

■ Schaltkreise für Quantenphasenübergänge

Mit mesoskopischen Quantenschaltkreisen lassen sich theoretische Vorhersagen zu kollektiven Phänomenen in quantenmechanischen Vielteilchensystemen testen.

Denkt man an Magnetismus und Supraleitung, so fällt es leicht, die Untersuchung von Emergenz in quantenmechanischen Vielteilchensystemen durch weitreichende technologische Anwendungen zu rechtfertigen. Oft ist es aber die reine Neugier, die Physiker antreibt, die diversen Manifestationen dieses kollektiven Phänomens zu untersuchen. Diese Motivation liegt wohl den jetzt publizierten Experimenten einer Gruppe um Frédéric Pierre von der Université Paris Sud zugrunde [1]. Die Forscher nutzen dabei aus, dass sich mesoskopische Quantenschaltkreise und eindimensionale (1D) Vielteilchensysteme mit einer Verunreinigung äquivalent verhalten, um theoretische Vorhersagen zu einem emergenten Quantenphasenübergang mit bislang unerreichter Präzision und Variabilität der Parameter zu bestätigen.

In translationsinvarianten, eindimensionalen Elektronensystemen führt die Zweiteilchen-Wechselwirkung zu einer Vielzahl kollektiver Phänomene, wie z. B. dem Mott-Isolator. Selbst wenn das wechselwirkende System metallisch bleibt, bricht das in der Festkörperphysik häufig verwendete Bild unabhängiger Teilchen zusammen. Die elementaren Anregungen sind keine Quasi-Teilchen, sondern

kollektiver Natur. Duncan Haldane zeigte zu Beginn der 1980er-Jahre, dass sich die Niederenergiephysik von 1D-Metallen durch das Tomonaga-Luttinger-Modell (TLM) beschreiben lässt [2]. Die mikroskopischen Details, wie die Bandstruktur, gehen dabei in die Parameter des TLM ein, unter anderem in den Wechselwirkungsparameter K . Diverse Observablen und Korrelationsfunktionen des TLM lassen sich exakt berechnen, sodass die Physik so genannter TL-Flüssigkeiten sehr gut verstanden ist.

Ein interessanter Aspekt ist das Wechselspiel aus Störstellen und der Zweiteilchen-Wechselwirkung. Die quantenmechanische 1D-Streuung eines wechselwirkungsfreien Teilchens an einem schwachen Potential führt bei Temperatur $T=0$ zu einer leichten Reduktion des Leitwerts. Da die Anregungen im TLM aber von kollektiver Natur sind, sollte der Bruch der Translationsinvarianz in diesem Modell einen stärkeren Einfluss auf die Transporteigenschaften haben [3].

Im Rahmen des feldtheoretischen „local sine-Gordon“-Modells (LSGM), das sich aus dem TLM durch das Hinzufügen eines reinen Rückstreuers ergibt, wurde gezeigt, dass der Leitwert selbst für eine beliebig kleine Verunreinigung im Limes kleiner Energien

($T \rightarrow 0$) [4, 5] verschwindet. Bei $T=0$ sorgt das Wechselspiel aus der Zweiteilchenwechselwirkung und einer einzelnen Verunreinigung erstaunlicherweise dafür, dass aus dem Metall ein Isolator wird. Dabei handelt es sich um einen Quantenphasenübergang, den quantenmechanische statt thermischer Fluktuationen treiben.

Dieselbe Niederenergiephysik findet sich auch in Gittermodellen mit lokaler Inhomogenität, wie sie in der Festkörperphysik studiert werden. Dies ließ sich durch die Kombination numerischer und feldtheoretischer Methoden [6] sowie die Anwendung der funktionalen Renormierungsgruppe [7] zeigen. Im quantenkritischen Bereich ist die Änderung des Leitwerts g mit der Temperatur durch die so genannte β -Funktion

$$\frac{dg}{d \ln T} = \beta_{\kappa}(g)$$

charakterisiert. Diese hängt zwar vom Wechselwirkungsparameter K ab, nicht jedoch von den mikroskopischen Details des Systems.

Auch wenn inzwischen zahlreiche Festkörpersysteme realisiert wurden, in denen sich die Elektronen effektiv nur entlang einer Achse bewegen können, etwa stark anisotrope 3D-Kristalle, Kohlenstoffnanoröhren und Atomketten auf Oberflächen, konnte diese universelle Physik aufgrund von eingeschränkten Parameterbereichen und der Kopplung an andere Freiheitsgrade bisher nicht überzeugend nachgewiesen werden.

