

Bewegung aus Unordnung

Eine neue Theorie, die sich auf den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik bezieht, beschreibt die Bewegung aktiver biologischer Systeme.

Rainer Klages

In seinem Buch „Was ist Leben?“ stellte Erwin Schrödinger Überlegungen zum Ursprung lebender Systeme an, indem er Methoden der Statistischen Physik verwendete. Demnach können Organismen als geordnete Zustände fernab des thermischen Gleichgewichts verstanden werden, indem sie ihre eigene Unordnung minimieren. Physikalisch entspricht Unordnung einer positiven Entropie. Schrödinger folgerte daraus: „Wovon sich ein Organismus ernährt, ist negative Entropie [...], indem er sich von all der Entropie befreit, die er während seines Lebens unweigerlich produziert.“ Doch gilt der zweite Hauptsatz der Thermodynamik für lebende Systeme? Benjamin Sorkin von der Universität Tel Aviv in Israel und sein Team haben sich mit der Entropieproduktion in lebenden Systemen befasst, indem sie den zweiten Hauptsatz verallgemeinerten [1]. Aus ihrer Theorie leiten sich wichtige thermodynamische Größen und Beziehungen für lebende Systeme ab.

Die Forschenden knüpften an bekannte, in den letzten Jahrzehnten entwickelte Konzepte an: In den frühen 1990er-Jahren gab es Pionierarbeiten zur Untersuchung von Fluktuationsrelationen, die den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik auf Ein-Teilchen-Systeme fernab des thermischen Gleichgewichts verallgemeinern [2]. Parallel dazu entstand die Theorie der stochastischen Thermodynamik, die grundlegende thermodynamische Konzepte für Vielteilchensysteme, wie Wärme, Arbeit und Entropie, auf Einzelteilchen anwendet [3]. Diese Theorie reproduziert eine ganze Hierarchie zuvor abgeleiteter Fluktuationsrelationen, einschließlich des ersten und zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik für ein sich zufällig bewegendes Brownsches Teilchen in einer Flüssigkeit [4].

In den letzten zehn Jahren dienten Fluktuationsrelationen auch dazu,

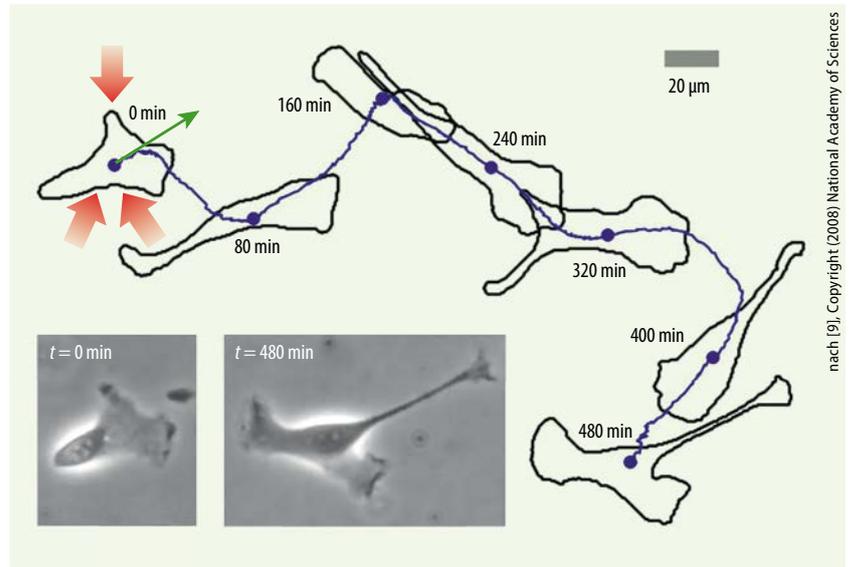


Abb. 1 Eine biologische Zelle (schwarze Kontur), die auf einem Substrat kriecht, entzieht ihrer Umgebung Energie (rote Pfeile) und wandelt sie in Eigenbewegung um (grüner Pfeil). Die neu entwickelte Entsprechung des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik für lebende Systeme stellt eine Beziehung zwischen der aktiven Energieaufnahme einer Zelle und ihrem zufällig wirkenden Weg (blaue Linie) in Bezug auf die Entropieproduktion her [1]. Die Umrisse zeigen die wandernde Zelle, mit Mikroskopieaufnahmen am Anfang und am Ende des Pfades.

biologische Dynamik durch Verknüpfung von stochastischer Thermodynamik mit aktiver Materie zu beschreiben [5]. Beispiele von aktiven Systemen reichen von wandernden Zellen über Vogelschwärme bis zur Bewegung von Menschenmassen [6]. Wenn sich eine kriechende Zelle mithilfe der aus ihrer Umgebung aufgenommenen Energie fortbewegt, sieht ihr Weg zufällig aus (Abb. 1) und ähnelt dem Pfad eines Brownschen Teilchens in einer Flüssigkeit. Doch während ein solches Teilchen passiv durch Stöße mit den umgebenden Flüssigkeitsmolekülen vorankommt, bewegt sich die Zelle aktiv von selbst.

