

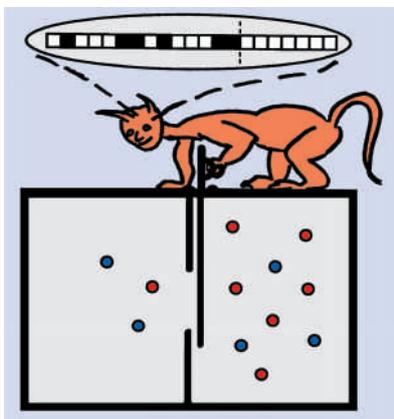
Von Dämonen und Elektronen

In Quantenrutschen fließen Elektronen hoher und niedriger Energie in entgegengesetzte Richtungen

Heiner Linke

Vor mehr als 130 Jahren formulierte James Clerk Maxwell eine Herausforderung an die Wärmelehre: Könnte ein mikroskopisches Wesen, das fähig ist, einzelne Moleküle nach deren Energie zu sortieren, die Entropie eines Gases verringern, ohne anderweitig dafür zu bezahlen? Der Zweite Hauptsatz der Wärmelehre drückt aus, dass eine solcher Maxwellscher Dämon zum Scheitern verurteilt ist. Kürzlich hat sich nun gezeigt, dass Quantenrutschen für Elektronen ähnliche Fähigkeiten haben wie sie dem Dämon abverlangt werden, aber ohne den Zweiten Hauptsatz zu verletzen.

Es ist ein faszinierender Gedanke: Man stelle sich kleine Teilchen in einer asymmetrischen Sägezahnlandschaft vor. Sollte man nicht erwarten können, dass die Teilchen sich bevorzugt in eine Richtung bewegen? Wenn das so ist, müsste es dann nicht möglich sein, die Zufallsbewegung Brownscher Teilchen „gleichzurichten“ und so die Energie eines Wärmebades in nutzbare Arbeit umzuwandeln? Richard Feynman hat mit einem Gedankenexperiment veranschaulicht, worin das Problem besteht (Abb. 1). Ein mikroskopisch kleines Flügelrad befindet sich in einem warmen Gas. Die Stöße der Gasteilchen versetzen das Flügelrad in eine zufällige Zitterbewegung, die sich über einen Schaft auf ein Sägezahnrad überträgt. Wenn nun eine Sperrvorrichtung nur die eine Drehrichtung zulässt, dann könnte man sich vorstellen, dass so die Zufallsbewegung der Gasteilchen zu gerichteter Drehung führt. Feynman schlug vor, in dieser Weise die Wärme des Gases zu nutzen, um einen Floh hochzuwünschen. Der Haken bei der Sache ist die Sperrklinke: Die Wahrscheinlichkeit, dass das Flügelrad momentan genügend thermische Energie erhält, um den Sperrhaken zu heben und sich vorwärts zu drehen, ist gerade genauso groß wie die Wahrscheinlichkeit, dass der Haken selbst sich hebt und



Der Maxwell'sche Dämon, im Jahr 1867 von James Clerk Maxwell vorgeschlagen, hat zur Aufgabe, einzelne Moleküle nach ihrer Art oder Energie zu sortieren. Könnte er das, dann wäre er ein außerordentlich nützlicher Hausgeist. (Zeichnung: Andrew Steane)

das Rad sich rückwärts dreht. Im Durchschnitt passiert nichts, und der Floh bleibt unten sitzen [1].