Die neuen Experimente nutzen nun aus [1], dass das LSGM auch das Niederenergiemodell des betrachteten mesoskopischen Schaltkreises ist. Quantisierte elektromagnetische Moden realisieren dabei das Vielteilchensystem. Ein mit einem Widerstand in Reihe geschalteter Quantenpunktkontakt entspricht der lokalen Verunreinigung, dessen Transmissionswahrscheinlichkeit τ sich mit Hilfe

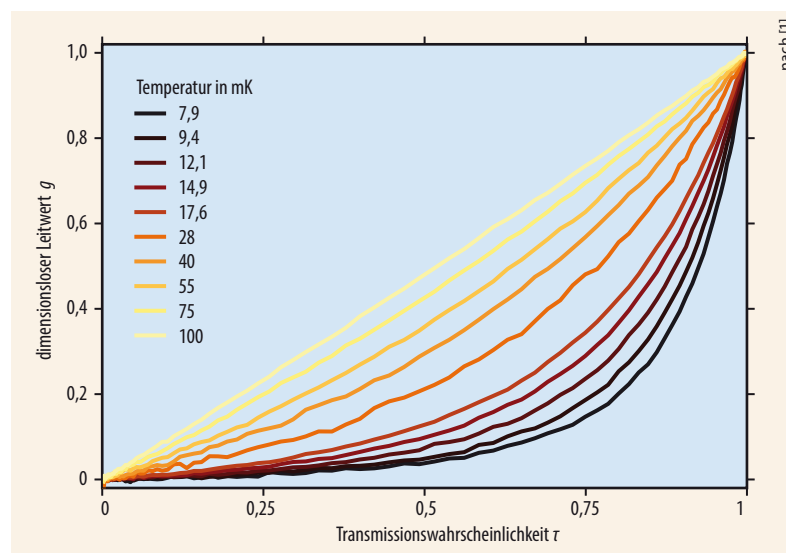


Abb. 1 Der (dimensionslose) lineare Leitwert ist für alle Transmissionswahrscheinlichkeiten kleiner 1 bei niedrigen Temperaturen deutlich unterdrückt ($K=1/2$).

einer angelegten Gatterspannung variieren lässt. Der Widerstand $R = (1/K - 1) h/e^2$ legt den Parameter K fest, der sich, im Gegensatz zu älteren Experimenten [8], durch das An- bzw. Ausschalten von ballistischen Elektronenkanälen diskret variieren lässt, bei n aktiven Kanälen: $K = n/(n+1)$. Die Messungen zeigen, dass die Unterdrückung des Leitwerts bei niedrigen Temperaturen T selbst dann zu erkennen ist, wenn die Transmissionswahrscheinlichkeit τ , welche die Verunreinigungsstärke parametrisiert, gegen 1 geht (Abb. 1): Für $T = 0$ würde $g = 0$ für alle $\tau < 1$ gelten.

Betrachtet man die Werte der β -Funktion für verschiedene τ und T bei $K = 1/2, 3/4$ und $4/5$, dann fallen die Daten im Rahmen der experimentellen Genauigkeit auf universelle K -abhängige Kurven, die ohne Fitparameter sehr gut zu den theoretischen Ergebnissen passen (Abb. 2). Für $K = 1/2$ ist die für das LSGM exakt berechnete β -Funktion dargestellt [1, 5]. Die Kurven für $K = 3/4$ und $4/5$ sind mit der funktionalen Renormierungsgruppe für ein Gittermodell spinloser Fermionen mit Nächste-Nachbar-Wechselwirkung bestimmt [7], die zuverlässige Ergebnisse in diesem Parameterbereich liefert. Die sehr gute Übereinstimmung von Experiment und Theorie stellt einen beeindruckenden Nachweis von emergenter Universalität bei niedrigen Energieskalen in so verschiedenen Systemen wie einem fermionischen Gittermodell, dem feldtheoretischen LSGM und dem experimentell realisierten Quantenschaltkreis dar.

In [1] ist der Vergleich auf die bei $K = 1/2$ und $2/3$ im LSGM exakt bestimmbare β -Funktion beschränkt. Für die kleineren $1 - K$ sprechen die Autoren dann von einer Quantensimulation im Feynmanschen Sinn, in der ein experimentelles System benutzt wird, um ein theoretisch bislang ungelöstes quantenmechanisches Vielteilchenproblem zu simulieren. Im Bereich der kalten Atomgase, der Ionenfallen und der supraleitenden Schaltkreise, mit deren Hilfe es möglich ist, Hamilton-Operatoren experimen-

