

## Die Kanalisierung des Zufalls

### Wie aus thermischen Fluktuationen eine gerichtete Bewegung wird

Die Moleküle eines Gases oder einer Flüssigkeit sind ständig in Bewegung. In den letzten Jahren haben Physiker «Motoren» entwickelt, mit denen sich diese ungeordnete Bewegung kanalisieren lässt. Das verspricht neuartige Methoden zum Transport von kleinen Partikeln und könnte darüber hinaus zu einem besseren Verständnis von molekularen Motoren in lebenden Organismen beitragen.

*Spe.* Im Mikrokosmos ist der Zufall allgegenwärtig. So führt ein Staubkörnchen in einer Flüssigkeit eine Zitterbewegung aus, die über einen längeren Zeitraum betrachtet völlig regellos ist. Albert Einstein erkannte als Erster, dass diese Bewegung durch zufällige Stösse des Teilchens mit den Molekülen der Flüssigkeit verursacht wird. Das Ansinnen, diese «Brown'sche Bewegung» durch eine Art Motor gleichzurichten, aus einer ungeordneten Bewegung also eine gerichtete Bewegung zu machen, klingt verdächtig nach dem Versuch, die Entropie eines abgeschlossenen thermodynamischen Systems zu verringern. Das aber ist nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik verboten.

#### Transport ohne Kraft

Dennoch ist es Physikern in den letzten Jahren gelungen, Teilchen, die sonst ziellos umherirren, über makroskopische Distanzen zu befördern. Die Physik muss deshalb nicht umgeschrieben werden. Denn das Kunststück gelingt nur dann, wenn den «Brown'schen Motoren» von aussen Energie zugeführt wird. Diese äussere Energiezufuhr verhindert, dass sich im System ein thermisches Gleichgewicht einstellt. Fernab des Gleichgewichts ist aber der zweite Hauptsatz der Thermodynamik nicht mehr anwendbar, so dass von dieser Seite her keine Einwände mehr gegen eine Gleichrichtung der Brown'schen Bewegung bestehen. Erstaunlich bleibt der Transport der Teilchen über makroskopische Distanzen gleichwohl. Denn anders als bei herkömmlichen Motoren ist für die gerichtete Bewegung weder eine Nettokraft noch ein chemisches Konzentrationsgefälle oder ein Temperaturgradient erforderlich.

Die Funktionsweise der Brown'schen Motoren hat gewisse Ähnlichkeiten mit einer Ratsche. Bewegt man einen Ratschen-Schraubenzieher abwechselnd nach rechts und nach links, sorgt ein sägezahnförmiges Zahnrad dafür, dass nur Rechtsdrehungen in eine Bewegung der Schraube umgesetzt werden. Auch Brown'sche Motoren basieren auf einem periodischen Potenzial mit eingebauter Asymmetrie. Im Mikrokosmos mit seinen regellosen Bewegungen sind die Verhältnisse jedoch etwas komplizierter als in der makroskopischen Welt. Schon Richard Feynman konnte mit einem Gedankenexperiment zeigen, warum ein sägezahnförmiges Potenzial *alleine* nicht ausreicht, um die Brown'sche Zitterbewegung von Teilchen gleichzurichten. Erst wenn zum sägezahnförmigen Potenzial eine Energiezufuhr von aussen hinzukommt, beginnen die Brown'schen Motoren ihr Werk.

Der ausgefallene Transportmechanismus der Brown'schen Motoren lässt sich an einer Flüssigkeit mit suspendierten Teilchen illustrieren. Mit einer Anordnung von streifenförmigen Elektroden auf einem Glasträger lässt sich leicht ein sägezahnförmiges Potenzial erzeugen. Die Energiezufuhr von aussen erfolgt im einfachsten Fall durch ein An- und Ausschalten des Potenzials (siehe Graphik). Die in einem Minimum des Potenzials konzentrierten Teilchen breiten sich während der Aus-Phase ungestört und regellos in alle Richtungen aus. Schaltet man das asymmetrische Potenzial nun wieder an, werden mehr Teilchen ins linke als ins rechte Minima rutschen. Durch wiederholtes An- und Ausschalten des

Potenzials werden die Teilchen von Minima zu Minima weitergereicht. Obwohl sich also die auf die Teilchen wirkenden Kräfte entlang des Weges wegmitteln, resultiert aus der Zufallsbewegung ein Strom, mit dem sich sogar Arbeit gegen eine äussere Last verrichten lässt.

Anstatt das Sägezahnpotenzial an- und auszuschalten, kann man es auch periodisch mal nach links und mal nach rechts kippen. Auch mit dieser «Schaukelratsche» lassen sich Teilchen transportieren. Allerdings fliessen sie nun in Richtung der flach ansteigenden Flanke des Potenzials, weil diese beim Kippen weniger stark geneigt werden muss, um den Teilchen den Übergang in ein benachbartes Minimum zu ermöglichen.

In den letzten Jahren haben sich Physiker vor allem damit beschäftigt, Anwendungen für diesen neuartigen Transportmechanismus zu finden. Ideen gibt es mehr als genug. So schweben Peter Hänggi von der Universität Augsburg, einem der Pioniere der Brown'schen Motoren, Verfahren zur Separation von mikroskopisch kleinen Partikeln vor. Man macht sich dabei zunutze, dass die Geschwindigkeit, mit der die Teilchen entlang eines sägezahnförmigen Potenzials wandern, von ihrer Grösse bzw. ihrer Masse abhängt. Bei den Partikeln kann es sich beispielsweise um Makromoleküle, um DNA-Bruchstücke oder Zellen in wässriger Lösung handeln. Erste Experimente weisen drauf hin, dass Brown'sche Motoren ihre Aufgabe mit der gleichen Zuverlässigkeit, aber flinker erledigen als herkömmliche Trennverfahren auf der Basis von Gelen oder Zentrifugen. Ein Traum wäre es für Hänggi, wenn es eines Tages gelänge, kranke Zellen ohne Pharmazeutika von gesunden Zellen zu separieren.