Eine ganze Reihe verwandter Gedankenexperimente haben sich mit der Idee eines Maxwell'schen Dämons beschäftigt. Dieser ist ein postuliertes, mikroskopisch kleines Wesen, das einzelne Moleküle nach ihrer Energie sortieren kann, etwa durch schnelles Öffnen und Schließen eines Tüchchens zwischen zwei Gasbehältern. Der so erzeugte Temperaturunterschied könnte dann genutzt werden, um eine Wärmemaschine zu betreiben. Leider muss dieser durchaus wünschenswerte Dämon scheitern. Um seine Aufgabe zu erfüllen, benötigt er nämlich Kenntnis über die Lage und Geschwindigkeit einzelner Moleküle. Diese Information muss er nach Gebrauch wieder löschen, denn sonst müsste er aufgeben, wenn er seine Speicherkapazität erreicht. Das Löschen der Information erzeugt aber mindestens genauso viel Entropie (Unordnung) wie sie dem Wärmebad beim Ordnen der Moleküle ursprünglich entzogen wurde. Da dem Dämon Veränderungen an der Außenwelt verboten sind, bleibt ihm nichts anderes übrig, als die überschüssige Entropie an das Wärmebad zurückzugeben und so die Früchte seiner eigenen Arbeit zu zerstören [2].

Es gibt aber einen Ausweg: Der Zweite Hauptsatz der Wärmelehre, der ausdrückt, dass es unmöglich ist, aus einem einzelnen Wärmebad Arbeit zu erzeugen, bezieht sich nämlich nur auf geschlossene Systeme im thermischen Gleichgewicht. Wenn das System unter äußerer Energiezufuhr im thermischen Ungleichgewicht gehalten wird, dann ist es tatsächlich möglich, mit so genannten „Ratschen“ thermische Zufallsbewegung in gerichteten Transport umzuwandeln.

Ratschen: Transport ohne Nettokraft

In Abbildung 2 ist am Beispiel einer pulsierenden Ratsche erläutert, wie das aussehen kann. Brownsche Teilchen, zum Beispiel ein Gas oder auch Kolloide in einer Flüssigkeit, befinden sich in einem periodischen Sägezahnpotential, das abwechselnd an- und ausgeschaltet wird. Die Teilchen, die sich während der Ein-Phase nahe der Potentialminima sammeln, breiten sich während der folgenden Aus-Phase frei und isotrop aus [3, 4]. Beim Wiedereinschalten des Potentials werden mehr Teilchen auf den langen, flachen Flanken gefangen

Dr. Heiner Linke,
School of Physics,
University of New
South Wales, Sydney
2052, Australien,
E-Mail: hl@phys.
unsw.edu.au

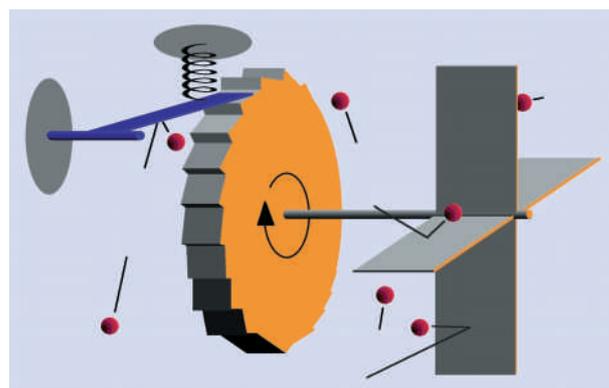


Abb. 1: Richard Feynmans Gedankenexperiment illustriert, warum sich aus einem Wärmebad im thermischen Gleichgewicht keine nutzbare Arbeit erzeugen lässt. Die Sperrklinke (links) ist nicht in der Lage, die Zufallsbewegung des Flügelrads (rechts) gleichzurichten, da sie selbst auch Kollisionen mit Gasteilchen ausgesetzt ist und eine Zufallsbewegung ausführt. Man könnte sich vorstellen, die Feder der Sperrklinke mit einem Maxwell'schen Dämon zu ersetzen, der die Sperrklinke festhält, wenn das Flügelrad sich in die falsche Richtung dreht. Dazu müsste der Dämon aber Stöße von Gasteilchen absorbieren und würde bald selbst so viel Wärmebewegung ausführen, dass er zitternd aufgeben müsste.

als auf den kurzen, steilen, und es entsteht eine Verschiebung der Teilchenverteilung nach links, also *gegen* die steileren Flanken des Potentials. Kontinuierliches Pulsieren des Potentials, was periodisch oder zufällig geschehen kann, bewirkt einen Teilchenstrom, obwohl im Zeitdurchschnitt keine Nettokraft oder ein makroskopischer Gradient vorliegen.

