

Perpetuum mobile der zweiten Art

Thermisches Rauschen treibt Brownsche Motoren an / Gerichtete Bewegung durch Zufallskräfte

Zahlreiche Forscher haben versucht, Maschinen zu konstruieren, die Wärme direkt und ohne Verlust in mechanische Arbeit umwandeln. Viele dieser als Perpetuum mobile zweiter Art bezeichneten Apparaturen beruhen darauf, daß sich thermische Energie oft als regelloses Hin- und Herzittern von Teilchen manifestiert, als sogenannte Brownsche Bewegung. Der zweite Hauptsatz der Wärmelehre schließt solche Vorrichtungen allerdings aus. Auf der Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft in Berlin ist Ende März über Motoren berichtet worden, die diesen Hauptsatz zu verletzen scheinen.

Den Urtyp eines Brownschen Motors hat vor über dreißig Jahren der Physiker Richard Feynman als Gedankenexperiment in seinen Vorlesungen vorgestellt – ein Flügelrad, das die Bewegungsenergie von Gasteilchen in Arbeit umwandeln soll. Dazu ist dessen Achse mit einem Zahnrad verbunden, das sich wegen eines Sperrhakens nur in einer Richtung drehen kann. Jedesmal, wenn ein Gasteilchen auf einem Flügel auftrifft und reflektiert wird, erfährt das Rad einen Kraftstoß. Aufgrund der statistischen Natur der Wärme gibt es Stöße, die stark genug sind, das Rad in die erlaubte Richtung weiterzudrehen. Da in der anderen Richtung der Haken sperrt –

so das überzeugend klingende Argument –, sollte sich mit der Apparatur zumindest das Gewicht eines Flohs heben und damit Arbeit aus Wärme zum Nulltarif gewinnen lassen.

In einer tiefgehenden Betrachtung zeigte Feynman, daß allerdings auch der Sperrhaken von Gasteilchen getroffen wird und daher thermischen Fluktuationen unterliegt. Deswegen hebt sich der Haken manchmal genau in dem Augenblick, in dem das Rad in der verkehrten Richtung angestoßen wird. Dies geschieht genauso häufig wie ein Bewegungsschritt in der gewünschten Richtung. Im Mittel dreht sich das Rad also überhaupt nicht.

Seit einigen Jahren untersuchen theoretische Physiker, unter welchen Bedingungen sich „thermisches Rauschen“ dennoch „gleichrichten“ läßt, wie die an sich ungegerichtete Brownsche Bewegung etwa zum Transportieren von Teilchen genutzt werden kann. Sie sind dabei auf Ergebnisse von grundsätzlicher Bedeutung gestoßen, die sich auch anwenden lassen.

Das Verhalten von Teilchen, deren Bewegungen wie auf einer sägezahnartigen Folge von Dächern stattfinden, hat Marcelo Magnasco von der Rockefeller University in New York in einer vielbeachteten Arbeit modelliert. Die an- und abstei-

genden Flanken der Dächer sind dabei unterschiedlich steil. Deren Höhe ist so gewählt, daß thermische Fluktuationen Teilchen von einer Mulde in eine benachbarte befördern können. Die betrachteten Teilchen unterliegen zusätzlich einer Reibungskraft, die auch bezüglich der Zeit zu einer Asymmetrie führt.

Das thermische Rauschen allein führt in einer solchen Umgebung zu keiner gerichteten Bewegung, denn die Teilchen werden durch Fluktuationen gleich häufig in beide Richtungen gestoßen. Wenn jedoch zusätzlich eine Kraft wirkt, die periodisch ihre Richtung wechselt – also an den Teilchen rüttelt –, dann fand Magnasco im Mittel eine Bewegung der Teilchen in die Richtung des flacheren Anstiegs. Dieses Ergebnis verwundert, da die periodisch wirkende Kraft selber im zeitlichen Mittel verschwindet. Der Teilchenstrom war am größten, wenn die thermische Energie etwa einem Sechstel der Energie entsprach, die nötig ist, die Barriere zu überwinden.

Wie Peter Hänggi von der Universität Augsburg auf der diesjährigen Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft berichtete, haben er und seine Mitarbeiter vor kurzem diesen Befund

genauer untersucht. Sie variierten die Temperatur des thermischen Rauschens sowie die Periode und die Amplitude des Rüttelns an den Teilchen. Die Wissenschaftler bestätigten die Ergebnisse Magnascos, fanden aber erstaunlicherweise heraus, daß die Teilchen bei schnellem Rütteln in die andere Richtung fließen können. Nicht nur die Form der Dächer bestimmt also ihre bevorzugte Bewegungsrichtung, sondern auch die Stärke und die Periode des Rüttelns sowie die Temperatur. Bei großen Amplituden und auch bei hohen Temperaturen verringert sich der Strom dagegen immer auf den Wert Null, da dann die Form der Dächer keine Rolle mehr spielt.

