

Bewegung aus dem molekularen Chaos

Brown'sche Motoren können sich gezielt in eine Richtung bewegen, indem sie die ungerichtete und zufällige thermische Zitterbewegung in warmen Umgebungen nutzen. Was auf den ersten Blick wie ein Perpetuum Mobile aussehen mag, liefert spannende Einblicke in Prozesse, die vielleicht auch die Natur zur Bewegung auf molekularer Ebene nutzt.

Ein warmer Körper steckt voller Energie. Das ließ schon etliche Köpfe heiß laufen, die diese Energie anzapfen wollten. Doch leider gibt es da den Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik. Dieser verbietet eine Maschine, die Arbeit verrichtet, indem sie einfach nur die Wärme eines Körpers verringert - ein so genanntes Perpetuum Mobile der zweiten Art.

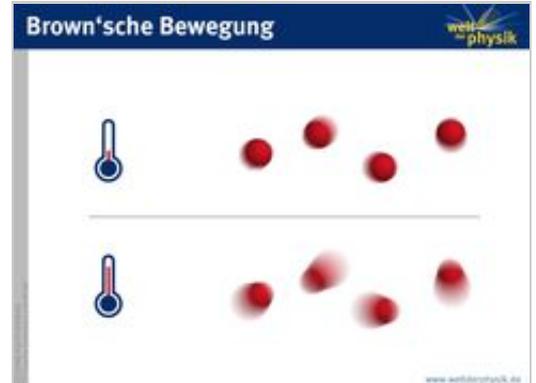
Beim Deutschen Patent- und Markenamt in München legt man daher auch großen Wert darauf, die Ausweglosigkeit von Patentanträgen für solche Maschinen zu erwähnen. Denn so ewiglich ein Perpetuum Mobile Arbeit verrichten würde, so immerfort sind die vergeblichen Versuche, die Natur und den Zweiten Hauptsatz doch auszutricksen.

Bei eben diesem Amt arbeitete auch Albert Einstein, als er 1905 seine Gedanken zur Wärmebewegung veröffentlichte: In warmen Gasen und Flüssigkeiten sind Atome und Moleküle durch die Wärmeenergie in triebseiger und chaotischer Bewegung, stoßen aneinander und übertragen Energie. Diese Brown'sche Bewegung ist es, was wir als Wärme erfahren.

Schon bei normalen Temperaturen sind Moleküle einem enormen Bombardement durch andere Teilchen ausgesetzt. Dennoch gelingt es der Natur, in biologischen Zellen Transportvorgänge zu erhalten, obwohl Berechnungen zeigen, dass die thermische Energie die dazu notwendige chemische Energie um ein Vielfaches übersteigt. Für Moleküle ist das wie ein Spaziergang in einem Tornado, den sie erstaunlich zielgerichtet meistern. Die genauen Abläufe sind dabei längst nicht bekannt, aber für viele Forscher ist klar, dass ein besseres Verständnis sehr hilfreich dabei sein kann, Motoren und Pumpen für die Nanowelt zu bauen. Peter Hänggi von der Universität Augsburg gehört zu ihnen. Er forscht im Bereich der so genannten Brown'schen Motoren, deren Namensvater er auch ist. Im letzten Jahr hat Hänggi zusammen mit Fabio Marchesoni einen viel beachteten Übersichtsartikel über das Forschungsfeld veröffentlicht.

