

Maxwells Dämon nutzt verborgene Informationen

16.10.2026, 11:00 | Wissenschaft, Forschung, Bildung

Pressemitteilung von: *idw - Informationsdienst Wissenschaft*

Vor mehr als 150 Jahren entstand die Idee des Maxwellschen Dämons — ein Gedankenexperiment, das unser Verständnis vom Zusammenhang zwischen Information und Energie bis heute prägt. Man stellt sich darunter eine Art Türsteher vor, der mithilfe von Informationen über einzelne Teilchen makroskopische Energie gewinnen kann. Diese Idee eines „Dämons“ schien lange Zeit einem Grundgesetz der Thermodynamik zu widersprechen, legt sie doch nahe, dass sich aus einem System im thermischen Gleichgewicht Arbeit herausholen lässt. Doch mittlerweile hat sich dieses scheinbare Paradoxon aufgelöst: Es lässt sich beweisen, dass Information nicht nur eine abstrakte Größe ist, sondern einen thermodynamischen Wert besitzt. Unter geeigneten Bedingungen kann Information in Arbeit umgewandelt werden. Aufgrund dieser Erkenntnis wuchs das Interesse an sogenannten mikroskopischen Informationsmaschinen, die nicht durch Temperaturunterschiede, sondern durch Information angetrieben werden, in den vergangenen Jahren stark an.

Bewegung durch Information kanalisieren

An einem einfachen Bild lässt sich dies gut erklären: Man stelle sich zwei Kammern vor, die mit Gasmolekülen gefüllt und durch eine kleine Tür miteinander verbunden sind. Der Maxwellsche Dämon beobachtet nun die Bewegung einzelner Moleküle und öffnet die Tür nur dann, wenn schnelle Moleküle in die eine Richtung und langsame Moleküle in die andere Richtung fliegen. So wärmt sich eine Kammer allmählich auf, weil sich in ihr die Teilchen mit schnellerer Bewegung ansammeln und schnellere Teilchenbewegung zu Wärme führt. Dagegen wird die andere kälter. Der so entstehende Temperaturunterschied kann genutzt werden, um Arbeit zu verrichten. Entscheidend dabei ist, dass der Dämon dem System selbst keine Energie zuführt. Den energetisch nutzbaren Unterschied erzeugt er allein dadurch, dass er Informationen über die mikroskopische Bewegung der Teilchen auswertet.

In realen Systemen besitzt der Dämon allerdings nie vollständige Informationen. Schon die Position und Geschwindigkeit eines einzelnen Teilchens lassen sich nicht beliebig genau bestimmen. Hinzu kommt: Mikroskopische Maschinen werden typischerweise nicht in einfachen Medien wie Wasser zum Einsatz kommen, sondern in wesentlich komplexeren Umgebungen — etwa in Polymerlösungen, biologischen Flüssigkeiten oder anderen strukturierten Materialien. Diese besitzen eine innere mikroskopische Struktur, die die Bewegung eines Teilchens beeinflusst, selbst aber nicht direkt beobachtbar ist. Ein Teil der für das Öffnen und Schließen der Tür relevanten Information bleibt daher verborgen. Genau diese verborgene Information begrenzt bislang die Effizienz mikroskopischer Maschinen.

Dämon mit Augenklappe

In einer kombinierten experimentellen und theoretischen Studie haben Forschende der Universität Konstanz aus der Arbeitsgruppe von Clemens Bechinger und des Max-Planck-Instituts für Dynamik und Selbstorganisation in Göttingen nun gezeigt, dass sich solche verborgenen Informationen dennoch als thermodynamische Ressource nutzen lassen. Im Experiment wird ein mikroskopisch kleines Teilchen mit Hilfe eines stark fokussierten Laserstrahls in einer komplexen Umgebung festgehalten. Diese besitzt eine dynamische, Spaghetti-artige innere Struktur aus mikroskopischen Bestandteilen, die sich fortwährend umordnen und mit dem Teilchen wechselwirken.

Bewegt sich das Teilchen, verformt es diese innere Struktur. Diese wirkt wiederum auf das Teilchen zurück und beeinflusst dessen spätere Bewegung. Während die Position des Teilchens mit hoher Präzision gemessen werden kann, bleibt die innere Dynamik des umgebenden Mediums unsichtbar. Aus Sicht des Dämons ist das System daher nicht vollständig beobachtbar. Ein Teil der relevanten Information steckt verborgen in der Umgebung. Ohne diese Information kann der Dämon seine Eingriffe nicht optimal an den tatsächlichen Zustand des Systems anpassen — und entsprechend weniger Arbeit aus dem System gewinnen.