Solche Anwendungsmöglichkeiten werden heute zwar willkommen geheissen, sie waren jedoch nicht der eigentliche Grund, sich mit Brown'schen Motoren zu beschäftigen. Der Anstoss hierzu kam aus der Biologie. Schon lange nämlich fragen sich Biologen, wie es Organismen schaffen, aus chemischer Energie eine gerichtete Bewegung zu machen. Das vielleicht bekannteste Beispiel ist der Aktin-Myosin-Motor, der für die Kontraktion von Muskeln sorgt. In diesem molekularen Motor handeln sich Myosin-Fasern an Aktin-Fasern mit einer asymmetrischen periodischen Struktur entlang und verkürzen so den Muskel.

Bei den winzigen Energien, die ein Motor dieser Grösse umsetzt, ist der Einfluss des thermischen Rauschens unbestritten. Ein molekularer Motor funktioniert deshalb ganz sicher nicht wie ein deterministisches Räderwerk. Manche Forscher gehen aber noch einen Schritt weiter und räumen dem Zufall eine entscheidende Rolle bei der Kontraktion eines Muskels ein. In ihren Augen handelt es sich bei der Bewegung der Myosin-Fasern um eine Brown'sche Bewegung, die durch das asymmetrische Potenzial und eine von aussen zugeführte chemische Energie gleichgerichtet wird. Sie behaupten also, dass der Aktin-Myosin-Motor und möglicherweise auch andere molekulare Motoren in biologischen Organismen nach ähnlichen Prinzipien funktionieren wie ein Brown'scher Motor. Diese Sichtweise ist allerdings nicht unumstritten, und es gibt auch andere Erklärungen für die gerichtete Bewegung.

#### Von der Ratsche zur Quantenratsche

Wenn bisher von Teilchen gesprochen wurde, so waren damit immer Teilchen gemeint, die zwar klein genug sind, um den Einfluss von thermischen Fluktuationen zu spüren, aber doch gross genug, um den Gesetzen der klassischen Physik zu genügen. Vor vier Jahren gaben Hänggi und seine Mitarbeiter den Dingen eine neue Wendung, indem sie untersuchten, wie sich das Verhalten von Teilchen in einer Schaukelratsche verändert, wenn diese Teilchen den Gesetzen der Quantentheorie gehorchen.

Anders als klassische Teilchen haben quantenmechanische Teilchen - man denke etwa an Elektronen - die Fähigkeit, durch eine Energiebarriere hindurch von einem Minimum ins nächste zu tunneln. Das fällt ihnen um so leichter, je dünner die Barriere ist. Die Forscher konnten nun berechnen, dass beim periodischen Kippen des Sägezahnpotenzials neben dem klassischen Strom auch noch ein Tunnelstrom auftreten sollte, der in die entgegengesetzte Richtung fliesst. Bei sehr tiefen Temperaturen sollte dieser Tunnelstrom sogar stärker sein als der klassische Strom, so dass sich der Nettostrom umkehrt.

Diese Vorhersage konnte vor zwei Jahren von Heiner Linke von der University of New South Wales in Sydney und Forschern von der Lund University in Schweden mit einer speziell für Elektronen konstruierten Ratsche (siehe Bild) bestätigt werden. Das für die Gleichrichtung erforderliche Sägezahnpotenzial erzeugten die Forscher, indem sie den Bewegungsspielraum der in einer dünnen Halbleiterschicht sitzenden Elektronen durch trichterförmige Verengungen einschränkten.

Eine andere Möglichkeit, die Zufallsbewegung von Elektronen in einem Elektronengas gleichzurichten, wurde von einer Gruppe um Axel Lorke - inzwischen an der Universität Duisburg tätig - entwickelt. Die Forscher erzeugten auf einer Halbleiteroberfläche ein Feld von regelmässig angeordneten, dreieckigen Inseln. Trifft ein Elektron auf eine dieser Inseln, wird es wie eine Billardkugel reflektiert - und zwar vornehmlich in Richtung der Spitze des Dreiecks. Die Forscher rüttelten nun mit infrarotem Licht an der Anordnung, und aus der Zufallsbewegung der Elektronen wurde ein gerichteter elektrischer Strom. In welche Richtung dieser fliesst, lässt sich durch die Ausrichtung der Dreiecke im Voraus festlegen.

Die Experimente von Linke, Lorke und anderen sind in Fachkreisen auf grosses Interesse gestossen. Manche Forscher sehen am Horizont schon eine Elektronik heraufziehen, die ohne Drähte und Gleichrichterdiode auskommt. Das mag etwas hoch gegriffen sein. Aber auch ohne solche Zukunftsvisionen geht von Brown'schen Motoren eine ungeheure Faszination aus. Ein letztes Beispiel aus der Spieltheorie mag das belegen. Die beiden Zustände einer Ein-Aus-Ratsche vor Augen, kann man nämlich zwei Glücksspiele konstruieren, die für sich alleine gespielt weder Gewinn noch Verlust bringen. Springt man jedoch zwischen den beiden Spielen hin und her, wird der Zufall kanalisiert, und der Gewinn fliesst schnurstracks in die eigene Tasche.