

# Max-Planck-Gesellschaft

Presse-Information



PRI B 33 / C 19 / 2003 (75)

3. Juli 2003

**Sperrfrist: Frei ab 2. Juli 2003, 19 Uhr**

## **Brownsche Motoren als molekulare Siebe**

**Max-Planck-Forschern haben ein völlig neues Verfahren entwickelt, das mit hoher Effizienz mikroskopisch kleine Objekte transportieren und trennen kann**

**Die Moleküle in Gasen und Flüssigkeiten sind ständig in Bewegung. Eine große Herausforderung für das neue Gebiet der Nanotechnologie ist das Design und der Bau mikroskopisch kleiner Bauteile, die Energie angesichts dieses unvermeidbaren thermischen Rauschens in gerichtete Bewegung umwandeln können. Jetzt ist es Physikern am Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik in Halle gelungen, ein neuartiges Verfahren zu entwickeln, das die chaotische Brownsche Bewegung der zu separierenden Objekte über einen Ratschenmechanismus in einen gerichteten Teilchenstrom umwandelt (*Nature*, 3. Juli 2003). Die von den Forschern dazu entwickelte Siliziummembran mit Millionen asymmetrisch geformten Poren sind für die Biotechnologie und Medizintechnik von großem Interesse. Sie könnten sich besonders dafür eignen, mikroskopisch kleine Objekte wie Viren oder Zellbestandteile sehr schnell zu transportieren und nach Größe oder Masse zu trennen. Wegen der Möglichkeit eines massiv parallelen Betriebs, des großen Teilchenumsatzes sowie der hohen Präzision und Selektivität für Objekte von einem Zehntel bis einem Mikrometer könnte die neue Trenntechnik weit verbreitet Anwendung finden.**

Im Mikrokosmos ist der Zufall allgegenwärtig. So führen Staubkörnchen in einer Flüssigkeit eine Zitterbewegung aus, die über einen längeren Zeitraum betrachtet völlig regellos und chaotisch ist. Diese Brownsche Bewegung wird durch zufällige Stöße der Teilchen mit den Molekülen der Flüssigkeit verursacht. Seit mehr als drei Jahrzehnten versucht man deshalb, so genannte Brownsche Motoren zu realisieren, die diese Wärmeenergie in mechanische Arbeit umwandeln. Man benutzt dazu ein aus der Technik von Ratschenschraubenziehern oder sich automatisch aufziehenden Armbanduhren bekanntes Prinzip, bei dem ein asymmetrischer Sperrhaken die Bewegung in eine Richtung erlaubt und in die andere verbietet.

Max-Planck-Gesellschaft  
zur Förderung  
der Wissenschaften e.V.  
Referat für Presse- und  
Öffentlichkeitsarbeit

Hofgartenstraße 8  
80539 München

Postfach 10 10 62  
80084 München

Telefon: +49 89 2108 - 1276  
Telefax: +49 89 2108 - 1207

E-Mail: [presse@mpg-gv.mpg.de](mailto:presse@mpg-gv.mpg.de)  
Internet: [www.mpg.de](http://www.mpg.de)

**Pressesprecher:**  
Dr. Bernd Wirsing (-1276)

**Chef vom Dienst:**  
Dr. Andreas Trepte (-1238)

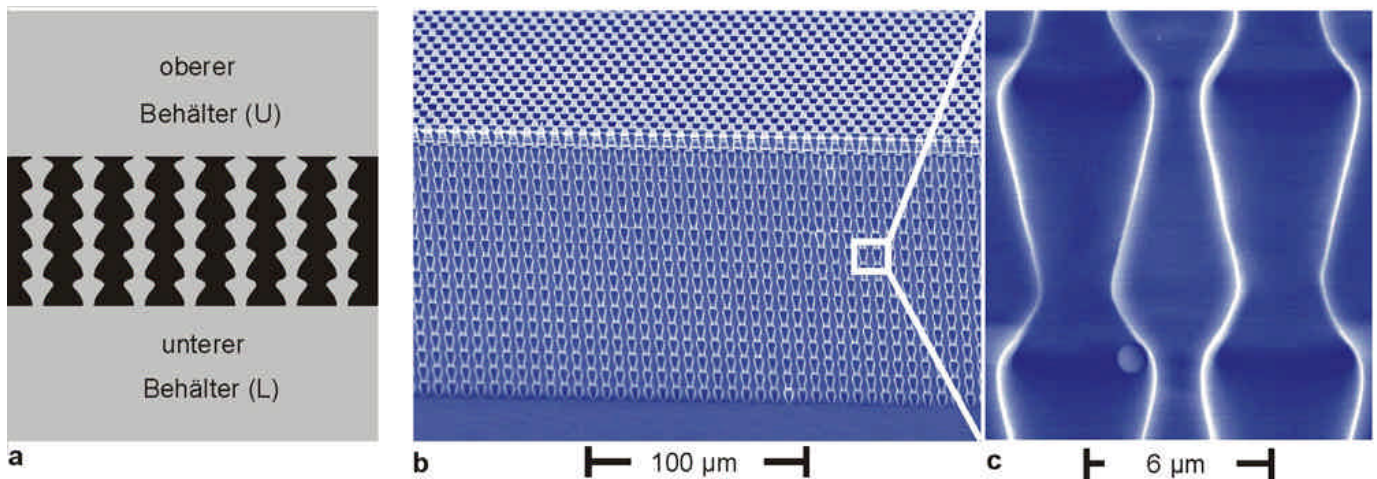
**Biologie, Medizin:**  
Dr. Christina Beck (-1306)

