

ist die Dichte räumlich konstant. Dieses Regime der kohärenten Teilchenpropagation wird als Quantentransport bezeichnet.

Die Umsetzung von mesoskopischer Physik mit ultrakalten Atomen bietet weitere spannende Ansätze. Eine sehr interessante Möglichkeit besteht in der praktisch beliebigen Wahl der Wechselwirkung zwischen den ungeladenen Fermionen durch das Ausnutzen von Feshbach-Resonanzen – im Gegensatz zur unveränderlichen Coulomb-Abstoßung zwischen Elektronen. Hierbei lassen sich sowohl die Stärke als auch das Vorzeichen der Wechselwirkung beliebig einstellen, was beispielsweise

erlaubt, den Übergang von stark korrelierten Teilchen zu Quasiteilchen in Quantenflüssigkeiten zu studieren. Die vergleichsweise langsame Dynamik der fließenden Atome vereinfacht zudem Experimente wie die Messung von thermischen Fluktuationen im Strom [4] oder Quantenpumpen [5], d. h. die Erzeugung von Teilchenströmen durch ein zeitabhängiges Potential im Kanal.

Damit eröffnet die Arbeit von Brantut et al. die neue Perspektive, eine Vielzahl von mesoskopischen Experimenten mit ultrakalten Atomen anstelle von Elektronen durchzuführen, ganz im Sinne eines Quantensimulators. Die Erweite-

rung der Experimente zu Bose-Gasen liegt auf der Hand, und erste Resultate in diese Richtung wurden kürzlich am JILA in Boulder veröffentlicht [6].

Martin Bruderer und Wolfgang Belzig

- [1] Y. Imry und R. Landauer, Rev. Mod. Phys. **71**, S306 (1999)
- [2] I. Bloch, J. Dalibard und S. Nascimbène, Nat. Phys. **8**, 267 (2012)
- [3] J.-P. Brantut, J. Meineke, D. Stadler, S. Krinner und T. Esslinger, Science **337**, 1069 (2012)
- [4] M. Bruderer und W. Belzig, Phys. Rev. A **85**, 013623 (2012)
- [5] K. K. Das und S. Aubin, Phys. Rev. Lett. **103**, 123007 (2009)
- [6] S. C. Caliga, C. J. E. Straatsma, A. A. Zozulya und D. Z. Anderson, arXiv:1208.3109v1 (2012)

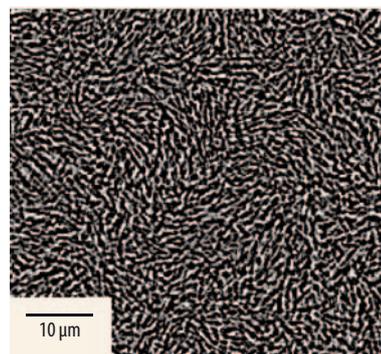
■ Subtile Strömungen

In einem bakteriellen Modellsystem zeigen sich bei hoher Dichte kollektive Bewegungsmuster, die turbulenten Strömungen ähneln und als neue Klasse aktiver Turbulenz gelten können.

Die Fundamente der Statistischen Physik von Systemen im thermodynamischen Gleichgewicht sind seit über hundert Jahren gelegt. Mit den Arbeiten von Boltzmann und Gibbs sind grundlegende Größen wie Entropie und Zustandssumme verbunden. Sie erlauben es, das thermodynamische Gleichgewicht universell und vollständig zu beschreiben, ohne dabei die zugrunde liegenden dynamischen Prozesse im Detail kennen zu müssen. Die uns umgebende Welt ist aber alles andere als im Gleichgewicht: Beispielsweise wenn wir atmen, denken oder essen, laufen komplexe physikalische Prozesse fern des thermodynamischen Gleichgewichts ab. Die Physik steht vor der großen Herausforderung, diese Prozesse zu beschreiben und zu erklären. Je weiter man sich vom thermodynamischen Gleichgewicht entfernt, desto mehr betritt man „terra incognita“. Dort sind komplexe und überraschende Phänomene zu beobachten, die von chaotischem Verhalten bis zu komplexen raumzeitlichen Mustern reichen: Turbulenz in einfachen Flüssigkeiten und Turing-Muster in Reaktions-Diffusions-Systemen

