zugleich ihre Schwäche: Ein einzelner Motor kann nämlich auch nur mikroskopische Mengen Arbeit verrichten. Zum ersten Mal ist es jetzt gelungen, durch die gemeinsame Wirkung einer großen Zahl Brownscher Motoren ein makroskopisches Objekt in Bewegung zu setzen.

Im Inneren von biologischen Zellen vollbringen so genannte molekulare Motoren Erstaunliches. Die Aufgabe des Motorproteins Kinesin ist es beispielsweise, eine gefüllte Membranblase (ein Vesikel) entlang eines Filamentes zu transportieren. Typischerweise geschieht das mit einer Geschwindigkeit von etwa $0,1 \mu\text{m/s}$, und mit einer Energieeffizienz, die Autohersteller erblassen lassen würde. Besonders bemerkenswert dabei ist, dass umgebende Wassermoleküle ständig mit Motor und Ladung kollidieren. Die pro Zusammenstoß auf die Ladung übertragene kinetische Energie entspricht augenblicklichen Geschwindigkeiten von mehreren cm/s . Dies entspräche einem Lkw auf der Landstraße, der von Windböen mit mehrfacher Schallgeschwindigkeit hin- und hergeworfen wird.

Wie kann eine mikroskopisch kleine Maschine auch unter dem Einfluss von so überwältigend starkem Rauschen vergleichsweise effektiv arbeiten? Als Lösungen dieses Problems bieten sich Mechanismen der Krafterzeugung an, die den Einfluss thermischen Rauschens nicht bekämpfen, sondern

ihn ausnutzen. Motoren, die das können, heißen *Brownsche Motoren* [1, 2], da ihr Funktionsprinzip typischerweise einen Schritt enthält, währenddessen sich Teilchen durch Diffusion bewegen.^{*)} Oft dient dann ein asymmetrisches, manchmal zeitabhängiges Potential (eine *Ratsche*) dazu, Teilchen da-

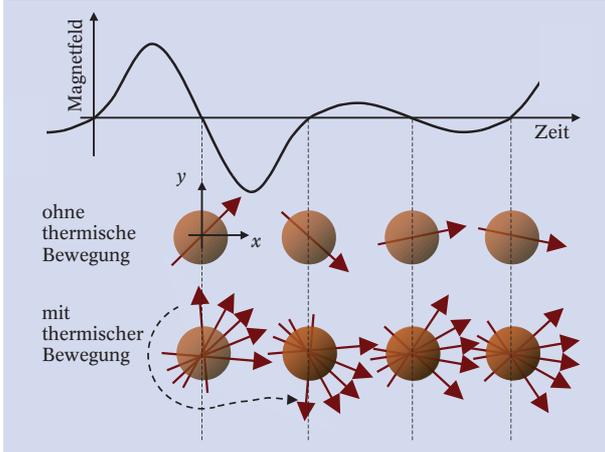


Abb. 1: Rotierende Brownsche Motoren: Ein statisches Magnetfeld in x -Richtung bestimmt eine Vorzugsrichtung für das magnetische Dipolmoment von kolloidalen, ferromagnetischen Nanoteilchen. Ein zusätzliches, anharmonisch oszillierendes Magnetfeld lenkt die Teilchen in y -Richtung aus. Durch viskose Dämpfung folgen die Teilchen dem Magnetfeld mit zeitlicher Verzögerung. Eine gelegentliche volle Drehung der Teilchen tritt nur in Gegenwart thermischen Rauschens auf.

von abzuhalten, in die falsche Richtung zu laufen, Zufallsbewegung in die richtige Richtung aber zuzulassen [1–3]. Die Teilchen können sich so im Durchschnitt auch entgegen einer äußeren Kraft bewegen, allerdings nur in begrenztem Umfang. Denn wenn der Diffusionsschritt „bergauf“ mehr als ungefähr eine thermische Energie kT beträgt, wird er zu unwahrscheinlich und der Transport zu langsam. In Zahlen ausgedrückt beträgt $kT \sim 4$ pN nm, das heißt, ein Brownscher Motor kann sich gegen eine Kraft der Größenordnung 10^{-12} Newton pro Arbeitszyklus nicht mehr als einige Nanometer weit bewegen.

Solche kleinen Kräfte hauen natürlich keinen Bären um. Wie kann man also dennoch mit Hilfe Brownscher Motoren „makroskopische“ Kräfte der Größenordnung Newton erzeugen? Im biologischen Muskel wird dieses Problem gelöst, indem eine sehr große Anzahl von individuellen Motoren an einem gemeinsamen Strang ziehen [4], und so dann auch einen ganzen Arm heben können.