Die folgenden drei Voraussetzungen sind hinreichend für gerichteten Transport ohne Nettokraft und typische Eigenschaften vieler Ratschensysteme: erstens eine ein-

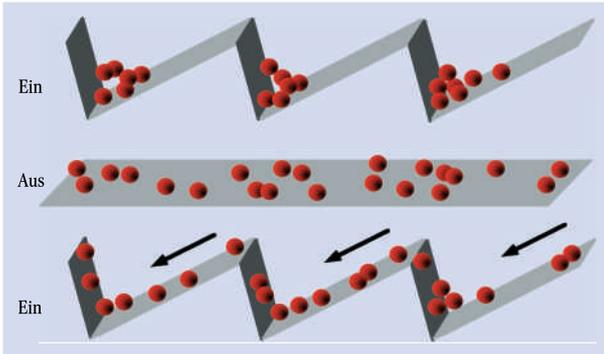


Abb. 2: Die pulsierende Ratsche (*flashing ratchet*) In der pulsierenden Ratsche oder „Ein-Aus-Ratsche“ befinden sich Brownsche Teilchen endlicher Temperatur in einem asymmetrischen Potential, das abwechselnd ein- und ausgeschaltet wird [3,4]. Während der Ein-Phase sammeln sich die Teilchen in der Nähe eines Potentialminimums. In der Aus-Phase diffundieren die Teilchen frei und isotrop. Beim Wiedereinschalten des Potentials werden mehr Teilchen auf den flachen als auf den steilen Flanken gefangen. Es ergibt sich eine Verschiebung der Teilchenverteilung nach links, wenn die Teilchen ins nächstgelegene Minimum gleiten. Eine illustrative Simulation dieses „Brownschen Motors“ ist im Internet unter monet.physik.uni-bas.ch/~elmer/bm zugänglich.

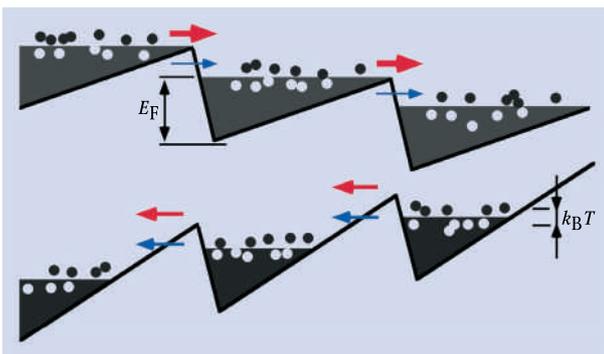


Abb. 3: Die schaukelnde Ratsche (*rocking ratchet*) Die Energieverteilung der Teilchen in dieser schaukelnden Ratsche ist für Fermionen (Elektronen) gezeichnet (Fermi-Energie E_F , thermische Energie $k_B T$). Die Höhe der Potentialberge fällt für Rechtsneigung geringer aus (oben). Dadurch entsteht im klassischen Fall (rote Pfeile) ein durchschnittlicher Teilchenstrom nach rechts, obwohl im Zeitdurchschnitt keine Neigung besteht. Elektronen, die quantenmechanisch tunneln können (blaue Pfeile), bewegen sich jedoch im Durchschnitt nach links, weil die Barrierendicke bei Linksneigung geringer ausfällt (unten). Bei hoher Temperatur überwiegt der klassische Strom nach rechts. Bei geringer thermischer Anregung kann der linksgerichtete Tunnelstrom überwiegen.

gebaute räumliche Asymmetrie des Potentials, das oft periodisch angenommen wird, um Transport über längere Strecken zu erlauben. Zweitens thermische Zufallsbewegung der Teilchen, und drittens zeitlich korrelierte Fluktuationen des Potentials. In der pulsierenden Ratsche etwa ist die ungerichtete Bewegung in der Aus-Phase des Potentials eine Voraussetzung für den Pumpeffekt. Die Pumpenergie wird den Teilchen aber beim Wiedereinschalten des Potentials von außen zugeführt. Dadurch kann der Strom sogar gegen eine äußere Kraft fließen und Arbeit verrichten, das Teilchengas wird aber auch durch Verluste aufgeheizt.