**Chemie, Physik, Technik:**  
Eugen Hintsches (-1257)  
Helmut Hornung (-1404)

**Geisteswissenschaften:**  
Susanne Beer (-1342)

**Online- Redaktion**  
Michael Frewin (-1273)

ISSN 0170-4656

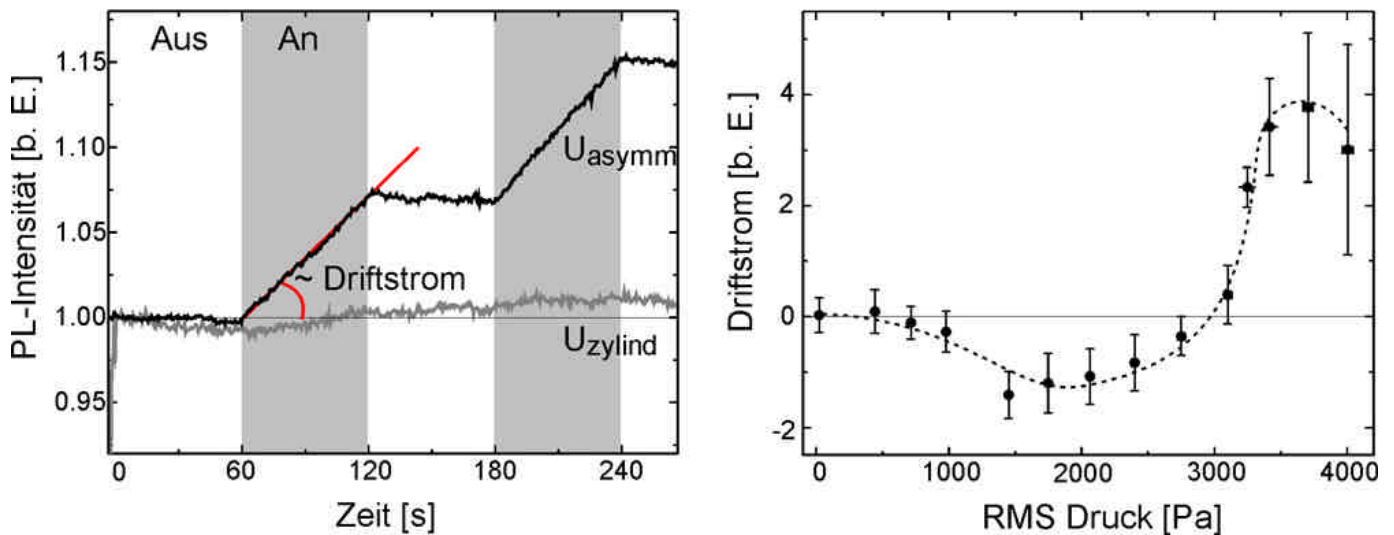


**Abb. 1:** Experimenteller Aufbau, **a:** Schematische Darstellung. Die horizontal eingebaute Membranstruktur mit asymmetrisch moduliertem Porendurchmesser trennt zwei Behälter (U) und (L). **b:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des Querschnitts einer makroporösen Siliziumscheibe. Die Makroporen sind in einem hexagonalen Gitter mit einer Gitterkonstanten von 6 Mikrometern und einer Tiefe von 150 Mikrometern angeordnet. **c:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des Querschnitts einer Membranstruktur aus moduliertem makroporösen Silizium. Nach dem Trocknen kleben die kolloidalen Kügelchen mit einem Durchmesser von 1 Mikrometer an der Oberfläche. Der maximale Porendurchmesser beträgt 4,8 der minimale 2,5 Mikrometer, die Periodenlänge 8,4 Mikrometer. Insgesamt wurden 17 Modulationen geätzt.

