

Brownsche Motoren

Wie aus Brownscher Bewegung makroskopischer Transport wird

R. Bartussek und P. Hänggi

Eine Fragestellung aus der Zellbiologie hat auch Physiker infiziert: Die Biologen wollen klären, warum entlang einer periodischen Struktur (Mikrotubulus) gerichtete Bewegung auftritt, ohne daß eine makroskopische Kraft, ein Konzentrations- oder Temperaturgradient vorliegt. Die von den Physikern zur Erklärung vorgeschlagenen Modelle sollten auch in vielen anderen Bereichen nützlich sein, wie zum Beispiel bei der Separation unterschiedlicher Teilchen. Rauschkraften aller Art sind dabei die wichtigsten Faktoren.

In der Zellbiologie spielt sich vieles in einem Größen- und Temperaturbereich ab, in dem Fluktuationen eine dominante Rolle spielen: Ungeordnete, Brownsche Bewegung ist allgegenwärtig. Für viele lebenswichtige Prozesse aber, wie etwa bei der Muskelkontraktion, ist gerichtete Bewegung notwendig. Ist es nun möglich, daß gerichtete Bewegung von der ungeordneten profitiert, das Rauschen also eine konstruktive Rolle übernimmt oder gar die gerichtete Bewegung selbst induziert? Eine solche konstruktive Wirkung hat man bereits bei der Detektion und Übertragung von schwachen Signalen gefunden („Stochastische Resonanz“) [1], warum also nicht auch beim Transport auf mikroskopischen Größenskalen. In der Tat sind mittlerweile mehrere solche Mechanismen vorgeschlagen und auch experimentell verwirklicht worden [2,3].

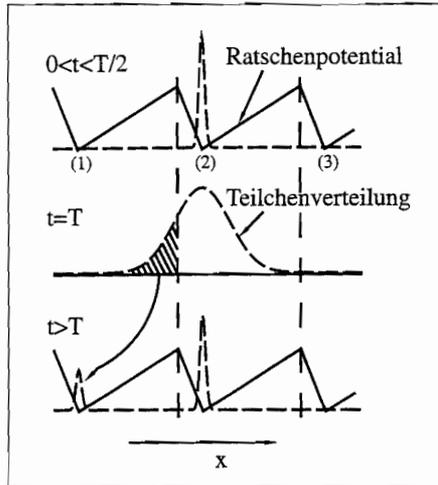


Abb. 1: In der Ein-Aus-Ratsche wird eine Verteilung, die bei eingeschaltetem Potential ($0 < t < T/2$, $T =$ Periodendauer des An-Aus-Schaltens) zuerst in Minimum (2) lokalisiert ist, nach dem Ausschalten des Potentials bei $t = T/2$ frei diffundieren. Nach Wiedereinschalten des Ratschenpotentials bei $t = T$ wird ein Teil der Verteilung im links benachbarten Potentialminimum (1) lokalisiert, in das rechts benachbarte Minimum (3) gelangt jedoch kaum etwas. Dadurch ergibt sich ein mittlerer Strom nach links.

Alle Mechanismen, die aus Brownscher Bewegung eine gerichtete Bewegung machen, haben eines gemeinsam: Die zu separierenden Teilchen bewegen sich entlang eines periodischen Potentials, dessen räumliche Reflexionssymmetrie gebrochen ist. Dies bedeutet konkret, daß das Potential z. B. eine lange, flach ansteigende Flanke und eine kurze, steil abfallende besitzt. Ein solches Potential wird „Ratchet“-Potential genannt, abgeleitet vom englischen Wort für „Ratsche“. Auf einer solchen Struktur ist es schwieriger, sich in Richtung der steilen Flanke fortzubewegen, dafür ist dies der kürzere Weg über den Berg. Eine alltägliche Realisierung davon sind der Ratschen-Schraubenschlüssel oder der Sperrmechanismus in einem Uhrwerk.

Die andere Zutat zum Transportmechanismus stellt der Einfluß des Rauschens dar, das auf einer mikroskopischen Längenskala z. B. von den immer anwesenden thermischen Fluktuationen der Umgebung verursacht wird. Im physikalischen Modell kann dies am einfachsten durch eine weiße Rauschkraft modelliert werden.

Diese beiden Ingredienzien genügen jedoch noch nicht, um einen makroskopischen Strom zu erhalten. Dafür sind zusätzlich Korrelationen erforderlich. Dies soll heißen, daß sich zumindest eine der Komponenten im Modell – das Potential oder das Rauschen – zeitlich korreliert ändert. Dadurch befindet sich das System nicht mehr im thermischen Gleichgewicht, der zweite Hauptsatz der Thermodynamik wird hier also außer Kraft gesetzt.