Zwei Messungen machen verborgene Information nutzbar

Um einen Teil dieser fehlenden Information dennoch zurückzugewinnen, nutzen die Forschenden eine Strategie mit zwei

aufeinanderfolgenden Messungen. Statt die Position des Teilchens nur einmal zu bestimmen, wird sie zweimal gemessen — mit einem gezielt gewählten zeitlichen Abstand zwischen den beiden Messungen. Durch den Vergleich zweier getrennter Messungen erhalten die Forschenden indirekte Informationen über den verborgenen Zustand des umgebenden Mediums. Auf diese Weise erhält der Dämon indirekten Zugang zu verborgenen dynamischen Prozessen in der Umgebung. Sein Wissen beschränkt sich damit nicht mehr auf eine einzelne Momentaufnahme, sondern umfasst auch zeitliche Korrelationen, also Spuren der Vergangenheit im System. Durch eine geeignete Wahl des zeitlichen Abstands zwischen den beiden Messungen konnten die Forschenden zeigen, dass in der verborgenen Dynamik der Umgebung gespeicherte Energie genutzt und in Arbeit umgewandelt werden kann. Unter geeigneten Bedingungen kann der Dämon durch die Nutzung dieser verborgenen Information sogar mehr Arbeit gewinnen, als aus einer Einzelmessung möglich wäre.

Die Ergebnisse zeigen, dass in verborgenen Freiheitsgraden der Umgebung gespeicherte Information teilweise zurückgewonnen und als energetische Ressource genutzt werden kann. Indem zeitliche Korrelationen und die Erinnerung des umgebenden Mediums ausgenutzt werden, lässt sich hieraus Energie gewinnen. Damit liefert die Studie einen wichtigen Baustein für die Entwicklung zyklisch arbeitender mikroskopischer Informationsmaschinen. Anders als herkömmliche Wärmekraftmaschinen benötigen solche Maschinen keinen Temperaturunterschied und keinen makroskopischen Energiegradienten. Gerade auf mikroskopischen Längenskalen, wo stabile Temperaturgradienten nur schwer aufrechtzuerhalten sind, eröffnet dies einen alternativen Weg: Information über mikroskopische Fluktuationen wird selbst zu einer nutzbaren thermodynamischen Ressource.

Faktenübersicht:

- Sperrfrist bis Freitag, 16. Oktober 2026, 11:00 Uhr MESZ (10:00 UHR London Time, 05:00 UHR U.S. Eastern Time)
- Originalpublikation: The extraction of work from hidden degrees of freedom, Nature Physics; DOI: 10.1038/s41567-026-03442-w, abrufbar ab 16. Oktober 2026 nach der Sperrfrist
- Die Studie zeigt, wie sich verborgene Information in mikroskopischen Systemen in nutzbare Energie umwandeln lässt.
- Clemens Bechinger (Professor für Experimentalphysik an der Universität Konstanz und Mitglied des Centre for the Advanced Study of Collective Behaviour), Lokesh Muruga (Erstautor der Studie) und Felix Ginot, beide Physiker an der Universität Konstanz, sowie Sarah Loos (Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation in Göttingen).
- Gefördert wurde die Arbeit durch den ERC Advanced Grant von Clemens Bechinger: Brownian Particles in non-Equilibrium Baths.

Hinweis an die Redaktionen:

Ein Foto kann im Folgenden heruntergeladen werden:

maxwells_daemon.png (1402×1122)

Bildunterschrift: Ein teilweise informierter Maxwellscher Dämon in einer strukturierten Umgebung. Im klassischen Szenario des Maxwellschen Dämons stehen dem Dämon alle relevanten Informationen über das System zur Verfügung. In einer strukturierten Umgebung mit langsam relaxierenden verborgenen inneren Freiheitsgraden ist dies nicht mehr der Fall: Der Dämon kann zwar die Position des Teilchens verfolgen, die innere Struktur des Spaghetti-artigen Hintergrundmediums bleibt ihm jedoch verborgen. Da dieses Medium durch die Bewegung des Teilchens verformt wird und sich nur allmählich wieder entspannt, speichert es eine Erinnerung an frühere Teilchenbewegungen und beeinflusst die zukünftige Dynamik. Eine doppelte Messung der Teilchenposition kann diese verborgene Information teilweise kompensieren, indem sie zeitliche Korrelationen sichtbar macht und dadurch die Gewinnung nutzbarer Arbeit ermöglicht. (Das Bild wurde mit KI erstellt.)

Copyright: AG Bechinger unter Verwendung von KI

Originalpublikation:

The extraction of work from hidden degrees of freedom, Nature Physics; DOI: 10.1038/s41567-026-03442-w, abrufbar ab 16. Oktober 2026 nach der Sperrfrist

Universität Konstanz

HelenaDietz (Mitarbeiter in der Presse- und Öffentlichkeitsarbeit)

07531 88-3956

helena.dietz@uni-konstanz.de

News-ID: 1327111 • Views: 99 (Stand: 31.10.2026)

Link zur Pressemitteilung:

<https://www.openpr.de/news/1327111/Maxwells-Daemon-nutzt-verborgene-Informationen-idw.html>