Eine ganze Reihe von Experimenten hat in den letzten Jahren Brownsche Motoren für die gerich-

tete Bewegung einzelner, kleiner Teilchen realisiert, von Elektronen über kalte Atome zu DNS-Molekülen [3]. Kürzlich ist es nun zum ersten Mal gelungen, im Experiment dem biologischen Beispiel zu folgen und mithilfe Brownscher Motoren *makroskopische* Arbeit zu verrichten [5].

In dem Experiment wurde eine Plastikugel mit einer Ferroflüssigkeit gefüllt und die thermische Bewegung der 10 nm kleinen, kolloidalen, ferromagnetischen Teilchen genutzt, um die freihängende Kugel in Rotation zu versetzen. Wie in Abbildungen 1 und 2 angedeutet, richtet ein in der horizontalen Ebene angelegtes statisches Magnetfeld zunächst die Teilchen ihrem magnetischen Dipolmoment gemäß parallel aus und definiert eine Achse des Systems. Ein senkrecht dazu angelegtes, ebenfalls horizontales, aber zeitabhängiges Magnetfeld führt dem System Energie zu, indem es die stark gedämpften Teilchen abwechselnd nach rechts oder links in y -Richtung auslenkt. Ein zweiter Symmetriebruch, der notwendig ist, um nicht nur eine Rotationsachse, sondern auch einen Rotationssinn festzulegen, wird dadurch realisiert, dass das zeitabhängige Magnetfeld nicht einfach sinusförmig ist, sondern eine phasenverschobene, höhere Harmonische enthält. Ohne den Einfluss thermischen Rauschens drehen die Teilchen sich nur einfach abwechselnd stark nach rechts, stark nach links, ein wenig nach rechts, ein wenig nach links und dann wieder von vorne. Thermische Bewegung führt aber dazu, dass die Teilchen sich auch einmal „falsch herum drehen“ können, das heißt,

ein ungewöhnlich großes Rauschereignis lässt ein Teilchen zufällig so weit überdrehen, dass es nach einem Richtungswechsel des Magnetfeldes lieber linksherum dem neuen Gleichgewicht zustrebt, als rechtsherum (gestrichelter Pfeil in Abb. 1). Intuitiv kann man sich vorstellen, dass dies dann besonders wahrscheinlich ist, wenn die momentane Auslenkung der Teilchen gerade groß ist und wenn sich das Magnetfeld bereits weit in die andere Richtung gedreht hat. Diese Situation gibt es nur einmal pro Oszillationsperiode, und im Durchschnitt ergibt

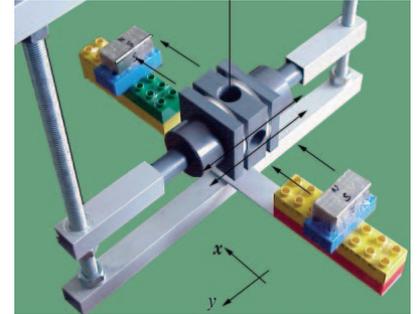


Abb. 2: Im Versuchsaufbau zu Abb. 1 bewirken Permanentmagneten ein statisches Magnetfeld in x -Richtung, während die Helmholtz-Spulen in der Mitte des Bildes ein zeitabhängiges Magnetfeld in y -Richtung schaffen. Eine mit Ferroflüssigkeit gefüllte Kugel (nicht sichtbar) hängt an einem Faden in das Zentrum der Spulen.

sich eine thermisch aktivierte, gerichtete Rotation aller Teilchen, die durch viskose Reibung einen Drehimpuls auf den Behälter überträgt. Eine genaue Analyse zeigt allerdings, dass solche intuitiven Argumente problematisch sein können: Manchmal drehen sich zum Beispiel kleine und große Teilchen in entgegengesetzte Richtungen. Die Arbeit

^{*)} Anschauliche Simulation eines Brownschen Motors: R. Ketzmerick, M. Weiß und F.-J. Elmer. http://www.chaos.gwdg.de/java_gallery/brownian_motor/bm.html

KURZGEFASST...

■ Bose-Einstein-Kondensation von Ytterbium

Die Familie der Bose-Einstein-Kondensate (BEK) wird immer größer: Nach den Alkalimetallen Rb, Na, Li, K, Cs sowie Wasserstoff und Helium ist es nun auch gelungen, ein BEK aus Ytterbium herzustellen.¹⁾ Dies ist das erste Kondensat eines Atoms mit zwei Valenzelektronen in einem Spinsingulett-Zustand.

