

## Ritsch, ratsch – sortiert!

Asymmetrisch gebaute Nanofluidikkanäle erzeugen elektrostatische Potentiale, die Nanokolloide gerichtet transportieren und nach ihrer Größe sortieren.

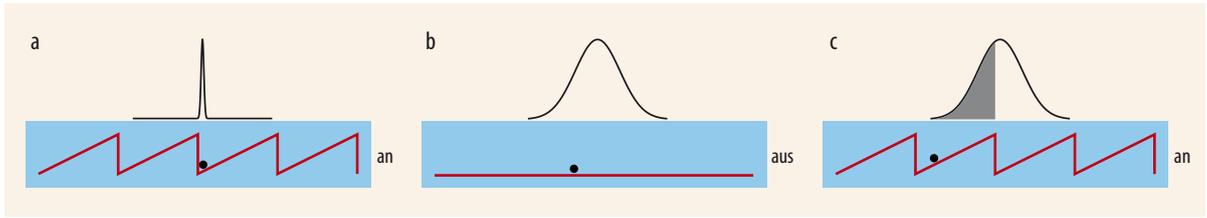


Abb. 1 Das einfachste theoretische Konzept einer Ratsche beruht darauf, dass ein Teilchen (a, schwarzer Punkt) zunächst in einem Potential (rot) lokalisiert

ist (schwarze Kurve). Nach Abschalten des Potentials bewegt es sich durch thermische Fluktuationen ungerichtet im Raum (b) und wird beim erneuten

Anschalten mit signifikanter Wahrscheinlichkeit (grau) in das nächste Potentialminimum geschoben.

#) Online nachzulesen unter: [www.feynmanlectures.caltech.edu/I\\_46.html](http://www.feynmanlectures.caltech.edu/I_46.html)

Das Konzept einer „Brownschen Ratsche“ lässt sich in Richard Feynman’s berühmten *Lecture Notes* kennenlernen [1]. Feynman erläutert anhand des Gedankenexperiments „Ratchet and pawl“<sup>(#)</sup> wie die Kombination räumlicher Asymmetrie, die den asymmetrischen Zähnen einer mechanischen Ratsche ähnelt, und thermischen Nichtgleichgewichts dazu führt, aus ungerichteten thermischen Fluktuationen gerichteten Transport zu erzielen oder gar Arbeit zu verrichten. Doch erst wegweisende Arbeiten der frühen 1990er-Jahre sorgten dafür, dass solche „Brownschen Ratschen“ oder „Brownschen Motoren“ ein eigenständiges Forschungsfeld der Statistischen Physik wurden [2]. Seitdem hat sich das Feld rasant entwickelt – durch unzählige theoretische und experimentelle Arbeiten [2 – 4].

Eines der einfachsten theoretischen Ratschenkonzepte ist die so

genannte On-Off-Ratsche (Abb. 1). Ein räumlich periodisches Potential in einer Dimension wird dabei zeitlich immer wieder ein- und ausgeschaltet. Dieser periodische Antrieb richtet die diffusive Brownsche Bewegung eines Teilchens aus. Daraus ergibt sich eine Nettobewegung.

Ein solcher Ratscheneffekt tritt praktisch immer auf, sobald die räumliche oder zeitliche Symmetrie gebrochen ist und sich das System fern vom thermischen Gleichgewicht befindet. Dann hängt die Transportrichtung im Detail davon ab, wie die Symmetrien gebrochen werden und wie der Nichtgleichgewichtsantrieb realisiert wird [2]. Dazu bedarf es nicht unbedingt zweier Wärmebäder mit unterschiedlichen Temperaturen wie in Feynman’s Fall. Die On-Off-Ratsche kommt mit einem Wärmebad aus, falls das Teilchen darin nicht ins Gleichgewicht kommt: Der zyklische Prozess gewinnt Arbeit aus dem

Wärmebad. Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik ist nicht verletzt, weil sich das gesamte System in einem permanenten Nichtgleichgewichtszustand befindet.

Brownsche Ratschen ermöglichen es somit, kolloidale Suspensionen in Mikro- oder Nanofluidikkanälen gezielt zu manipulieren [4, 5]. Dazu bedarf es aber Strukturen, die mit Teilchen von einigen Mikrometern Durchmesser arbeiten können, zum Beispiel mikrostrukturierte Flüssigkeitskanäle von einigen 10 bis 100  $\mu\text{m}$  Größe. Die optischen und dielektrophoretischen Kräfte, die in solchen Mikrofluidik-Ratschen bisher angewendet wurden [4], skalieren mit dem Teilchenvolumen. Sie reichen daher auf der Nanoskala nicht mehr aus, um mit dem thermischen Rauschen zu konkurrieren.