Foto: MPI für Mikrostrukturphysik

Doch im Bereich von wenigen Mikrometern muss das Prinzip „Sperrhaken“ auf andere Weise umgesetzt werden. Die Natur hat für dieses Problem in vielen biologischen Systemen, wie dem interzellulären Transport, Lösungen gefunden. Konkret wird die Brownsche Bewegung durch asymmetrisch angeordnete Ladungsverteilungen, die zeitlich variieren, überlagert. Mit diesem Trick gelingt es, die ungerichtete Teilchenfluktuation in eine Richtung zu unterdrücken und auf diese Weise eine gerichtete Bewegung von Partikeln zu ermöglichen. Brownsche Motoren erzeugen also keine Bewegung, sondern verhindern nur, dass sich die Teilchen zurück bewegen.

Auch andere sägezahnförmige Potentialverläufe sollten diese Gleichrichtung zeigen. Einen solchen Mechanismus haben sich die Forscher am Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik in Halle/Saale zu eigen gemacht und ein neues Verfahren entwickelt, bei dem eine gigantische Zahl von Drift-Ratschen gleichzeitig wirken. Dazu ätzen sie in eine Siliziumscheibe mehr als eine Million identische Poren in einem photo-elektrochemischen Prozess, der sehr große Modulationen des Porendurchmessers erlaubt. Die Poren haben ein sägezahnförmiges Profil, dessen Durchmesser ändert sich periodisch mit der Porentiefe (vgl. Abb. 1). Diese siebartige Membran trennt zwei Behälter, die mit Wasser und darin enthaltenen mikroskopisch kleinen Teilchen gefüllt sind. Für ihre Experimente benutzen die Forscher monodisperse Latexkügelchen, die mit einem Farbstoff markiert sind. Die Gesamtzahl der Teilchen im oberen Behälter wird mit Photolumineszenz bestimmt. Befindet sich das Wasser in Ruhe, fluktuieren die Teilchen regellos in alle Richtungen und die Teilchenzahl in beiden Behältern bleibt konstant.



**Abb. 2:** Messergebnisse zum Verlauf der Photolumineszenzintensität (PL-Intensität, proportional zur Zahl der Teilchen im oberen Behälter) über der Zeit für zwei verschiedene Membranstrukturen. Die Druckoszillationen werden alle 60 Sekunden an- und ausgeschaltet. Die “an”-Phasen eines solchen Zykluses sind hellgrau hinterlegt. Die Teilchenzahl ist proportional zur gemessenen Intensität des Photolumineszenzsignals. **a:** Die gemessenen Intensitätsprofile im oberen Behälter für eine Membran aus asymmetrisch modulierten Poren ( $U_{asymm}$ ) und in einem zweiten Experiment mit zylindrischen Poren ( $U_{zyliind}$ ), bei einem angelegten mittleren Druck während der “an”-Phase von 2000 Pa (RMS), einer Oszillationsfrequenz von 40 Hz und einem Teilchendurchmesser von 0,32 Mikrometer. Man erkennt deutlich, dass die Teilchenzahl während der “an”-Phasen für die Membran aus asymmetrisch geformten Poren nahezu linear anwächst, während sie innerhalb der “aus”-Phasen konstant bleibt. Für zylindrisch geformte Poren tritt hingegen kein Transport auf. Der Anstieg der Teilchenzahl innerhalb der “an”-Phase ist proportional zum Driftstrom. **b:** Driftstrom berechnet aus experimentellen Resultaten des Teilchentransports als Funktion der angelegten Druckamplitude. Der Transport von Teilchen mit einem Durchmesser von 0,1 Mikrometern verschwindet für sehr kleine Drücke und bei sehr großen Amplituden. Bei einem Druck von 3000 Pa (RMS) kehrt der Driftstrom sein Vorzeichen um. Die Transportrichtung kann folglich durch die von außen angelegte Amplitude der Druckoszillationen umgekehrt werden.

Foto: Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik

Wird dann das Wasser mit den Partikeln periodisch (40 Hz) durch die asymmetrischen Poren hin und her bewegt, treten ganz neue Effekte auf. Die besondere Kanalform erzwingt ein asymmetrisches – ratschenförmiges - Strömungsprofil, das ständig seinen Betrag und seine Richtung ändert und mit den mikroskopischen Teilchen wechselwirkt. Während sich das Wasser - im zeitlichen Mittel über eine Periode - nicht bewegt, erfahren die Teilchen einen Nettotransport. Die Max-Planck-Forscher wiesen nach, dass die Überlagerung der thermischen Fluktuationen mit einer periodischen Störung in asymmetrischen Kanälen einen systematischen Teilchendrift generiert (Abb. 2a).