Die Dynamik eines Brownschen Teilchens ist durch ein Gleichgewicht zwischen seinen Fluktuationen und seiner dissipativen Wechselwirkung mit der Umgebung gekennzeichnet. Dieses Gleichgewicht wird charakterisiert durch die sogenannte Einstein-

Gleichung, die einen Zusammenhang zwischen dem Diffusionskoeffizienten des Teilchens, seiner Mobilität und der Temperatur der umgebenden Flüssigkeit herstellt. Sie ist ein Beispiel für eine Fluktuations-Dissipationsrelation, die für gewöhnliche klassische Flüssigkeiten gilt [2–4]. In komplexeren Systemen wie Polymergelen ist die Einstein-Gleichung nicht erfüllt, was mit der Verletzung herkömmlicher Fluktuationsrelationen einhergeht [7]. In aktiver Materie ist dies typischerweise ebenso der Fall aufgrund der speziellen Aufnahme von Energie und die Umwandlung in selbstgetriebene Bewegung [5].

Sorkin und sein Team gingen von einer überdämpften Langevin-Gleichung aus, in der Trägheit und Beschleunigung eines Teilchens vernachlässigt werden und für die die Gültigkeit der Einstein-Gleichung nicht vorausgesetzt wird. Dieser Ansatz

enthält Beispiele von aktiver Materie und passiven Brownschen Teilchen als Spezialfälle. Durch Anwendung der stochastischen Thermodynamik [3, 4] gelang es, den ersten und zweiten Hauptsatz der Thermodynamik zu reproduzieren – unter Annahme der Existenz einer gewöhnlichen thermodynamischen Temperatur.

Auf dieser Grundlage wandten die Forschenden eine fundamentale informationstheoretische Definition von Entropieproduktion an, die den Bruch der Zeitumkehrsymmetrie auf der Ebene mikroskopischer Trajektorien quantifiziert. Ohne die Einstein-Gleichung und die entsprechende thermodynamische Temperatur anzunehmen, sondern anstelle dessen durch Vorgabe dreier spezieller physikalischer Bedingungen leiteten Sorkin und Kollegen eine Gleichung für eine verallgemeinerte Nicht-Gleichgewichtstemperatur ab. Daraus folgt ein zweiter Hauptsatz ohne Einstein-Gleichung. Unter Annahme dieser Gleichung reduziert sich die verallgemeinerte Temperatur auf die gewöhnliche thermodynamische Temperatur, und die neue Theorie reproduziert bekannte Ergebnisse der konventionellen stochastischen Thermodynamik.

Eine wichtige Konsequenz der neuen Theorie ist, dass ohne die Einstein-Gleichung und die damit verbundene thermodynamische Temperatur die konventionellen Fluktuationsrelationen nur auf einer abstrakten, informationstheoretischen Ebene gelten und nicht für thermodynamische Größen – in Übereinstimmung mit

anderen, früheren Arbeiten [7]. Ausgehend von einer verallgemeinerten Temperatur lassen sich nützliche thermodynamische Beziehungen wie die Clausius-Ungleichung, ein verallgemeinerter „Carnot-Wirkungsgrad“ und Grenzen zwischen zwei Schlüsselgrößen der Thermodynamik – der extrahierbaren Arbeit und der Änderung der freien Energie – ableiten. Die Forschenden schlagen vor, das neue Konzept einer verallgemeinerten Temperatur durch Anwendung auf bestimmte experimentelle Systeme zu prüfen, in denen die Einstein-Gleichung nicht erfüllt ist.