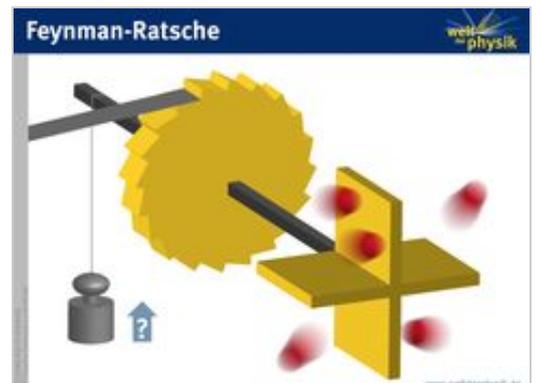
Ratsche I

Dabei wurde in den 1960er Jahren gezeigt, dass sich die Brown'sche Bewegung so einfach gar nicht nutzen lässt. Damals untersuchte der Physiker Richard Feynman eine Maschine - eine molekulare Ratsche - auf die Frage hin, ob diese einen Floh hinaufziehen könnte, indem sie lediglich die Brown'sche Bewegung nutzt. Diese Maschine besteht aus einer Art Windmühle, gegen deren Blätter die Moleküle eines Gases prallen. Über eine Ratsche (einem Bauteil, das im Fahrrad für den Leerlauf sorgt oder beim gleichnamigen Werkzeug eine Hin- und Herbewegung in eine gerichtete



Bildbeschreibung:

Die Wärme eines Systems entspricht der Bewegung seiner Teilchen. Je wärmer etwas ist, umso schneller sind die Bestandteile unterwegs. Diese vollkommen zufällige, ungerichtete thermische Zitterbewegung ist bekannt als Brown'sche Bewegung.



Drehbewegung umwandelt) ist die Windmühle derart in ihrer Bewegung eingeschränkt, dass sie sich nur in eine Richtung drehen kann. Wenn Teilchen von der falschen Seite aufprallen, passiert nichts, ansonsten dreht sich die Mühle um einen Schritt weiter und könnte auf diese Weise ein Gewicht hochziehen.

Wenn das alles wäre, hätte Feynman ein Perpetuum Mobile konstruiert. Doch Feynman zeigte, dass aufgrund der Wärme die Ratsche zuweilen versagen muss (wenn z.B. Teilchen gegen die Feder prallen und den Sperrmechanismus lösen). Dann lässt die Ratsche auch Bewegungen in die andere Richtung zu, so dass sie im Mittel still steht. Mit einer solchen Maschine lässt sich also keine Energie aus Wärme gewinnen. Der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik war wieder einmal gerettet.

Ratsche II

Physiker haben jedoch andere Ratschen - wenn auch abstraktere - untersucht. Und sind fündig geworden. Brown'sche Motoren können sich in einem sägezahnförmigen, sich zeitlich verändernden Energiefeld mit Hilfe der Brown'schen Bewegung gezielt in eine Richtung bewegen. Im Mittel wirkt dabei keine Kraft auf die Teilchen. Es ist aber wichtig, dass die Sägezahnform nicht ganz symmetrisch ist. Als Motor mit einem effektiven Wirkungsgrad wird diese Anordnung dann wirksam, wenn bei zusätzlich angelegter externer Last Arbeit verrichtet wird.

Der Trick funktioniert dabei wie folgt: Wenn das Energiefeld eingeschaltet wird, sorgt es dafür, dass sich die Teilchen in seinen Mulden sammeln. Dort sind sie gefangen. Wird das Energiefeld nun ausgeschaltet, so bewirkt die Brown'sche Bewegung, dass die Teilchen auseinanderdriften. Einige gelangen dabei so weit, dass sie im nächsten Energietal landen, wenn das Energiefeld wieder aktiv ist. Bei periodischem Ein- und Ausschalten des Energiefeldes wird die Richtung mit dem kürzerem Weg zwischen Mulde und Berg etwas bevorzugt, womit im Mittel eine gerichtete Bewegung realisiert wird. Auf diese Weise können Teilchen von Tal zu Tal marschieren und bewegen sich im Mittel gerichtet. (Siehe auch die Simulation, die in der rechten Spalte verlinkt ist.)