Nun ist es einem Team von Forschern bei IBM Zürich gelungen, erstmals eine effiziente Fluidik-Ratsche für Nanokolloide zu bauen [6]. Die IBM-Forscher verwenden elektrostatische Potentiale, die mit der Teilchenoberfläche skalieren und auch auf der Nanoskala noch ausreichend ausgeprägt sind. Um diese Potentiale zu erzeugen, nutzen sie aus, dass sich in Mikro- und Nanofluidikkanälen an der Grenzschicht zwischen Festkörper und Flüssigkeit, also an Kanalwänden und Kugeloberflächen, elektrische Ladungen in der so genannten elektrischen Doppelschicht ansammeln [7]. Die Kanäle besitzen eine asymmetrische Geometrie (Abb. 2a), welche die elektrostatische Wech-

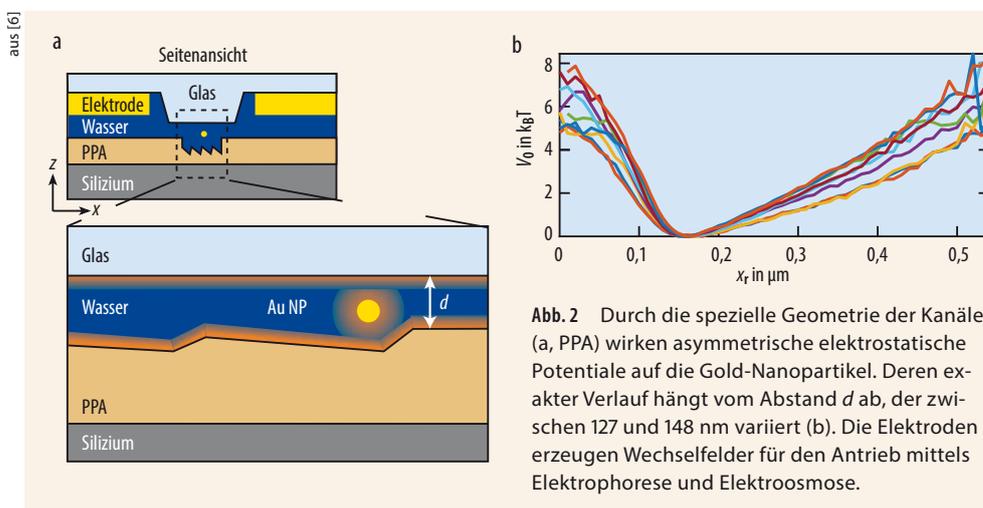
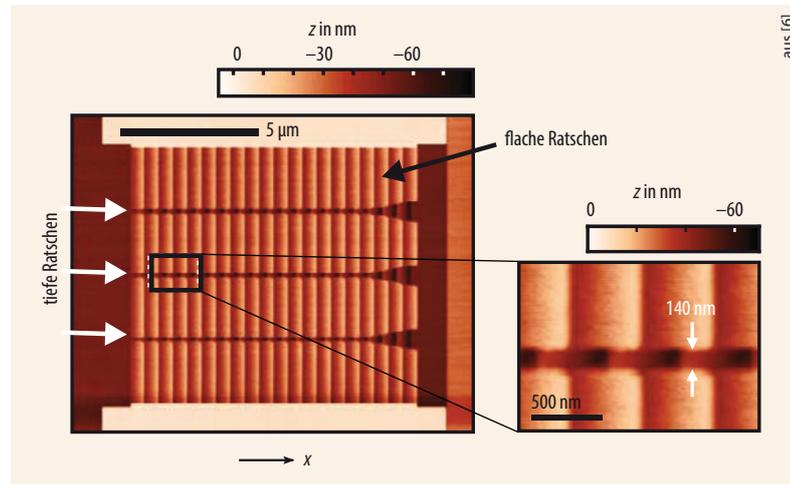


Abb. 2 Durch die spezielle Geometrie der Kanäle (a, PPA) wirken asymmetrische elektrostatische Potentiale auf die Gold-Nanopartikel. Deren exakter Verlauf hängt vom Abstand  $d$  ab, der zwischen 127 und 148 nm variiert (b). Die Elektroden erzeugen Wechselfelder für den Antrieb mittels Elektrophorese und Elektroosmose.

selwirkung zwischen Kanalwand und Teilchen in ein räumlich asymmetrisches Potential „übersetzt“ (Abb. 2b). Zusätzlich verwenden die Forscher die Oberflächenladungen, um mittels externer elektrischer Wechselfelder den notwendigen Nichtgleichgewichtsantrieb zu realisieren. Hier spielen Elektrophorese und Elektroosmose eine Rolle [7]. Auf diese Weise gelang es, Goldkügelchen mit 60 nm Durchmesser mit Geschwindigkeiten um die 10  $\mu\text{m/s}$  mittels des Ratscheneffekts durch die Nanokanäle zu transportieren.