Daß auch andere Effekte als periodisch wirkende Kräfte die Teilchen in eine Richtung fließen lassen, haben Dean Astumian und Martin Bier von der University of Chicago gezeigt. Die Forscher ließen in ihrer Simulation die Höhe der asymmetrischen Dächer zufällig zwischen einem Mindest- und einem Höchstwert hin- und herspringen, ohne daß zusätzliche Kräfte wirkten. Je nachdem, mit welcher Rate dies geschah, beobachteten auch sie einen Nettofluß von Teilchen.

Experimente haben inzwischen die exotischen Überlegungen der theoretischen Physiker bestätigt. Französische Wissenschaftler um Jacques Prost vom Nationalen Forschungszentrum in Paris transportierten Teilchen in einer Lösung, indem sie nur ein asymmetrisches elektrisches Feld

ein- und ausschalteten. Die Forscher untersuchten das Verhalten von winzigen Kügelchen aus Polystyren, die bis zu einem Mikrometer groß waren. Sägezahnartige Elektroden, deren Muster sich alle 50 Mikrometer wiederholte, erzeugten in einer wäßrigen Lösung zwischen zwei Glasplatten ein elektrisches Feld. Wenn Spannung anliegt, sammeln sich die Kügelchen in dessen energetischen Mulden. Nach dem Ausschalten verteilen sie sich durch Diffusion gleichmäßig. Wird das Feld wieder eingeschaltet, wandern diejenigen Teilchen, die weit genug diffundiert sind, in eine benachbarte Mulde. Die Asymmetrie der „Einzugsbereiche“ der Mulden ist der Grund dafür, daß beim periodischen Ein- und Ausschalten insgesamt mehr Kügelchen in die eine als in die andere Richtung fließen. Ein ähnliches Experiment, bei dem die sägezahnartige Intensitätsverteilung eines Laserstrahls das elektrische Feld erzeugt, hat Albert Liebhaber von der Princeton University in New Jersey ausgeführt.

Da die Wandergeschwindigkeit der Kügelchen stark von ihrer Diffusionskonstante abhängt, könnte die von den französischen Forschern entwickelte Apparatur eine Anwendung bei der selektiven Trennung von Makromolekülen finden. Viren, Erbmoleküle oder Chromosomen ließen sich dann nach bestimmten physikalischen Eigenschaften sortieren.

Die Forschungsergebnisse zeigen, daß unter dem Einfluß der Brownschen Bewe-

gung Teilchen in eine bestimmte Richtung fließen können, obwohl im Mittel keine Kräfte wirken und überhaupt keine Temperaturunterschiede oder Konzentrationsgefälle vorliegen. Der zweite Hauptsatz der Wärmelehre ist nicht verletzt, da die benötigten Kräfte bestimmte zeitliche Korrelationen zeigen, die nicht im thermodynamischen Gleichgewicht auftreten. Eine Bewegung zum Nulltarif ermöglicht die „weiße“ Brownsche Bewegung erst zusammen mit „farbigem“ Rauschen – allerdings nur, wenn zusätzlich die Spiegelsymmetrie bei einer Anordnung verletzt ist.

Leistungsfähige Motoren aus Enzymmolekülen haben Biologen entdeckt, als sie Transportvorgänge in lebenden Zellen untersuchten. Kinesin etwa hangelt sich am Cytoskelett der Zelle entlang und zieht dabei gefüllte Vesikeln hinter sich her. Wenn sich ein Muskel kontrahiert, laufen Myosinmoleküle auf einem Actinstrang. Solche Motoren verbrauchen bei ihrer Tätigkeit Energie in Form von Adenosintriphosphat. Ihre Arbeitsweise ist noch nicht ganz verstanden, doch unterliegen auch sie wegen ihrer winzigen Abmessungen den Gesetzen der Brownschen Bewegung. Die abstrakten Modelle der Physiker erklären zumindest auf einfache Weise die Existenz solcher Motoren. Ob sie die Bewegung der Motorenzyme auch mikroskopisch richtig beschreiben, darüber wird zur Zeit noch heftig diskutiert. CHRISTOPH ETTL