Vielfältige Abwandlungen sind möglich [5]. Beispielsweise kann das Ratschenpotential selbst zeitlich konstant sein, wenn die Teilchen zusätzlich zum thermischen Rauschen noch zeitlich korreliertem („farbigem“) Rauschen ausgesetzt sind [4], oder man kann die räumliche Asymmetrie des Potentials durch zeitlich asymmetrisches Treiben ersetzen [6].

Ratschenantrieb für molekulare Motoren

Zum gegenwärtigen starken Interesse an Ratschen trägt erheblich deren mögliche Bedeutung für das Verständnis molekularer Motoren in lebenden Zellen bei. Diese sind komplexe Proteinmoleküle, die über eine Nichtgleichgewichtsreaktion chemische Energie in mechanische Arbeit umwandeln, zum Beispiel beim Materialtransport innerhalb der Zelle, bei der Zellteilung, oder beim Zusammenziehen von Muskeln. Solche Motoren unterliegen wegen ihrer geringen Größe Brownscher Zufallsbewegung, und ihr Energieumsatz ist nur wenige Male größer als die thermische Energie $k_B T$. Im Gegensatz zur deterministischen Arbeitsweise künstlicher Motoren hat die Bewegung eines molekularen Motors daher zwangsläufig eine Zufallskomponente. Für einige molekulare Motoren können wesentliche Eigenschaften in einem Ratschenmodell erklärt werden, und es scheint, als ob die Molekülmaschinen sich thermische Zufallsbewegung zunutze machen, anstatt sich davon stören zu lassen [7, 8].

Auch technische Anwendungen erwachsen aus der Ratschenphysik. Beispielsweise erweist sich die pulsierende Ratsche als außerordent-

lich effektiv für die Separation von DNS-Stücken unterschiedlicher Länge, da deren Geschwindigkeit stark von der Größe abhängt [9]. Asymmetrische Halbleiter-Nanostrukturen können durch einen Ratscheneffekt elektrische Felder hoher Frequenz gleichrichten, was eine Anwendung als Ferninfrarot-Detektoren nahe legt [10]. Und Juan Parrondo in Madrid schlug sogar eine Brücke zur Spieltheorie, als er zeigte, dass der Ratschenkundige mit bestimmten Glücksspielen sicheren Gewinn erzielen kann [5, 11].

Stromumkehr in Quantenratschen

Eine neue Dimension erhielt die Ratschenphysik, als Peter Reimann, Milena Grifoni und Peter Hänggi von der Universität Augsburg zeigten, dass quantenmechanisches Tunneln das Verhalten einer Ratsche qualitativ verändern kann [12]. Sie untersuchten eine so genannte schaukelnde Ratsche, bei der das Potential abwechselnd und symmetrisch nach rechts und links gekippt wird (Abb. 3). Wegen der Asymmetrie des Ratschenpotentials hängt nicht nur die Richtung, sondern auch die Stärke des Stromes von der Kipprichtung ab. Über eine Schaukelperiode gemittelt entsteht daher ein Nettostrom, obwohl im Zeitdurchschnitt keine Kraft anliegt. Klassisch betrachtet fließt dieser Nettostrom in Richtung der flacheren Flanken, da die Barrieren bei Kippung nach rechts niedriger ausfallen (Abb. 3, oben). Quantenmechanische Teilchen haben jedoch zusätzlich zur thermischen Anregung die Möglichkeit, über einen Tunnelprozess durch die Barrieren hindurch ins benachbarte Minimum zu gelangen. Die Tunnelwahrscheinlichkeit hängt nun nicht nur von der Höhe der Barriere, sondern auch von ihrer Dicke ab, und die fällt geringer aus, wenn das Potential nach links geneigt wird (Abb. 3, unten). Der Tunnelbeitrag zum Nettostrom fließt daher in entgegengesetzter Richtung des klassischen Strombeitrages. Daraus ergibt sich eine Temperaturabhängigkeit der Nettostromrichtung: Während bei hoher Temperatur der Beitrag durch thermische Anregung überwiegt und zum klassischen Nettostrom nach rechts führt, kann bei niedriger Temperatur der linksgerichtete, quantenmechanische Tunnelstrom überwiegen.

