

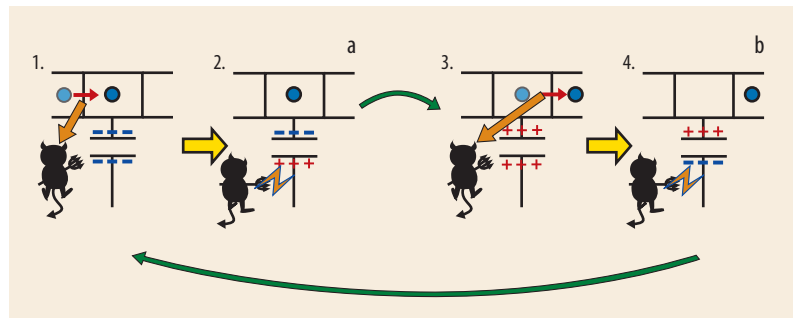
## ■ Den Maxwell'schen Dämon bannen

Mit Hilfe supraleitender Elektronik ist nun der 100 Jahre alte Traum eines autonomen Maxwell'schen Dämons Realität geworden.

In der Frühzeit der Thermodynamik sorgten die Formulierungen des zweiten Hauptsatzes für einiges Kopfzerbrechen. Denn es war nicht ganz klar, ob diese allgemeingültig sind oder ob sich physikalische Systeme finden ließen, die den zweiten Hauptsatz verletzen. Um dieses Problem genauer zu verstehen, ersann James Clerk Maxwell ein Gedankenexperiment, das Lord Kelvin später den „Maxwell'schen Dämon“ taufte – ein Name, der sich bis heute gehalten hat. Maxwell betrachtete zwei Behälter mit einem gasförmigen Teilchengemisch, die durch eine Wand voneinander getrennt sind. Ein „geschicktes Wesen“, das die Geschwindigkeit jedes Teilchens bestimmen kann, sitzt an einer kleinen Tür in der Wand und sortiert die Teilchen, indem es die Tür so öffnet und schließt, dass schnelle Teilchen nur auf die eine Seite gelangen, langsame nur auf die andere. Dieser Sortiervorgang transportiert Wärme von einem kalten in ein heißes Reservoir.

Auf den ersten Blick scheint dieses Gedankenexperiment den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik zu verletzen. Aber dieses Paradoxon löst sich auf, wenn man realisiert, dass Arbeit am Dämon zu verrichten ist, damit dieser seine Aufgabe erfüllen kann. Zwangsläufig führt eine solche Deutung ein weiteres, nicht notwendigerweise physikalisches System ein, das die Arbeit am Dämon verrichtet. Gerade deswegen kann eine solche Erklärung nicht befriedigen. Jukka Pekola und seine Kollegen der Aalto University in Finnland haben nun eine Nanoapparatur gebaut, die äquivalent zu einem Maxwell'schen Dämon ist (Abb. 1), deren Funktion aber nicht durch externe Kontrolle getrieben wird [1]. Diese Apparatur ist damit vollständig in sich geschlossen und die erste Realisierung bisher rein theoretischer Modelle eines autonomen Dämons.

Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik besagt im We-



**Abb. 1** Beim autonomen Maxwell'schen Dämon besteht das „System“ aus einer Zelle mit einem Elektron, die mit einem externen Potential verbunden ist. Der Dämon überwacht die Ladung in der Zelle. Wenn ein Elektron (blau) eintritt, fängt der Dämon es unverzüglich durch das Anlegen einer positiven Ladung ein

(a). Wenn ein Elektron die Zelle verlässt, stößt es der Dämon durch eine negative Ladung ab (b). Dabei handelt es sich um das elektronische Äquivalent zum Öffnen und Schließen der Tür in Maxwell'schen Gedankenexperiment.

sentlichen, dass die Entropie des Universums niemals abnimmt. Da diese sehr allgemeine Aussage nur schwerlich auf spezielle Situationen anwendbar ist, gibt es verschiedene andere Formulierungen. Dazu gehören die von Clausius, dass sich Wärme nicht von kalten zu warmen Regionen transportieren lässt, ohne Arbeit zu verrichten, oder die Aussage von Carnot, dass der maximale Wirkungsgrad einer Wärmemaschine durch den Carnot-Wirkungsgrad gegeben ist [2]. Jetzt stellt sich die Frage, ob diese Aussagen nur das mittlere Verhalten eines Systems beschreiben, dessen Eigenschaften vom Verhalten vieler Teilchen abhängen, oder ob diese Aussagen auch auf einzelne Teilchen anwendbar sind. Um diese Frage zu klären, schlug Maxwell 1867 sein Gedankenexperiment vor, das die Formulierung von Clausius verletzt [3].

Maxwell's Dämon war sofort eine Quelle der Faszination und führte zu vielen wichtigen Ergebnissen, darunter die Entwicklung der thermodynamischen Theorie der Information. In den 1960er-Jahren erkannte der IBM-Forscher Rolf Landauer, dass die zusätzliche Arbeit, die aus der Tätigkeit des Dämons erwächst, auf Kosten der Umgebung des gesamten Systems aus Gas und Dämon geht [4]. Ist das

Gedächtnis des Dämons endlich, kommt es am Ende zu einem Überfluss an angesamelter Information über die Geschwindigkeit jedes Teilchens. Dann muss der Dämon seinen Speicher löschen, um kontinuierlich weiterarbeiten zu können – eine Aktion, für die er Arbeit aufwenden muss. Diese Arbeit ist mindestens so groß wie die Wärme, die man aus dem Sortiervorgang gewinnt. In diesem Sinne ist der zweite Hauptsatz wieder vollständig gültig. Im Wesentlichen sagt Landauers Prinzip aus, dass Information eine physikalische Größe ist [5]. Unklar bleibt aber, wer oder was den Speicher überschreibt. Ist dazu ein weiterer Dämon erforderlich?

