

## ■ Mehr Kapazität für ultrakalte Fermi-Gase

Strömende Quantengase geben Einblicke in Transportprozesse auf atomaren Skalen.

Das Entladen eines Kondensators darf als Experiment im Physikunterricht nicht fehlen: Ein Draht verbindet zwei Metallplatten mit ungleichen elektrischen Ladungen, sodass die Elektronen von einer Platte zur anderen fließen, bis das System im Gleichgewicht ist. Was passiert aber, wenn man in diesem zweifellos makroskopischen Experiment den Draht in Länge und Durchmesser auf atomare Größe schrumpft? Die Quantenmechanik besagt, dass sich die Elektronen dann nicht mehr wie Teilchen, sondern als Wellen durch den Draht bewegen.

Genau solche Fragen gehören in den Bereich der mesoskopischen Physik, die den Quantentransport von Elektronen durch Nanostrukturen in seiner ganzen Komplexität mithilfe des Landauer-Büttiker-Formalismus beschreibt. Landauer hatte die grundlegende Einsicht, dass sich Nanostrukturen ähnlich einem Wellenleiter als Kanäle für den kohärenten Transport von Elektronen betrachten lassen [1]. In diesem Bild verbinden die Wellenleiter makroskopische Reservoirs auf unterschiedlichen Potentialen, meist metallische Kontakte, die lediglich die Rolle von Quellen bzw. Senken für die Elektronen übernehmen. Der Einfachheit halber wird angenommen, dass sich in den Kontakten eine große Zahl an Elektronen im jeweiligen thermodynamischen Gleichgewicht befindet.

Das Interesse an Transportprozessen auf quantenmechanischer Ebene ist allerdings nicht nur auf Elektronen begrenzt, sondern erweitert sich zusehends in Richtung Atomphysik. Insbesondere ultrakalte Quantengase aus bosonischen oder fermionischen Atomen ermöglichen aufschlussreiche Transportexperimente, da sie sich in hohem Maße experimentell kontrollieren lassen. Eine wesentliche Motivation für diese Experimente ist die direkte Quantensimulation von Festkörpern [2], d. h. aus dem Verhalten von ultrakalten Fermi-

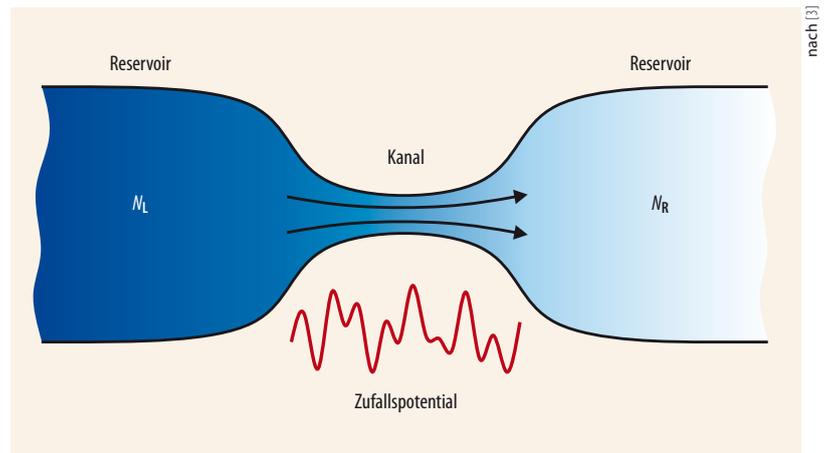


Abb. 1 Sind zwei atomare Reservoirs für entartete Fermi-Gase durch einen engen Kanal verbunden, so fließt ein Ausgleichsstrom, und der Unterschied der Teilchenzahl  $\Delta N = N_L - N_R$  zwischen den

beiden Reservoirs nimmt exponentiell ab. Durch Laserspeckle lässt sich ein Zufallspotential generieren, das Störstellen in einem herkömmlichen elektrischen Leiter nachbildet.

onen sind konkrete Rückschlüsse auf kollektive elektronische Phänomene wie Quantenphasenübergänge möglich. Hinsichtlich der mesoskopischen Physik war jedoch der Spielraum von solchen Quantensimulationen bis vor kurzem stark eingeschränkt, da das atomare Äquivalent zur Batterie oder zum Kondensator fehlte. Die außergewöhnliche Kohärenz der ultrakalten Fermi-Gase schien unvereinbar mit dem klassischen Konzept eines Reservoirs, dessen Atome jegliche Phaseninformation verloren haben.

Brantut und Kollegen an der ETH Zürich ist es jedoch kürzlich gelungen, zwei durch einen engen Kanal verbundene atomare Reservoirs für entartete Fermi-Gase zu realisieren [3]. Dazu haben sie  $^6\text{Li}$ -Atome in einer länglichen magneto-optischen Falle gefangen, die mit Hilfe eines zusätzlichen optischen Potentials in der Mitte abgeschnürt wurde, um die Konfiguration Reservoir-Kanal-Reservoir herzustellen (Abb. 1). Aufgrund der großen Teilchenzahl und inelastischer Prozesse werden dabei die atomaren Wolken zu inkohärenten Reservoirs. Bei anfänglich unterschiedlichen Teilchenzahlen in den Reservoirs beobachteten die Forscher im Experiment einen Ausgleichsstrom durch den Kanal,

der durch das erstaunlich einfache Gesetz

$$d(\Delta N)/dt = -(G/C) \Delta N$$

beschrieben wird. In Analogie zum Kondensator nimmt demnach der Unterschied der Teilchenzahl  $\Delta N$  zwischen den Reservoirs exponentiell ab, abhängig von der Leitfähigkeit des Kanals  $G$  und der Kompressibilität des Fermi-Gases  $C$ .

Über die Messung von Strömen hinaus besteht bei ultrakalten Atomen die spezielle Möglichkeit, deren Dichteverteilung mit einer hochauflösenden Optik direkt zu beobachten. Auf diese Weise verglichen Brantut et al. die Verteilung der strömenden Fermionen im Kanal ohne bzw. mit einem zusätzlichem Zufallspotential (Abb. 1). Dieses Potential wurde durch Laserspeckle erzeugt, um Störstellen in einem herkömmlichen elektrischen Leiter nachzubilden. Bei gleichem Strom führte das Zufallspotential zu diffusem Transport der Fermionen, was sich in einem kontinuierlichen Abfall der Dichte über den ganzen Kanal zeigte. Dies ist analog dem klassischen Transport von Elektronen in einem elektrischen Leiter. Ohne Speckle ist der Transport dagegen durch die in Kanalrichtung laufenden atomaren Wellen bestimmt, und folglich

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)

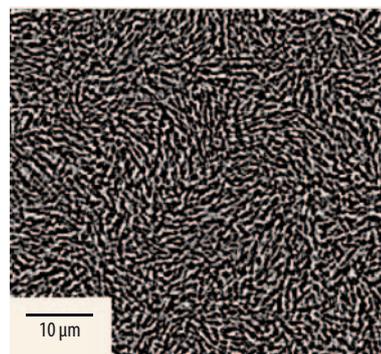
## ■ Subtile Strömungen

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  $\nu$ ) 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  $\mu\text{m}$  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:  $E(k) \sim k^{-5/3}$ .