

■ Carnot im Nanomaßstab

Bei einer winzigen Wärmekraftmaschine bestimmen Fluktuationen die thermodynamischen Größen.

Wärmekraftmaschinen begegnen uns praktisch überall. Die Umwandlung von Wärmeenergie in mechanische Arbeit ist schließlich Basis für die meisten Antriebsarten wie Dampfmaschinen, Automotoren und Flugzeugtriebwerke. Ein typischer Automotor bringt eine Leistung von 100 Kilowatt und wiegt etwa hundert Kilogramm. Das Arbeitsmedium umfasst dabei eine sehr große Zahl von Molekülen in der Größenordnung von 10^{24} . Seit den bahnbrechenden Arbeiten von Sadi Carnot (1796 – 1832) sind die Grundprinzipien dieser makroskopischen Wärmekraftmaschinen gut verstanden. Betragen die Ausmaße der Maschinen aber nur Mikrometer oder gar Nanometer, ergeben sich völlig neuartige Eigenschaften: Statt allein durch Mittelwerte von Messgrößen wie Arbeit, Wärme und Druck sind mikroskopische Maschinen auch von den Fluktuationen dieser Größen bestimmt. Der relative Einfluss der Fluktuationen steigt stark an, wenn das Arbeitsmedium nur noch aus wenigen oder sogar nur noch aus einem einzigen Molekül besteht. Aus der Sicht der klassischen Wärmelehre überrascht es besonders, dass sowohl die abgegebene Leistung als auch der Wirkungsgrad einer mikroskopischen Maschine fluktuierende Größen werden.

Um solche Effekte genauer zu studieren, ist es sinnvoll, Wärmekraftmaschinen mit Abmessungen von wenigen Mikrometern zu bauen und zu betreiben. Dafür haben Forscher einer Kollaboration von Instituten in Spanien, Frankreich und Deutschland nun ein in Wasser befindliches Kolloidteilchen mit einem Mikrometer Durchmesser in einem stark fokussierten Laserstrahl gefangen [1]. Die optische Kraft und damit das einschließende harmonische Potential, in dem sich das Kolloidteilchen befindet, stellten sie über die Intensität des Laserlichts ein. Ändert man das Potential schnell, führt dies zu

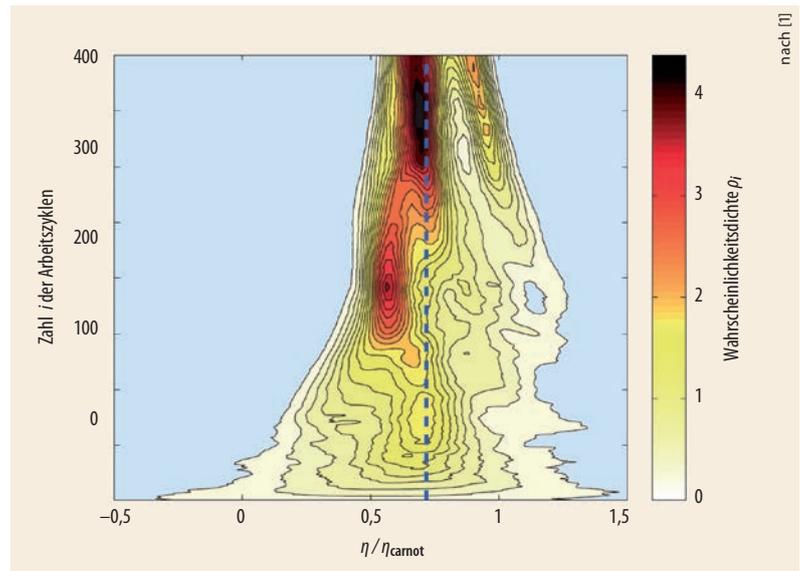


Abb. 1 Der Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine im Mikrometermaßstab fluktuiert bei maximaler Leistung deutlich. Das zeigt der Konturplot für die Wahrscheinlichkeitsdichte bis 400 Taktzyklen. Selbst nach 400 Zyklen ist die

Verteilung noch breit. Erst über sehr lange Zeit und viele Taktzyklen gemittelt erreicht der Wirkungsgrad einen festen Grenzwert (blaue Linie).

einem adiabatischen Prozess. Bei langsamer Variation arbeitet die Maschine in einem isothermen Takt. Solche Experimente, bei denen Laser ein Glaskügelchen in Wasser kontrollieren, dienten bereits dazu, den Stirling-Kreisprozess zu demonstrieren [2]. Das Forscher-Team hat damit nun einen Carnot-Kreisprozess realisiert. Der mikroskopische Kolben durchläuft also die wohlbekannte Abfolge von isothermer Kompression, adiabatischer Kompression, isothermer Expansion und adiabatischer Expansion. Der besondere Trick ist dabei eine maßgeschneiderte Temperatur des mikroskopischen Wärmebades. Dafür verwendeten die Forscher elektrisch geladene Kolloide, die sie mit einem veräuschten elektrischen Antriebsfeld anregten. Dadurch konnten sie eine erheblich höhere Temperatur von bis zu 1000 °C erreichen, als dies in Wasser möglich gewesen wäre. Um die Bewegung des Mikrokolbens im Arbeitstakt zu messen, verfolgten die Forscher die periodische Auslenkung der Kolloidkugel mit einem Mikroskop, um

