

■ Ein Förderband für kalte Atome

Ein Bose-Einstein-Kondensat von Rubidium-Atomen lässt sich vollkommen kohärent in einem Ratschenpotential gerichtet bewegen.

Wie kann aus der ungeordneten Brownschen Bewegung von mikroskopischen Objekten, z. B. Zellen, ein gerichteter Transport entstehen? Diese insbesondere für die Biologie, aber möglicherweise auch für die Technik relevante Frage beantwortet die Physik mit dem Konzept der Brownschen Motoren [1]. Demnach lässt sich die ungeordnete Bewegung in räumlich periodischen Strukturen auf verblüffende Weise gleichrichten, obwohl im Mittel keine Kräfte, Temperaturgradienten oder Konzentrationsgefälle wirken. Dies setzt allerdings voraus, dass sich die zufälligen Fluktuationen mit makroskopischen Reibungs-

kräften im dynamischen Gleichgewicht befinden. Aber lässt sich eine gerichtete Bewegung mit einer endlichen, mittleren Geschwindigkeit auch ohne Reibung erzielen, wenn sämtliche Anfangsgeschwindigkeiten im Mittel keine Vorzugsrichtung aufweisen? Kräfte führen gewöhnlich zu einer beschleunigten Bewegung, die entweder räumlich eingeschränkt ist oder unbegrenzt anwächst. So führt das Anlegen einer konstanten Kraft in einem periodischen Potential mit genügend großer Anfangsenergie zu einer unbegrenzt beschleunigten Bewegung über viele Potentialberge hinweg. An dieser Situation ändert auch die Quantenphysik überhaupt

nichts: Eine konstante Kraft führt nun zu sog. Bloch-Oszillationen oder in Gegenwart von quantenmechanischen Interband-Tunnelvorgängen wiederum zu einer unbegrenzten Beschleunigung.

Daher ist es zunächst sehr erstaunlich, dass sich auch ohne Reibung, also im Rahmen einer Hamiltonschen Dynamik, das Ziel einer mittleren gerichteten Bewegung verwirklichen lässt [2]. Man muss dabei schon auf pfiffige Ideen zurückgreifen. Wie schon bei den Brownschen Motoren bedarf es dazu der Brechung von Symmetrien, insbesondere der Zeitumkehrsymmetrie, da sich ansonsten Vorwärts- und Rückwärtsbewegungen

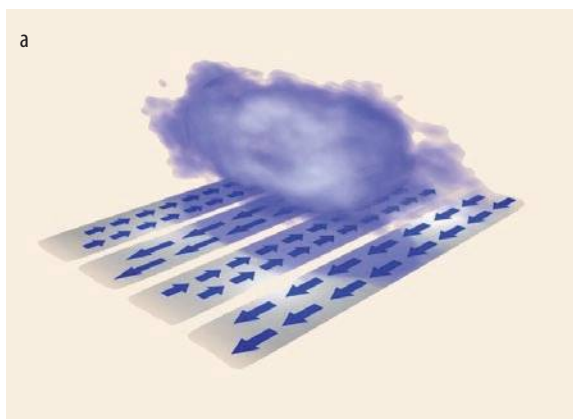
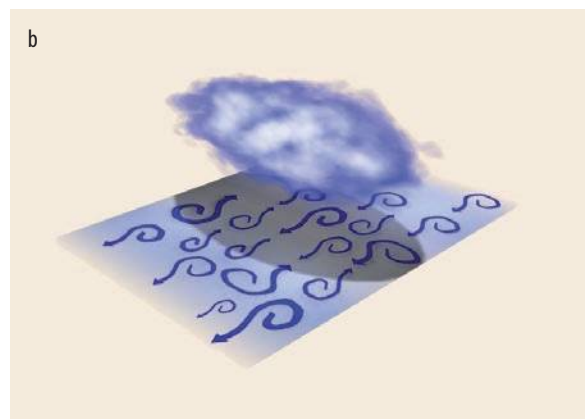