Die wohl einfachste Möglichkeit, eine solche Korrelation einzubauen und damit einen Strom zu erhalten, besteht darin, das Potential bei konstant gehaltener Rauschstärke periodisch ein- und auszuschalten. Dies ist in Abbildung 1 verdeutlicht: Bei eingeschaltetem Potential sammeln sich die Teilchen im Minimum, nach dem Ausschalten des Potentials diffundieren sie frei. Beim anschließenden Wiedereinschalten des Potentials wird ein größerer Teil der Teilchen im links benachbarten Minimum gefangen als im rechts benachbarten, d. h. im Mittel bewegen sich die Teilchen nach links. Dieser Transport funktioniert allerdings nur bei mittleren Ein-Aus-Schaltzeiten: Wird die Schaltzeit sehr groß oder klein, so verschwindet auch der makroskopische Strom. Ein solcher Transportmechanismus wurde inzwischen mehrfach experimentell verwirklicht, zuletzt in einem optischen „Ratschenpotential“ [3].

Eine andere Möglichkeit, Korrelationen einzubringen, setzt ebenfalls am Potential an: Wird das Potential periodisch mal zur einen, mal zur anderen Seite gekippt, jedoch im Mittel gleich stark und gleich

Dipl.-Phys. Roland Bartussek und Prof. Dr. Peter Hänggi, Universität Augsburg, Institut für Theoretische Physik, Memminger Str. 6, D-86135 Augsburg.

lange zur jeder Seite, so tritt wieder gerichtete Bewegung auf. Dies ist auch hier anschaulich leicht zu verstehen (Abbildung 2): Das Potential muß zur einen Seite weniger geneigt werden, damit die Potentialminima verschwinden, als zur anderen. Ist das periodische Kippen gerade so stark, daß die Minima zur einen Seite verschwinden, zur anderen aber nicht, so tritt Strom auf. Dazu ist noch kein Rauschen erforderlich – allerdings zeigt sich mit Rauschen ein neuer, unerwarteter Effekt, der anschaulich nicht klar ist: Wird das Potential genügend schnell hin- und hergekippt, so findet man aus numerischen Rechnungen für ein überdämpftes Teilchen, daß bei kleinen Kippamplituden und bei kleinen Rauschstärken (d. h. Temperaturen) die *Richtung des Stromes sich umkehrt!* [4]

Mit dieser „falschen“ Richtung fließt der Strom dorthin, wo er auch in der obigen Ein-Aus-Ratsche fließt. Wie neueste Rechnungen zeigen, tritt dieses Phänomen ebenfalls für ein unterdämpftes Teilchen auf, wenn dessen Masse variiert wird. Der große Vorteil für die Separation unterschiedlicher Teilchen in einer solchen „Rüttelratsche“ liegt also darin, daß die Richtung des Transportes für verschiedene Teilchensorten unterschiedlich sein kann. Ein experimenteller Nachweis der Stromumkehr in der „Rüttelratsche“ steht bislang noch aus.

Die dritte Möglichkeit, Korrelationen einzubringen, stellt nun das Rauschen dar. Denn nur im Fall von weißem Rauschen und zusätzlicher Gaußscher Verteilung der Rauschwerte hängt die Rate, mit der ein Teilchen einen Potentialberg überwindet, allein von der Höhe dieses Berges ab. Dies trifft nicht mehr zu, wenn das Rauschen als „farbig“ angenommen werden muß, was bedeutet, daß im Gegensatz zu weißem Rauschen die Rauschkraft zu verschiedenen Zeitpunkten miteinander korreliert sind (Abbildung 3). Ob in einem experimentellen System die Fluktuationen als weißes oder farbiges Rauschen behandelt werden müssen, hängt unter anderem von dem Verhältnis zwischen den Zeitskalen der Umgebungsfuktuationen und der Teilchenbewegung ab. Die Möglichkeit, gerichtete Bewegung aus farbigem Rauschen zu gewinnen, ist wohl die Verblüffendste: *Rauschen führt zu Transport* auf einem zeitlich konstanten Ratschenpotential!