Diese Temperaturabhängigkeit

der Stromrichtung wurde kürzlich in einer Quantenratsche für Elektronen beobachtet [13]. Die Elektronenratsche besteht aus einem asymmetrischen, elektrisch leitenden Kanal, der mithilfe von Elektronenstrahl-Lithographie in einer GaAs/AlGaAs Halbleiter-Heterostruktur geformt wurde (Abb. 4).

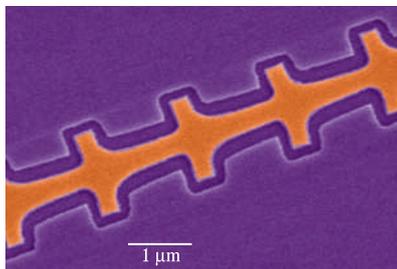


Abb. 4: Die Elektronenmikroskop-Aufnahme zeigt vier von insgesamt zehn Abschnitten einer Tunnelratsche für Elektronen. Die dunkleren Bereiche sind Gräben, die aus einer GaAs/AlGaAs-Heterostruktur geätzt wurden und so einen asymmetrischen Quantendraht definieren, der in Orange hervorgehoben ist. Jede der Verengungen stellt eine Energiebarriere für Elektronen dar. Das „Schaukeln“ des Ratschenpotentials wird mittels einer längs angelegten Wechselspannung erzeugt.

Der Kanal kann auch als eindimensionaler Wellenleiter oder Quantendraht betrachtet werden. Ein Elektron kann sich an einer bestimmten Stelle des Quantendrahtes nur dann aufhalten, wenn es über eine bestimmte Mindestenergie verfügt, sodass seine halbe laterale Wellenlänge der lokalen Kanalbreite entspricht. Die periodisch wiederholten, trichterförmigen Abschnitte des Quantendrahtes sind so geformt, dass jede der Engstellen näherungsweise eine lineare Energiebarriere darstellt. Das sich so ergebende Sägezahnpotential wird dann mit einer längs angelegten Wechselspannung periodisch „geschaukelt“, und man misst den entstehenden Nettostrom, indem man über viele Schaukelperioden zeitlich mittelt. Wenn die Energiebarrieren etwas höher sind als die Fermi-Energie der Elektronen, dann ist bei sehr tiefen Temperaturen die Wahrscheinlichkeit für thermische Anregung über die Barriere vergleichbar zur Tunnelwahrscheinlichkeit. Unter diesen Umständen lässt sich eine Umkehr des Nettostromes beobachten, wenn die Probe auf wenige Kelvin abgekühlt wird (Abb. 5).

Dämon im Chip

Eine besonders interessante Eigenschaft der Tunnelratsche ist die Energieabhängigkeit des Nettostromes: Während Elektronen niedriger Energie („kalte“ Elektronen) sich im Durchschnitt durch Tunneln nach links bewegen, fließen Elektronen höherer Energie („warme“ Elektronen) nach rechts. Bei der kritischen Temperatur, bei der sich die beiden Ströme die Waage halten, gleicht der Gesamteffekt sehr der Aufgabe des Maxwell'schen Dämons: Kalte Elektronen werden von der Ratsche nach links sortiert, warme nach rechts – ohne dass eine der Seiten elektrisch aufgeladen wird! Nun braucht man sich aber um den Zweiten Hauptsatz keine Sorgen zu machen. Der „dämonische“ Effekt tritt ja nur ein, wenn die Ratsche von einer Wechselspannung getrieben wird, das heißt außerhalb des thermischen Gleichgewichts. Durch Ohmsche Verluste entsteht dabei zwangsläufig Wärme, und im Einklang mit dem Zweiten Hauptsatz wird insgesamt Entropie erzeugt.