Dieses System, das scheinbar verlustfrei Wärmeenergie in mechanische Arbeit umformt, ist jedoch kein *perpetuum mobile*. Denn das Kunststück funktioniert nur dann, wenn den „Brownschen Motoren“ Energie von außen - über die periodische Störung des Wasser-Teilchen-

Systems - zugeführt wird. Fernab des Gleichgewichts ist der zweiten Hauptsatz der Thermodynamik nicht mehr anwendbar. Erstaunlich bleibt der Transport der Teilchen trotzdem – denn anders als bei herkömmlichen Motoren sind für eine gerichtete Bewegung weder eine Nettokraft noch ein chemisches Konzentrationsgefälle oder ein Temperaturgradient erforderlich.

In einem zweiten Experiment (Abb. 2b) konnten die Forscher beobachten, wie die Amplitude der Oszillationen die Transportrichtung der Teilchen beeinflusst. Die Amplitude dieser Oszillation ist proportional zum angelegten Druck. Bei kleinen Amplituden driften die Teilchen zum kurzen Ende der Modulation in den Poren (in Abb. 1 nach oben). Bei großen Amplituden erfolgt ein Transport zum langen Ende der Modulation (in Abb. 1 nach unten). Diese Ergebnisse stimmen mit theoretischen Simulationen überein, die zudem vorhersagen, dass die Transportrichtung auch stark vom Teilchendurchmesser abhängt.

Das neue Verfahren ermöglicht durch den gleichzeitigen millionenfach parallelen Betrieb, winzige Partikel in relativ großer Zahl und vertretbarer Zeit zu sortieren. Die Max-Planck-Forscher sind überzeugt, dass dieses Verfahren es ermöglicht, auch empfindliche biologische Objekte, wie Viren oder Zellfragmente, auf kleinstem Raum voneinander zu trennen. Im Vergleich zu den weitverbreiteten Elektrophorese-Trenn-Techniken arbeitet das neue Verfahren potentiell schneller und kann zudem wiederverwendet werden. Die Teilchen verbleiben in Lösung, im Gegensatz zu den für die Elektrophorese erforderlichen Gel- oder Polymerlösungen. Gerade im Bereich von 0,1 bis 1 Mikrometer hat das Verfahren eine sehr hohe Auflösung.

Ein großer Vorteil des neuen Verfahrens ist die Möglichkeit, es mehrstufig und massiv parallel zu betreiben, was eine sehr effiziente Trennung und einen sehr großen Durchsatz erwarten lassen. Darüber hinaus können damit kontinuierlich Objekte transportiert werden, die deutlich kleiner sind als der Durchmesser der Millionen Filterlöcher. Damit wird ein Verstopfen unwahrscheinlich. Zudem kann über die Steuerung der Amplitude der Oszillation von außen definiert werden, welche Teilchen den Filter passieren.

Aufgrund der weit entwickelten elektronischen und mikromechanischen Technik zur Siliziumverarbeitung gehen die Forscher davon aus, dass sich die neue Technik in „Lab on a Chip“- Systeme integrieren lässt. Wegen der winzigen Dimensionen dieser Systeme ist der Einfluss des thermischen Rauschens unbestritten. In solchen hoch-integrierten Systemen kann das neue Verfahren seine Vorteile voll entfalten, weil langsame Diffusionsprozesse nicht mehr behindert und die Geschwindigkeit und Empfindlichkeit derartiger Komponenten beträchtlich erhöht werden könnte.

[AT]

### **Originalveröffentlichungen:**

Sven Matthias & Frank Müller

**Asymmetric pores in a silicon membrane acting as massively parallel brownian ratchets**

Nature, Vol. 424, 53-57, 3 July 2003

Vorarbeiten:

Christiane Kettner, Peter Reimann, Peter Hänggi, and Frank Müller

**Drift Ratchet**

Physical Review E, Vol. 61, Number 1, 312-323, January 2000

F. Müller, A. Birner, J. Schilling, U. Gösele, Ch. Kettner, and P. Hänggi

**Membranes for Micropumps from Macroporous Silicon**

Phys. Stat. Sol. (a), Vol. 182, 585-590, 2000

**Verwandte Links:**

[1] **Simulation eines Brownschen Motors im Internet:**

<http://monet.physik.unibas.ch/~elmer/bm/>

**Weitere Informationen erhalten Sie von:**

Dr. Frank Mueller

Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik

Weinberg 2, D-06120 Halle, Germany

Tel.: 0345 5582 - 725

Fax.: 0345 5511223

E-Mail: [Frank.Mueller@mpi-halle.mpg.de](mailto:Frank.Mueller@mpi-halle.mpg.de)

Internet: <http://www.mpi-halle.mpg.de/~fmuel>