Während es nach wie vor von Interesse ist, Ratschen als Nichtgleichgewichtssysteme grundlegend zu verstehen, zielt die anwendungsorientierte Forschung darauf ab, sie als Teilchensortierer auf der Mikrometerskala und darunter nutzbar zu machen. Daher haben die Forscher als zweiten Schritt einen Trennapparat entwickelt. Dessen Funktion beruht auf zwei verschiedenen Ratschen-Topographien, deren Kombination sich in der geometrischen Struktur des Nanofluidikkanals wiederfindet (Abb. 3). Eine flache, breite Ratschenstruktur transportiert die kleineren Kügelchen nach links, während gleichzeitig eine tiefe, schmale Ratschenstruktur die größeren Kügelchen nach rechts befördert. Dabei ist die tiefe Struktur in die flachere eingelassen. Damit gelang es, eine



**Abb. 3** Gold-Nanopartikel verschiedener Größe lassen sich mit einem System trennen, das zwei Ratschen unterschiedlicher Topographie kombiniert. Tiefe, schmale Kanäle (weiße Pfeile) sind dabei

in breite, flache Strukturen eingelassen. Größere Partikel (Durchmesser: 100 nm) bewegen sich in der tiefen Ratsche nach links, kleinere (Durchmesser: 60 nm) in der flachen Struktur nach rechts.

Mischung aus Goldkügelchen mit Durchmessern von 60 und 100 nm innerhalb weniger Sekunden mit hoher Effizienz aufzutrennen.

Eine Brownsche Ratsche experimentell zu verwirklichen, die solch winzige Objekte gezielt manipulieren kann, ist ein entscheidender Schritt in der kontrollierten Ausnutzung thermischen Rauschens. Dies kommt sowohl der Grundlagenforschung als auch technologischen Anwendungen wie dem „Lab on a chip“ zugute [8]. So könnte die neue Entwicklung dazu beitragen, so genannte „point-of-care devices“ für die patientennahe Labordiagnostik oder für bio- und

umweltchemische Analysegeräte zu realisieren.

**Ralf Eichhorn**

**Dr. Ralf Eichhorn**,  
Nordic Institute for  
Theoretical Physics,  
Roslagstullsba-  
cken 23, 106 91 Stock-  
holm, Schweden

- [1] R. P. Feynman et al., Feynman lectures on physics, Vol. 1, Addison-Wesley, Boston (1963)
- [2] P. Reimann, Phys. Rep. **361**, 57 (2002)
- [3] S. Denisov, S. Flach und P. Hänggi, Phys. Rep. **538**, 77 (2014)
- [4] D. Cubero und F. Renzoni, Brownian Ratchets, Cambridge University Press (2016)
- [5] S. Matthias und F. Müller, Nature **424**, 53 (2003)
- [6] M. J. Skaug et al., Science **359**, 1505 (2018)
- [7] H. Bruus, Theoretical microfluidics, Oxford University Press (2008)
- [8] D. Rosamund und F. Joshua, Nature **442**, 367 (2006)

ISBN: 978-3-527-33007-2.  
November 2012  
906S. mit 1200 Abb., davon 800 in Farbe  
Gebunden € 79,-

# DER CALLISTER JETZT AUCH AUF DEUTSCH KANN'S

W. D. CALLISTER  
D. G. RETHWISCH

Übersetzungsherausgeber:  
M. Scheffler

**Materialwissenschaften  
und Werkstofftechnik**  
Eine Einführung

Der „Callister“ bietet für Hauptfachstudenten an Universitäten und Fachhochschulen den gesamten Stoff der Materialwissenschaften für den Bachelor und das beginnende Masterstudium.

Das Buch ist auch perfekt als Lehrbuch in Wahlpflichtvorlesungen für Nebenfachstudenten geeignet.

Wiley-VCH • Tel. +49 (0) 62 01-606-400 • E-Mail: service@wiley-vch.de  
Irrtum und Preisänderungen vorbehalten. Stand der Daten: Dezember 2013

**WILEY-VCH**