Die Erkundung der Quantenratschen steht noch am Anfang, und es ist schwer abzusehen, welche praktischen Anwendungen die Quantenratschen finden werden. Eine neuere Entwicklung ist die Vorhersage eines gerichteten Stromes von Quantenteilchen selbst in *symmetri-*

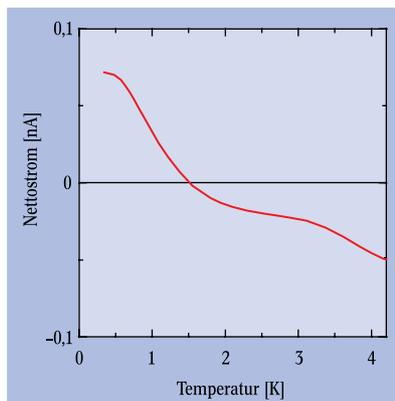


Abb. 5: Gemessener Nettostrom der in Abb. 4 gezeigten Elektronenratsche für eine angelegte Wechselspannung von 1 mV. Die Umkehr der Stromrichtung als Funktion der Temperatur ist charakteristisch für eine Quantenratsche.

schon, periodischen Potentialen, wenn eine Wechselspannung und ihre zweite Harmonische phasenverschoben überlagert angelegt werden [6]. Auf experimenteller Seite wurde gezeigt, dass man bei tiefen Temperaturen die Interferenz von

kohärenten Elektronen nutzen kann, um in asymmetrischen Quantenpunkten eine Wechselspannung teilweise gleichzurichten. Bei dieser Quantenpunkt-Ratsche wird das Vorzeichen des erzeugten Stromes nicht nur von der Orientierung des dreieckigen Quantenpunktes bestimmt. Die Stromrichtung hängt auch sehr empfindlich von der genauen Form des Quantenpunktes und von der Elektronenenergie ab, und sogar durch Ändern der angelegten Wechselspannung lässt sich der Nettostrom umdrehen [14]. Nicht nur faszinierende Grundlagenphysik, sondern auch Aussichten auf elektronische Systeme mit neuen Eigenschaften lassen es also lohnend erscheinen, Quantenratschen weiterhin unter die Lupe zu nehmen.

Literatur

- [1] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, The Feynman Lectures on Physics, Kapitel 46, Addison-Wesley, Reading 1963
- [2] H. S. Leff, A. F. Rex, Maxwell's Demon: Entropy, Information, Computing, IOP Publishing, Bristol 1990
- [3] J. Rousselet et al., Nature **370**, 446 (1994)
- [4] R. Bartussek, P. Hänggi, Phys. Bl., Juni 1995, S. 506
- [5] C. Van den Broeck et al., in Lecture Notes in Physics; Vol. 527, D. Reguera, M. Rubi, J. Vilar (Hrsg.), Springer, Heidelberg 1999, S. 93
- [6] I. Goychuk, P. Hänggi, Europhys. Lett. **43**, 503 (1998)
- [7] F. Jülicher, A. Ajdari, J. Prost, Rev. Mod. Phys. **69**, 1269 (1997)
- [8] R. D. Astumian, Science **276**, 917 (1997)
- [9] J. S. Bader et al., PNAS **96**, 13165 (1999)
- [10] A. Lorke et al., Physica B **251**, 312 (1998)
- [11] G. P. Harmer, D. Abbott, Nature **402**, 864 (1999)
- [12] P. Reimann, M. Grifoni, P. Hänggi, Phys. Rev. Lett. **79**, 10 (1997)
- [13] H. Linke et al., Science **286**, 2314 (1999)
- [14] H. Linke et al., Europhys. Lett. **44**, 341 (1998). Siehe auch M. Rauner, Phys. Bl., März 1999, S. 16