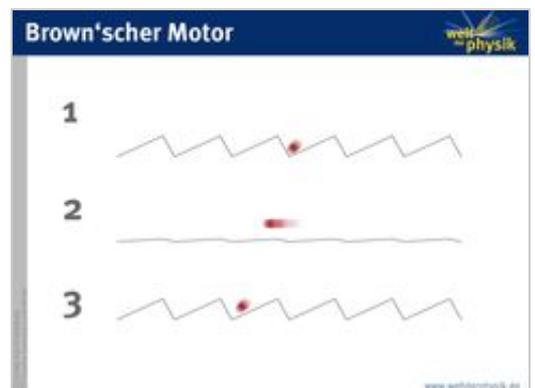
Auch bei Brown'schen Motoren werden die Gesetze der Thermodynamik nicht verletzt. Diese beziehen sich nur auf Systeme, die sich im so genannten thermodynamischen Gleichgewicht befinden, bei denen es von außen keine Störungen gibt. Beim Einschalten des Energiefeldes wird aber genau dieses Gleichgewicht gestört. Das Teilchen wird auf eine höhere Energiestufe gehoben und daher handelt es sich bei einer solchen Ratsche um kein Perpetuum Mobile.

Möglichen Anwendungen

Diese Ratschen existieren längst nicht mehr nur als Gedankenexperiment, sondern haben sich in den Physiklaboren dieser Welt auch realisieren lassen. Vielseitige Anwendungen zeigen sich sowohl in der klassischen wie auch in der quantenmechanischen Welt.

Bildbeschreibung:

Eine Feynman-Ratsche besteht aus einem Mühlrad, auf das Teilchen mit thermischer Energie prallen. Über die Ratsche kann sich das Rad jedoch nur in eine Richtung drehen. Zunächst sieht es so aus, als ob mit dieser Anordnung aus einem Wärmebad Energie gewonnen werden kann, mit der sich Arbeit verrichten lässt (z.B. das Hochziehen eines Gewichts). Der Physiker Richard Feynman hat jedoch gezeigt, dass sich auch die Ratsche erwärmt, nicht mehr richtig funktioniert und sich das Rad auch in die andere Richtung bewegen kann, so dass es zu keiner Nettobewegung kommt.



Bildbeschreibung:

1: Ein Teilchen ist in der Mulde eines sägezahnartigen Energiefeldes gefangen. Seine thermische Energie reicht nicht aus, sich zu befreien. 2: Wird das Energiefeld abgeschaltet, sorgt die Brown'sche Bewegung des Teilchens dafür, dass sich das Teilchen nach links oder rechts bewegt. Im vorliegenden Fall bewegt es sich auf Grund des kürzeren Weges zum nächstliegenden Energieberg mit etwas größerer Wahrscheinlichkeit zufällig nach links. 3: Befindet es sich an der richtigen Position, wenn das Energiefeld wieder eingeschaltet wird, so rutscht es den Energiewall herunter und wird in einer Energiemulde weiter links gefangen.

Die Technologie dringt in immer kleinere Bereiche vor. Will man Dinge auf molekularer Ebene bewirken, so müssen auch entsprechende Motoren und Pumpen her. Wer da einfach nur einen konventionellen Ottomotor kleinschrumpfen will, läuft schnell gegen die Wand - die thermische Wand. Brown'sche Motoren verschiedenster Art hingegen sind aussichtsreiche Kandidaten für solche Nanomaschinen. Aber auch die Trennung von gesunden und kranken Zellen soll sich in Zukunft mit Hilfe Brown'scher Motoren realisieren lassen und spannende Anwendungen in der Medizin ermöglichen. Eines ist klar: Brown'sche Motoren haben schon jetzt in der Nanowelt einiges in Bewegung gebracht.

DOKUMENTINFO

erstellt: 19.03.2010

Autor: Dirk Rathje

wiss. Begleitung: Peter Hänggi

Links

[Java-Applet zur Simulation eines Brown'schen Motors \(engl.\)](#)

Mit diesem Applet können Sie simulieren, wie sich Teilchen in einem asymmetrischen Sägezahl-Energiefeld verhalten. Wenn die Parameter richtig gewählt sind, kommt es zu einer Nettobewegung der Teilchen.

[Links zum Thema, gesammelt von Peter Hänggi \(engl.\)](#)

[Übersichtsartikel von Peter Hänggi und Fabio Marchesoni zu künstlichen Brown'schen Motoren \(engl.\)](#)

[P. Hänggi; F. Marchesoni: Artificial Brownian motors: Controlling transport on the nanoscale; Reviews of Modern Physics, Volume 81](#)