sind dafür klassische Paradigmen. Beide haben ihre Ursache in nichtlinearen Prozessen: Turing-Muster entstehen aufgrund des Zusammenspiels von nichtlinearen chemischen Reaktionen mit Diffusion. Turbulenz tritt in zähen Flüssigkeiten bei hinreichend hohen Strömungsgeschwindigkeiten auf. Erhöht sich die Geschwindigkeit u , mit der eine Flüssigkeit (mit kinematischer Viskosität ν) ein zylindrisches Rohr mit Durchmesser d umströmt, so bricht ab einer bestimmten Reynolds-Zahl ($Re = u \cdot d/\nu$) die laminare Strömung zusammen. Es treten zunehmend komplexere Strukturen auf, die von einzelnen Wirbeln über Kármánsche Wirbelstraßen bis hin zu homogener Turbulenz reichen.

Trotz langjähriger intensiver Forschung existiert keine zufriedenstellende theoretische Erklärung der Turbulenz. Horace Lamb soll 1932 in einer Rede vor der British Association for the Advancement of Science gesagt haben, und scheint damit bis heute Recht zu behalten: „I am an old man now, and when I die and go to heaven there are two matters on which I hope for enlightenment. One is

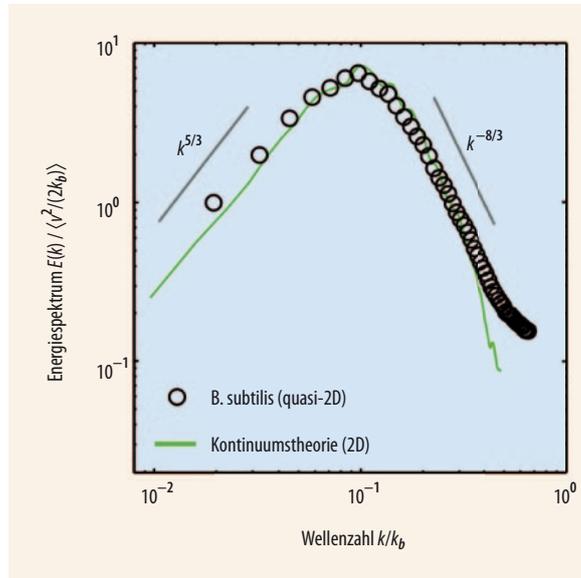


Die stabförmigen Bakterien *Bacillus subtilis* sind etwa 4,8 μm lang und bilden in einer zweidimensionalen Suspension kollektive Bewegungsmuster, wenn die Dichte hoch genug ist.

quantum electrodynamics, and the other is the turbulent motion of fluids. And about the former I am rather optimistic.“

Allgemein akzeptiert ist die Vorstellung von Richardson, dass turbulenter Strömung Energie auf großer Skala zugeführt, zu kleinen Skalen hin transportiert und dort in Wärme umgewandelt wird. Darauf aufbauend konnten Kolmogorov und Kraichnan zeigen, dass die Energiedichte $E(k)$ spektral sehr breit verteilt ist, was sich durch ein Potenzgesetz mit dem Wellenvektor k beschreiben lässt: $E(k) \sim k^{-5/3}$.

Abb. 1 Das Energiespektrum zweidimensionaler bakterieller Suspensionen folgt bei großen und kleinen Wellenzahlen Potenzgesetzen. Kontinuumstheorie und Experiment stimmen sehr gut überein. Das deutet auf einen neuen universellen Mechanismus der „aktiven Turbulenz“ hin. Hierbei bezeichnen $\langle v^2/2 \rangle$ die mittlere kinetische Energie und k_b die Wellenzahl, die der Bacillus-Länge entspricht.



Turbulenz in lebenden Flüssigkeiten

Seit einigen Jahren ziehen neuartige Nichtgleichgewichtssysteme Physiker in ihren Bann, nämlich lebende Materie. Physikalisch betrachtet versteht man darunter Systeme wechselwirkender Objekte, die über einen internen Antriebsmechanismus verfügen. Erste Forschungsarbeiten wurden von dem Ziel geleitet, die faszinierende Vielfalt der Bewegungsmuster von Vogel- und Fischschwärmen zu erklären [1]. Inzwischen sind experimentell weit besser zugängliche Modellsysteme hinzugekommen [2]. Besonders intensiv werden derzeit bakterielle Suspensionen untersucht, in denen sich Bakterien frei schwimmend in einer Flüssigkeit fortbewegen. Ihr Antrieb besteht aus Flagellen, die von molekularen Motoren in eine Drehbewegung versetzt werden. Dadurch erhalten die Bakterien einen Vorwärtsschub. Die Energiezufuhr erfolgt also lokal auf der Skala einzelner „Teilchen“ und nicht wie bei der Turbulenz auf der Skala des gesamten Systems. Darüber hinaus liegen die Reynolds-Zahlen in diesen bakteriellen Suspensionen im Bereich von 10^{-5} und sind somit sehr weit vom klassischen Turbulenzregime ($Re > 10^3$) entfernt.