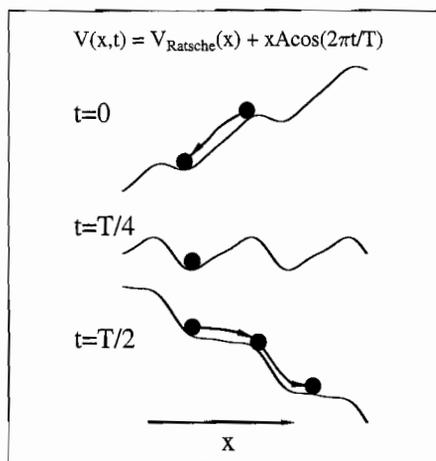


Abb. 2: In der Rüttelratsche wird das Potential periodisch gekippt: Ein überdämpftes Teilchen wird in der nach links gekippten Ratsche im nächsten Potentialminimum aufgehalten ($t=0$). Eine halbe Periode später ($t=T/2$), wenn das Potential genauso weit zur anderen Seite geneigt ist, kann sich das Teilchen ungehindert nach rechts bewegen, denn aufgrund der Asymmetrie der Ratsche sind hier die Potentialminima verschwunden

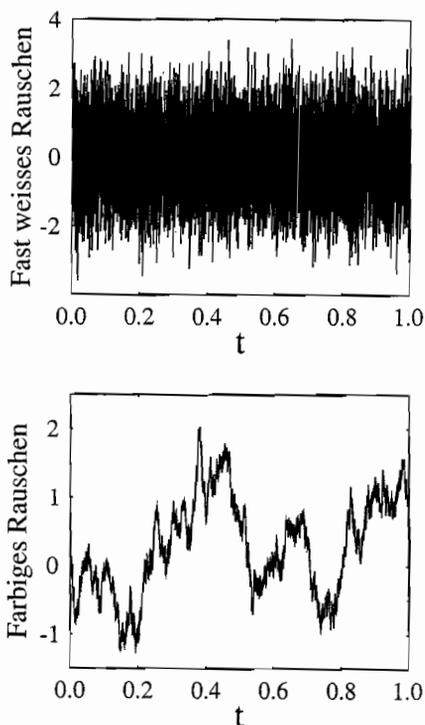


Abb. 3: Beinahe weißes Rauschen wird mit farbigem Rauschen („Ornstein-Uhlenbeck-Prozess“) verglichen: Wird ein Teilchen in einem Ratschenpotential von weißem Rauschen getrieben, so bewegt sich das Teilchen im Mittel nicht. Mit farbigem Rauschen dagegen läuft das Teilchen in eine Vorzugsrichtung.

Alle vorgestellten Ratschenmechanismen können experimentell realisiert werden: Es wurde bereits eine Ratsche aus christbaumförmigen Elektroden gebaut und kürzlich auch eine optische Ratsche, die ein Teilchen auf einem Kreis von nur 7 μm Durchmesser führt – ein „optischer Ratschen-Schraubenschlüssel“. Eine weitere Möglichkeit zur Realisierung wäre, das Ratschenpotential als Übergitter auf einer Halbleiterschicht aufzubauen. Damit lassen sich mit den gängigen Methoden der Halbleitertechnologie Brownsche Gleichrichter, Pumpen oder Fallen für geladene wie auch für neutrale Teilchen im Nanometerbereich herstellen: Wird beispielsweise ein Ratschenpotential zu einer Spirale aufgewickelt, so erhält man eine Teilchenfalle.

Die Vorteile von Separationsmechanismen auf der Basis thermischer Ratschen liegen auf der Hand: Es muß kein konstantes Feld von außen angelegt werden, das unter Umständen die zu trennenden Teilchen beschädigt. Darüber hinaus werden die Partikel äußerst effektiv getrennt, da die mittlere Geschwindigkeit einer Teilchensorte in der Ratsche exponentiell von deren Diffusionskoeffizienten abhängt und damit von Faktoren wie der Teilchengröße oder -masse. In der Rüttelratsche hat man zusätzlich die Möglichkeit, durch einen leicht kontrollierbaren äußeren Parameter (die Rüttelfrequenz) die Stromrichtung der Teilchen vorzugeben; so können unterschiedliche Teilchen dazu gebracht werden, in unterschiedliche Richtungen zu laufen.

Thermische Ratschen bieten somit die beste Grundlage, um neue Separationsmechanismen auf mikroskopischen oder kleineren Längenskalen zu realisieren. Sie sind ein weiteres Beispiel für ein System, in dem Rauschen kein negativer Einfluß ist, sondern einen konstruktiven Beitrag leistet.

Literatur

- [1] P. Jung u. P. Hänggi, Phys. Bl. 47, 1005 (1991).
- [2] S. Leibler, Nature 370, 412 (1994).
- [3] L. P. Faucheux, et. al., Phys. Rev. Lett. 74, 1504 (1995).
- [4] R. Bartussek, P. Hänggi u. J. G. Kissner, Europhys. Lett. 28, 459 (1994).