Forscher haben diese konzeptionellen Rätsel kürzlich wieder aufgegriffen und autonome Systeme, also in sich geschlossene Einheiten, vorgeschlagen [2, 6, 7]. Schon vor 80 Jahren fand Leo Szilard den Gedanken an eine metaphysische, menschenähnliche Gestalt, die den Maxwell'schen Dämon betreibt, unangenehm. Seiner Meinung nach sollte es möglich sein, ein mechanisches System zu finden, das wie ein Maxwell'scher Dämon funktioniert, aber den Gesetzen der Physik gehorcht [8]. In den letzten Jahren hat diese Idee viel Aufmerksamkeit erregt und zu einer Reihe theoretischer Modelle geführt [9, 10].

Pekola und Kollegen haben Szilards autonomen Dämon nun experimentell realisiert. Ihr Apparat besteht aus einer „Systemzelle“ und einer „Dämonenzelle“, in denen einzelne Elektronen enthalten sind (Abb. 1). Die Systemzelle besteht aus einem kleinen Metallstück aus Kupfer, das über supraleitende Aluminiumdrähte mit zwei metallischen Leitern verbunden ist. Mit ihrer Hilfe können die Elektronen auf das Metallstück tunneln und wieder herunter. Supraleitendes Material stellt dabei sicher, dass die Elektronen keine Wärme aus dem System entziehen. Die Systemzelle ist auf ähnliche Weise an die benachbarte Dämonenzelle angeschlossen. Diese registriert die Spannung, die ein Elektron erzeugt, wenn es die metallische Insel verlässt oder dort ankommt. Diese Spannung aktiviert wiederum den Dämon: Wenn ein Elektron auf die Insel tunnelt, fängt die Dämonenzelle das Elektron dort mit einer positiven Ladung ein. Wenn ein Elektron die Insel verlässt, stößt der Dämon es durch eine negative Ladung ab. Die induzierte Ladung zwingt die Elektronen, gegen ein Potential zu tunneln, wodurch sich das System abkühlt. Das System ist vollständig in sich geschlossen, und der Prozess gelingt durch eine geschickte Verdrahtung der beiden Zellen.

In Übereinstimmung mit den Vorhersagen theoretischer Modelle sinkt die Temperatur des Systems durch die Aktionen des Dämons, während dessen Temperatur ansteigt. Die Temperaturänderung wird durch die Transinformation, d. h. die Korrelationen zwischen System und Dämon, bestimmt. Diese Größe beschreibt also, wieviel der Dämon von dem System „weiß“.

Dieses Experiment ist sehr bedeutend, da wir nun zum ersten Mal ein vollständig autonomes System haben, das unserer alltäglichen Intuition entspricht – nämlich, dass wir unser Wissen um die mikroskopischen Eigenschaften und Dynamik dazu verwenden können, um makroskopisch mehr Arbeit zu gewinnen, als die ursprüngliche Formulierung des zweiten Hauptsatzes erlaubt. Das heißt aber nicht,

dass der Hauptsatz nicht gilt. Vielmehr bedeutet es, dass wir Physiker ihn so sorgfältig formulieren müssen, wie es die gegebene Situation erfordert. Im Fall des Maxwell'schen Dämons ist beispielsweise ein Teil der erzeugten Entropie mit der gewonnenen Information gleichzusetzen. Das Experiment der finnischen Forscher hat gezeigt, dass autonome Dämonen existieren können und nicht nur eine theoretische Spielerei sind. Das bietet die Möglichkeit, fundamentale Axiome der Thermodynamik oder die Beschreibung von Informationsverarbeitung zu prüfen. Damit sich Information mit hoher Effizienz schreiben und lesen lässt (z. B. bei der ferngesteuerten Bedienung eines Computers im All), ist es wichtig zu wissen, welchen Beitrag die Information zur Entropieerzeugung leistet.

Eines Tages haben wir vielleicht einen echten mechanischen Dämon, wie ihn sich Szilard [8] und jüngere theoretische Abhandlungen [10] ausgemalt haben. Mechanische Systeme sind sehr viel anschaulicher als ihre elektronischen Gegenstücke und im wahrsten Sinne des Wortes begreifbar. Daher könnten sie die fundamentalen Prinzipien der Thermodynamik besser verdeutlichen.

Sebastian Deffner

- [1] V. Koski et al., *Phys. Rev. Lett.* **115**, 260602 (2015)
- [2] S. Deffner und C. Jarzynski, *Phys. Rev. X* **3**, 041003 (2013)
- [3] H. S. Leff und A. F. Rex (Hrsg.), *Maxwell's Demon 2: Entropy, Classical and Quantum Information, Computing*, IOP Publishing, Bristol (2003)
- [4] E. Lutz und S. Ciliberto, *Phys. Today* **68**, 30 (2015)
- [5] R. Landauer, *Phys. Today* **44**, 23 (1991)
- [6] A. C. Barato und U. Seifert, *Phys. Rev. E* **90**, 042150 (2014)
- [7] J. M. R. Parrondo et al., *Nature Phys.* **11**, 131 (2015)
- [8] L. Szilard, *Z. Phys.* **53**, 840 (1929)
- [9] D. Mandal und C. Jarzynski, *PNAS USA* **109**, 11641 (2012)
- [10] Z. Lu et al., *Phys. Today* **67**, 60 (2014)