Eine Kollaboration von Physikerinnen und Physikern aus Düsseldorf, Cambridge und Oxford hat in einem bakteriellen Modellsystem bei hohen Dichten neuartige kollektive Bewegungsmuster ent-

deckt, die (trotz der sehr niedrigen Reynolds-Zahlen) turbulenten Strömungen ähneln und Wirbel auf einer Längenskala zeigen, die einem Mehrfachen der Bakteriengröße entspricht [3]. In den Experimenten wurden Bakterien der Gattung *Bacillus subtilis* in eine quasi zweidimensionale Mikrofluidikkammer eingeschlossen, um die Statistik der Bewegungsmuster im Detail zu vermessen. Ähnlich zu zweidimensionalen turbulenten Strömungen bei hohen Reynolds-Zahlen folgte das Energiespektrum sowohl bei hohen als auch bei niedrigen Wellenzahlen Potenzgesetzen (Abb. 1). Allerdings unterscheiden sich die gemessenen Exponenten deutlich von den Werten der Kolmogorov-Kraichnan-Turbulenz. Das verwundert nicht weiter, da die Dynamik bei völlig unterschiedlichen Reynolds-Zahlen abläuft und die Energiezufuhr auf entgegengesetzten Skalen erfolgt.

Die grundlegende Frage lautet aber, ob sich hier eine neue Klasse „aktiver Turbulenz“ mit universellen Eigenschaften offenbart, die für eine breite Klasse von aktiven physikalischen Systemen gleichermaßen gelten. Genau dafür finden die Autoren überzeugende Indizien. Zum einen zeigen sie durch Computersimulationen, dass für die beobachteten kollektiven Phänomene nur die Stabform der Bakterien und die kurzreichweitige abstoßende Wechselwirkung zwischen ihnen wesentlich sind. Folglich hängen die beobachteten

Phänomene nicht von den komplizierten Details der Wechselwirkungen zwischen den Bakterien ab. Zum anderen können die Autoren eine Kontinuumsbeschreibung für die Dynamik des Geschwindigkeitsfeldes der Bakterien angeben, die eindrucksvoll die experimentellen Energiespektren beschreibt. Die entsprechende Gleichung verbindet Elemente der Navier-Stokes-Gleichung wie Advektion und Dissipation mit Termen, die den inneren Antrieb der Teilchen beschreiben. Ein weiteres Kernelement der Theorie bildet ein aus der nichtlinearen Strukturbildung entlehnter Mechanismus: Linear instabile Moden, die sich über ein breites Band von Wellenvektoren erstrecken, erzeugen verbunden mit der nichtlinearen Advektion eine Art chaotische Dynamik. Diese hydrodynamische Theorie stimmt sehr gut mit den Daten überein. Daher besteht Hoffnung, dass damit ein vielversprechender theoretischer Zugang gefunden wurde, der als Minimalmodell für die Musterbildung in dichten aktiven Systemen gelten kann.

Die lebendige Materie hält sicherlich noch jede Menge Überraschungen bereit und wird uns neue universelle Phänomene ähnlich der „aktiven Turbulenz“ bescheren. Die große Herausforderung besteht darin, in enger Zusammenarbeit zwischen Theorie und Experiment die zugrunde liegenden Mechanismen zu identifizieren und mit geeigneten Modellen zu quantifizieren.

Erwin Frey

[1] T. Vicsek und A. Zafiris, *Collective motion*, *Physics Reports* **517**, 71 (2012)
 [2] V. Schaller, C. Weber, C. Semmrich, E. Frey und A. R. Bausch, *Nature* **467**, 73 (2010); D. L. Koch und G. Subramanian, *Annu. Rev. Fluid Mech.* **43**, 637 (2011)
 [3] H. W. Wensink, J. Dunkel, S. Heidenreich, K. Drescher, R. E. Goldstein, H. Löwen und J. M. Yeomans, *PNAS* **109**, 14308 (2012)