daraus die geleistete Arbeit sowie den Wirkungsgrad des Prozesses zu bestimmen. Der Wirkungsgrad bei maximaler Ausgangsleistung beträgt nach Frank Curzon und Boye Ahlborn $\eta_{CA} = 1 - \sqrt{T_k/T_w}$ und hängt vom Verhältnis der Temperaturen des warmen und kalten Bades ab. Im Experiment erreichte der Wirkungsgrad bei einer Zyklusdauer von 40 Millisekunden, also bei 15 000 Umdrehungen pro Minute, 57 Prozent der maximal möglichen Carnot-Effizienz – in guter Übereinstimmung mit theoretischen Erwartungen.

Martínez und Kollegen wiesen erstmals die Fluktuationen beim Wirkungsgrad nach (Abb. 1). Die Daten zeigen eindrucksvoll, dass der gemessene Wirkungsgrad dieser Mikromaschine eine breite Verteilung aufweist. Mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit liegt der Wirkungsgrad über oder auch unter dem Langzeit-Mittelwert, der sich über sehr viele Zyklen ergibt. Verblüffend ist dabei, dass in manchen Realisierungen die gemessenen Eigenschaften der Maschine deutlich besser sind als die klassischen

Gesetze der Thermodynamik eigentlich zulassen! Solche Fluktuationen des Wirkungsgrades sind ein hochaktuelles Forschungsthema [3]. Das vorgestellte Experiment erlaubt es, die Theorien der Nichtgleichgewichtsthermodynamik zu überprüfen. Im Langzeit-Mittel gelten aber auch für diese Mikromaschine die Hauptsätze der Thermodynamik, und ihr Wirkungsgrad nimmt den klassisch erwarteten Wert an.

In Zukunft könnten Experimente wie dieses dabei helfen, Maschinen zu konstruieren, die auf der molekularen Skala nützliche Arbeit verrichten. Eine faszinierende Aussicht sind mechanische Nano-Roboter, die auf solchen Prozessen basieren und wichtige Transportaufgaben innerhalb der Zellen übernehmen könnten. Obwohl das sehr nach Science-Fiction klingt, gibt es dazu bereits erste erfolgreiche Experimente [4].

Ein weiterer Aspekt zukünftiger Forschung liegt in der Untersuchung von Wärmekraftmaschi-

nen in der Quantenphysik. In theoretischen Arbeiten wurde vorgeschlagen, die Leistung einer Wärmekraftmaschine durch die Kopplung an ein Quantenbad zu steigern. Dies können etwa kohärente, gequetschte oder nichtklassisch-korrelierte Bäder [5] sein, die z. B. überlagerte oder verschränkte Zustände aufweisen. So bieten sich vielfältige Möglichkeiten, über die Paradigmen der klassischen Thermodynamik hinauszugehen und neuartige Motoren zu bauen.

Quantenbäder zwingen uns ebenfalls, einen genaueren Blick auf die Grundlagen thermodynamischer Größen zu werfen, insbesondere die der Entropie. Eine interessante Verbindung zwischen Thermodynamik und Quantenfehlerkorrektur ist das algorithmische Kühlen, bei dem einem System Entropie entzogen wird [6]. Für eine experimentelle Umsetzung von Quanten-Wärmekraftmaschinen ist eine ausgezeichnete Kontrolle von System und Bad unabdingbar.

Daher eignen sich dafür vermutlich Ionenkristalle in Paul-Fallen [7] oder nanomechanische Oszillatoren höchster Güte [8] besonders gut.

**Ferdinand Schmidt-Kaler
und Eric Lutz**

Prof. Dr. Ferdinand Schmidt-Kaler, QUANTUM, Institut für Physik, Universität Mainz und **Prof. Dr. Eric Lutz**, Institut für Theoretische Physik II, Uni Erlangen-Nürnberg

- [1] *I. A. Martínez et al.*, *Nature Phys.* **12**, 67 (2015)
- [2] *V. Blickle und C. Bechinger*, *Nature Phys.* **8**, 143 (2012)
- [3] *G. Verley et al.*, *Nature Comm.* **5**, 4721 (2014); *M. Polettini, G. Verley und M. Esposito*, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 050601 (2015)
- [4] *S. M. Douglas, I. Bachelet und G. M. Church*, *Science* **335**, 831 (2012)
- [5] *M. O. Scully et al.*, *Science* **299**, 862 (2003); *J. Roßnagel et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 03602 (2014); *R. Dillenschneider und E. Lutz*, *Europhys. Lett.* **88**, 50003 (2009)
- [6] *J. Baugh et al.*, *Nature* **438**, 470 (2005)
- [7] *D. Leibfried et al.*, *Rev. Mod. Phys.* **75**, 281 (2003); *O. Abah et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 203006 (2012)
- [8] *M. Aspelmeyer, T. J. Kippenberg und F. Marquardt*, *Rev. Mod. Phys.* **86**, 1391 (2014); *A. Dechant, N. Kiesel und E. Lutz*, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 183602 (2015)