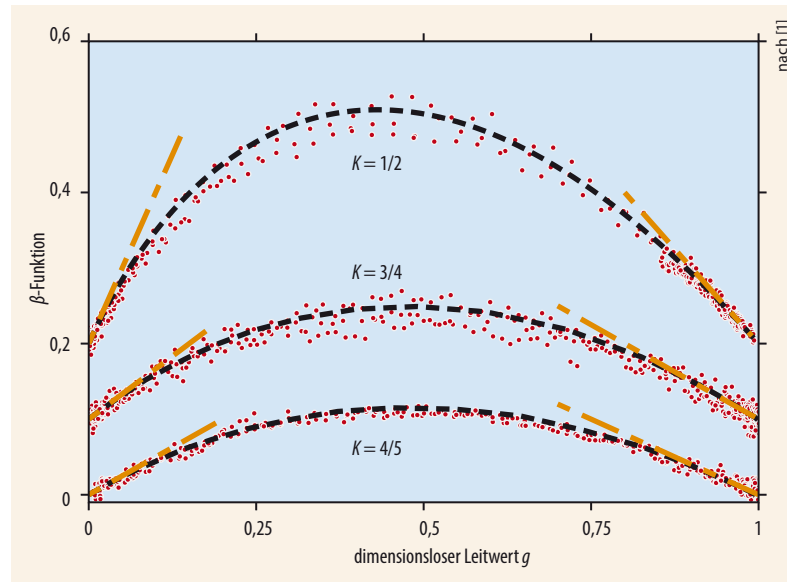


Abb. 2 Für die universelle, aber K -abhängige β -Funktion stimmen Experiment (rot) und Theorie (schwarz) gut überein. Dies gilt auch für die für alle K analytisch bekannten Grenzwerte

$2(1/K-1)g$ für $g \ll 1$ und $2(1-K)(1-g)$ für $(1-g) \ll 1$ (orange) [5, 6, 7]. Zur besseren Sichtbarkeit sind die Kurven ausgehend von $K = 4/5$ jeweils um 0,1 nach oben verschoben.

tel „nachzubauen“, erfährt die Quantensimulation aktuell einen großen Aufschwung. Angesichts der sehr guten Übereinstimmung von Experiment und Theorie auch für $K = 3/4$ und $4/5$ überzeugt diese Argumentation hier nicht unbedingt. Sie mag dem Zeitgeist geschuldet sein, demzufolge exzellente Experimente für sich genommen keine angemessene Anerkennung mehr zu finden scheinen.

Die von der Gruppe um Frédéric Pierre verwendeten Techniken eröffnen die Möglichkeit, weitere Modelle im Labor zu simulieren und offene Fragen zu klären. Ersetzt man beispielsweise die Verunreinigung durch einen Quantenpunkt [8], so finden sich konkurrierende theoretische Vorhersagen für das

erwartete Verhalten [7]. Ferner wäre es interessant, zeitabhängige Vielteilchensysteme zu simulieren, die sich nur schwer theoretisch analysieren lassen.

Dante M. Kennes, Sabine Andergassen und Volker Meden

- [1] A. Anthore et al., Phys. Rev. X **8**, 031075 (2018)
- [2] F. D. M. Haldane, J. Phys. C **14**, 2585 (1981)
- [3] A. Luther und I. Peschel, Phys. Rev. B **9**, 2911 (1974)
- [4] W. Apel und T. M. Rice, Phys. Rev. B **26**, 7063 (1982)
- [5] C. L. Kane und M. P. A. Fisher, Phys. Rev. B **46**, 15233 (1992)
- [6] S. Eggert und I. Affleck, Phys. Rev. B **46**, 10866 (1992)
- [7] V. Meden et al., New J. Phys. **10**, 045012 (2008)
- [8] H. T. Mebrahtu et al., Nature **488**, 61 (2012)

Dr. Dante M. Kennes, Fachbereich Physik, Freie Universität Berlin, 14195 Berlin, **Prof. Dr. Sabine Andergassen**, Institut für Theoretische Physik, Universität Tübingen, 72076 Tübingen und **Prof. Dr. Volker Meden**, Institut für Theorie der Statistischen Physik, RWTH Aachen, 52056 Aachen

KURZGEFASST

■ Zielgerichtete Photonen

Physiker der Universität Bonn haben eine auf dem Purcell-Effekt basierende Methode vorgestellt, die sich eignen könnte, um Quanten-Repeater herzustellen. Sie bestrahlten ein Rubidium-Atom, das sich zwischen zwei Spiegeln befindet, mit Laserlicht. Nach der Anregung emittierte das Atom ein Photon, das sich nicht mehr rein zufällig fortbewegt, sondern vorzugsweise in Richtung einer der beiden Spiegel. *J. Gallego et al., Phys. Rev. Lett.* **121**, 173603 (2018)

■ Erwartungsgemäß verletzt

Ein Wissenschaftlerteam der Universität Mainz hat die Paritätsverletzung bei Ytterbium-Isotopen unterschiedlicher Neutronenzahl ermittelt. Das Ergebnis: je mehr Neutronen im Kern, umso größer die Paritätsverletzung. Die Untersuchungen an den mit Laserlicht angeregten Atomen bestätigen erstmals die entsprechende Vorhersage des Standardmodells der Teilchenphysik. *D. Antypas et al., Nature Phys.*, DOI: 10.1038/s41567-018-0312-8 (2018)