Eine neue Form des zweiten Hauptsatzes für lebende Systeme hergeleitet zu haben ist eine recht kühne Behauptung. Da die Theorie keine Einstein-Gleichung erfordert, könnte man sie eher als zweiten Hauptsatz athermalen Dynamik bezeichnen. Hierbei steht „athermal“ für die nicht-thermodynamischen aktiven biologischen Kräfte, die Abweichungen von der klassischen Thermodynamik verursachen [4]. Die Theorie geht insbesondere davon aus, dass die Dynamik überdämpft und Markovsch ist, d. h. unabhängig von der Vergangenheit des Systems. Die überdämpfte Näherung kann jedoch versagen, wenn Schwankungen vom Ort abhängen, etwa bei Temperaturgradienten [8]. Zudem zeigen viele aktive biologische Systeme wie wandernde Zellen eine nicht-Markovsche anomale Diffusion [9]. Hier können Verletzungen von Fluktuations-Dissipationsrelationen von Bedeutung sein, die allgemeiner sind als die Einstein-Gleichung [7].

Diese Überlegungen legen weitere Verallgemeinerungen der Theorie nahe, wie sie auch Schrödinger bereits angedacht hatte: „Lebende Materie entzieht sich zwar nicht den ‚Gesetzen der Physik‘, wie sie bisher aufgestellt wurden, aber es ist wahrscheinlich, dass sie ‚andere Gesetze der Physik‘ impliziert, die bisher unbekannt waren, die aber, wenn sie einmal entdeckt sind, einen ebenso festen Bestandteil dieser Wissenschaft bilden werden wie die ersteren.“

*

Ich danke Lennart Dabelow von der Queen Mary University of London für hilfreiche Kommentare zu diesem Artikel, der eine überarbeitete Übersetzung von [10] ist.

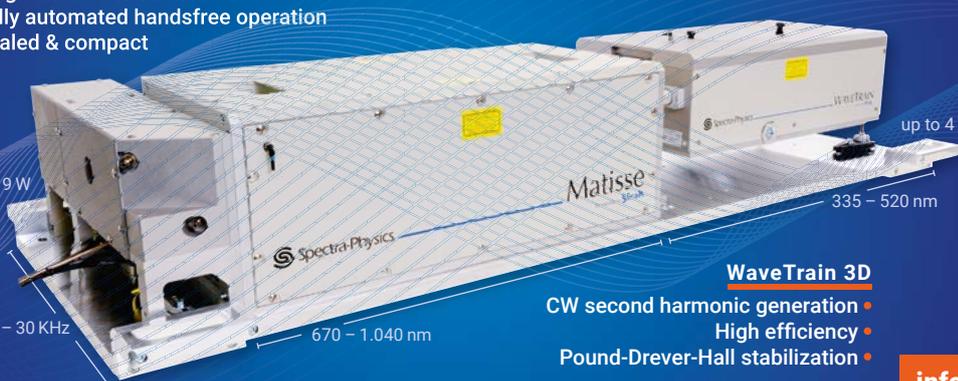
- [1] B. Sorkin et al., Phys. Rev. Lett. **133**, 267101 (2024)
- [2] D. J. Evans et al., Fundamentals of Classical Statistical Thermodynamics, Wiley, Weinheim 2016
- [3] K. Sekimoto, Stochastic Energetics, Springer, Berlin 2010
- [4] U. Seifert, Rep. Prog. Phys. **75**, 126001 (2012)
- [5] L. Dabelow et al., Phys. Rev. X **9**, 021009 (2019)
- [6] S. Ramaswamy, Annu. Rev. Condens. Matter Phys. **1**, 323 (2010)
- [7] S. M. J. Khadem et al., Phys. Rev. Res. **4**, 043186 (2022)
- [8] A. Celani et al., Phys. Rev. Lett. **109**, 260603 (2012)
- [9] P. Dieterich et al., Proc. Natl. Acad. Sci. USA **105**, 459 (2008)
- [10] R. Klages, Physics **17**, 182 (2024)

Der Autor

Dr. Rainer Klages, Centre for Complex Systems, School of Mathematical Sciences, Queen Mary University of London, Mile End Road, London E1 4NS, Großbritannien

Matisse C

- Single mode CW Ti:Sa laser
- Fully automated handsfree operation
- Sealed & compact



up to 9 W
up to 4 W
335 – 520 nm
670 – 1.040 nm
1 MHz – 30 KHz

WaveTrain 3D

- CW second harmonic generation
- High efficiency
- Pound-Drever-Hall stabilization

Sirah
Lasertechnik

The all solid state couple.

Only 1.35 meters length on the laser table!

Used for:
Quantum Technologies // High Resolution Spectroscopy // Raman Spectroscopy // And many more!

info@sirah.com • www.sirah.com