■ Interferenz mit Biomolekülen

Gibt es eine Grenze zur Quantenwelt, die klassische Objekte von solchen trennt, die quantenmechanische Eigenschaften aufweisen? Auf der Suche nach einer Antwort ist es der Arbeitsgruppe von Anton Zeilinger in Wien erstmals gelungen, die Interferenz von Biomolekülen, und zwar Tetraphenyl-

porphyrin $C_{44}H_{30}N_4$ nachzuweisen. Das Fluorofulleren $C_{60}F_{48}$, mit dem ebenfalls Interferenz nachgewiesen wurden, hält zugleich den neuen Rekord hinsichtlich Masse und Komplexität.²⁾ Ziel ist es, diese Experimente auch mit Viren durchzuführen.

■ Michelson-Morley und kein Ende

Über 100 Jahre nach den Experimenten von Michelson und Morley haben Physiker aus Berlin, Konstanz und Düsseldorf mit bislang unerreichter Genauigkeit nachgewiesen, dass die Lichtgeschwindigkeit unabhängig von der Ausbreitungsrichtung ist.³⁾ Eine mögliche Anisotropie beträgt demnach maximal ca. $2 \cdot 10^{-15}$.

1) Y. Takasu et al., Phys. Rev. Lett. **91**, 040404

2) L. Hackermüller et al., Phys. Rev. Lett. **91**, 090408

3) H. Müller et al., Phys. Rev. Lett. **91**, 020401

unterscheidet sich grundsätzlich von früheren Experimenten, in denen die Rotation einer Ferroflüssigkeit in deterministischer Weise, also ohne den Einfluss thermischen Rauschens, durch ein rotierendes Magnetfeld erzeugt wurde.

Für ein weiteres Experiment entwickelten Sven Matthias und Frank

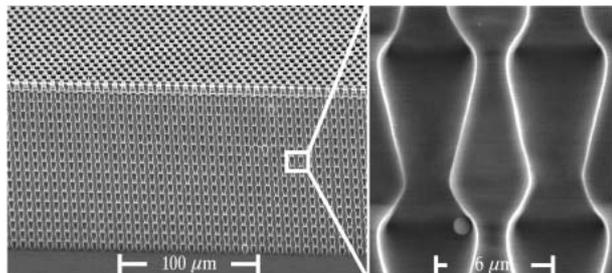


Abb. 3: Die asymmetrisch geätzten Poren in einer Siliziummembran lassen sich nutzen, um kolloidale Teilchen auf eine Seite der Membran zu pumpen.

Müller vom Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik in Halle ein elektrochemisches Ätzverfahren, um asymmetrische Poren in einer Siliziummembran zu formen (Abb. 3) [6]. Eine Mischung aus Mikrometergroßen Plastik-Kügelchen und Wasser füllt den Raum auf beiden Seiten der Membran und wird durch periodische, angelegte Druckschwankungen wechselweise auf-

wärts und abwärts durch die Poren gedrückt. Wie theoretisch vorhergesagt [7], bewirkt die asymmetrische Form der Poren in Kombination mit der thermischen Bewegung der Teilchen, dass zwar das Wasser sich im Durchschnitt nicht bewegt, die Teilchen sich aber auf einer Seite der Membran sammeln. Die etwa

eine Million Poren je Quadratmeter erlauben massiv parallelen Transport und damit Pumpen in relativ großem Maßstab. Abhängig von der Druckamplitude ist der durchschnittliche Teilchenstrom entweder nach unten oder oben gerichtet. Da der Übergang laut Theorie [7] von der Größe abhängt, kann man so im Prinzip verschiedene Teilchen voneinander trennen.

In den beiden hier vorgestellten Experimenten addiert sich die Wirkung einer großen Zahl mikroskopischer Motoren. Der nächste Schritt wird sein, zusätzlich zu dem additiven Verhalten auch noch vorhergesagte Kopplungsphänomene zu beobachten, in denen die kollektive Wirkung Brownscher Motoren zu nicht nur stärkeren, sondern zu qualitativ neuen Effekten führt [2, 4].

HEINER LINKE

- [1] R. D. Astumian und P. Hänggi, *Physics Today*, Nov. 2002, S. 33
- [2] P. Reimann, *Phys. Rep.* **361**, 57 (2002).
- [3] H. Linke (Hrsg.): *Ratchets and Brownian Motors: Basics, Experiments and Applications*, Special issue of *Appl. Phys. A*, Vol. **75** (2), S. 167–352
- [4] F. Jülicher, A. Ajdari und J. Prost, *Rev. Mod. Phys.* **69**, 1269 (1997).
- [5] A. Engel, H. W. Müller, P. Reimann und A. Jung, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 060602 (2003).
- [6] S. Matthias und F. Müller, *Nature* **424**, 53 (2003).
- [7] C. Kettner, P. Reimann und P. Hänggi et al., *Phys. Rev. E* **61**, 312 (2000)

Dr. Heiner Linke,
Physics Department
and Materials Science
Institute, University
of Oregon, USA