Abb. 1 a) Bei der Hamiltonschen Quantenratsche setzt sich die gerichtete Bewegung einer Wolke aus Bose-Einstein-kondensierten Rubidium-Atomen



zusammen aus gewichteten, transportierenden Floquet-Zuständen mit jeweils unterschiedlichen mittleren Geschwindigkeiten, die damit ein Quanten-Förder-

band für kalte Atome nachahmen [3, 4]. b) Bei der klassisch chaotischen Ratsche übernimmt eine chaotische Strömung die Rolle der Floquet-Zustände [2].

gegenseitig kompensieren würden. Theoretische Ansätze zeigen, wie im Zeitmittel gerichteter Transport entstehen kann, wenn zeitlich variierende Kraftfelder, die die Zeitumkehrsymmetrie brechen, mit chaotischer Dynamik kombiniert werden [2]. Man macht dabei von der Tatsache Gebrauch, dass niedrigdimensionale Hamiltonsche Dynamiken mit zeitlichen Rüttelkräften einen gemischten Phasenraum erzeugen, mit regulären und chaotischen Bewegungsbahnen. Startet innerhalb des chaotischen Phasenraums eine Trajektorie mit verschwindender Anfangsgeschwindigkeit, so „erwandert“ diese den ganzen Phasenraum (Ergodizität), und eine selbstmittelnde asymptotische Geschwindigkeit stellt sich ein. Diese Geschwindigkeit hängt insbesondere nicht vom Anfangszeitwert t_0 des zeitlichen Kraftfeldes ab. In der Quantenmechanik ist die Rolle des Chaos aufgrund der Heisenbergschen Unbestimmtheit von Ort und Impuls allerdings viel ver-

zwickter. Insbesondere vergisst die Quantenmechanik mit der ihr eigenen, unitären Zeitentwicklung die Anfangsbedingungen nicht. Kürzliche theoretische Studien zeigen jedoch, dass auch im Hamiltonschen Regime ein quantenmechanischer Transport realisierbar ist [3].

Physiker um Tobias Salger und Martin Weitz von der Universität Bonn haben die Herausforderung angenommen, diese Vorhersagen im Experiment zu überprüfen. Sie „bauten“ dazu mit einer stehenden Lichtwelle, deren Intensität in Raum und Zeit variiert, eine Art eindimensionale Wellpappe, in der sich ein Profil steiler und weniger steiler Flanken (Ratschenpotential) abwechselt [4]. Befinden sich in so einem asymmetrischen Sägezahnpotential nicht Brownsche Teilchen, sondern Atome, so sollten sich Quanteneffekte bemerkbar machen [1]. Die Lichtwelle entsteht durch Überlagerung einer Grundfrequenz und deren zweiten Harmonischen, die zudem gegenüber der Grund-

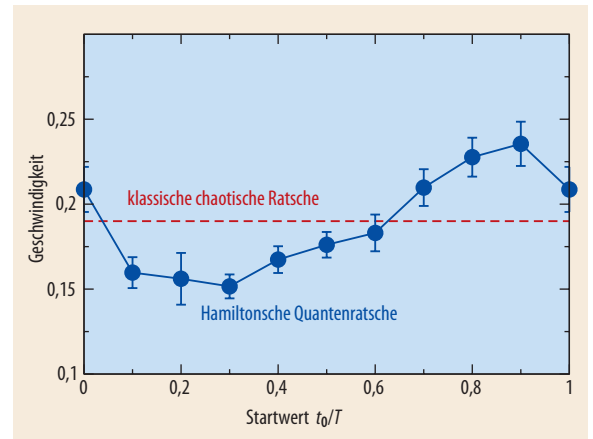


Abb. 2 Die gerichtete Geschwindigkeit eines Bose-Einstein-Kondensates hängt charakteristisch vom Startwert t_0 der zeitlichen, periodischen Modulation ab. Eine Mittelung über diesen Startwert t_0 ergibt einen endlichen Wert. Im Gegensatz dazu ist für eine klassisch chaotische Ratsche die gerichtete Bewegung ergodisch, womit diese Abhängigkeit von t_0 entfällt.

frequenz phasenverschoben ist. Zunächst wird eine Wolke von Bose-Einstein-kondensierten Rubidium-Atomen mit verschwindendem Gesamtimpuls in dem eindimensionalen Ratschenpotential präpariert. Die Quantendynamik der

kalten Rubidium-Atome lässt sich in extrem guter Näherung durch einen Hamilton-Operator der Form, $H(t) = p^2/2m + V(x, t)$ beschreiben, wobei das zeitlich pulsierende Potential die Form $V(x, t) = V(x)A(t)$ mit dem Sägezahnprofil $V(x)$ und einer Amplitudenmodulation $A(t)$ hat. Durch eine entsprechende Wahl für die Modulation $A(t)$ lässt sich die zeitliche Symmetrie brechen. Für die Floquet-Zustände, also das Analogon von Energie-Eigenzuständen bei zeitlich periodischen Hamilton-Operatoren, bedeutet dies, dass deren mittlere Geschwindigkeit von null verschieden ist [3]. Je nach der Anfangspräparation tragen verschiedene transportierende Floquet-Zustände mit unterschiedlichem Gewicht zur gerichteten Bewegung bei (Abb. 1). Bei Parameterwerten der Modulation $A(t)$, die die Zeitumkehr nicht bricht, sind alle Geschwindigkeiten der Floquet-Zustände null, sodass die gerichtete Quantenbewegung verschwinden sollte [3].

Salger et al. haben in ihrem Experiment das Verschwinden des Stromes bei den entsprechenden Parameterwerten bestechend verifiziert (s. Abb. 3 in [4]). Darüber

hinaus haben sie – im klaren Gegensatz zu klassischen Ratschen und Quantenratschen mit Energielaxation (Quantendissipation) – eindrucksvoll bestätigt, dass die zeitlich gemittelte Geschwindigkeit eine Funktion des Startwertes t_0 der Amplitudenmodulation ist (Abb. 2) [4]. Damit geht in diesem Experiment zweifelsohne kohärenter Quantentransport gerichtet voran. Zugleich ist dieses Experiment ein Meilenstein auf dem Weg zu reinen, reibungsfreien Quantenmaschinen, wie sie kürzlich theoretisch konzipiert worden sind [5]. Diese verrichten dissipationfreie Arbeit gegenüber äußeren Kräften.

Die Natur ermöglicht kein wirklich reines Quantensystem, das absolut immun gegenüber jeglicher, wenn auch kleinster Dekohärenz wäre. Auch in diesem Experiment schlägt mit zunehmender Beobachtungszeit der Einfluss einer endlichen, wenn auch kleinen Dissipation zu. Das Problem einer Quantenratsche bei sehr schwacher Dissipation ist extrem anspruchsvoll und trickreich, weil ein zunächst unitäres und nicht-ergodisches Verhalten „zunehmend“ in ein ergodisches Quantenverhalten

übergehen muss [6]. Insbesondere geht die Dynamik bei starker Dekohärenz in ein quasi-klassisches Verhalten über, wie es Ferruccio Renzoni und seine Mitarbeiter schon vor Jahren theoretisch und experimentell analysiert haben [7]. Wichtige andere Herausforderungen sind Untersuchungen von Quantenratschen bei Anwesenheit von Atom-Atom-Wechselwirkung [8] oder statischer und dynamischer Unordnung. Das faszinierende Gebiet der Quantenratschen wird sicher auch weiterhin Überraschungen bereithalten.

Peter Hänggi und Sergey Denisov

- [1] R. Bartussek und P. Hänggi, Phys. Blätter, Juni 1995, S. 506
- [2] S. Flach et al., Phys. Rev. Lett. **84**, 2358 (2000)
- [3] S. Denisov et al., Phys. Rev. A **75**, 063424 (2007)
- [4] T. Salger et al., Science **326**, 1241 (2009)
- [5] A. V. Ponomarev et al., Phys. Rev. Lett. **102**, 230601 (2009)
- [6] S. Denisov et al., EPL **85**, 40003 (2009)
- [7] M. Schiavoni et al., Phys. Rev. Lett. **90**, 094101 (2003)
- [8] D. Poletti et al., Phys. Rev. Lett. **102**, 130604 (2009)