

■ Getrennt auf Abruf

Elektronen lassen sich einzeln oder als Paare quasi auf Knopfdruck erzeugen. Die Streuung an einem Strahlteiler gibt Aufschluss über Quantenkorrelationen von Elektronenpaaren.

Licht lässt sich über Lichtleiter, Strahlteiler und Polarisatoren gezielt transportieren, zur Interferenz bringen und polarisieren. In der Quantenoptik sind solche Manipulationen mit einzelnen Photonen schon länger möglich. Nun versuchen Wissenschaftler, diese Konzepte auch auf Elektronen zu übertragen, die sich beispielsweise in den eindimensionalen Kanälen bewegen, die beim Quanten-Hall-Effekt am Probenrand existieren („Randkanäle“). Darin bewegen sich Elektronen sehr gut ballistisch, d. h. ohne Streuung auf Distanzen von mehreren Mikrometern, ähnlich wie Photonen in einem Lichtleiter. Streuung lässt sich aber gezielt durch Quantenpunktkontakte induzieren, die als elektrisch steuerbare Strahlteiler agieren können (Abb. 1). Die der Lichtintensität entsprechende Observable ist hier der elektrische Strom [1]. Allerdings gibt es auch relevante Unterschiede. Elektronen sind Fermionen und stoßen sich ab (Antibunching), während Photonen Bosonen sind und die Tendenz haben zu klumpen (Bunching).

Netzwerke aus einzelnen Photonen oder Elektronen (bzw. einer Kombination aus beiden) könnten als neue Konzepte zur Informationsübertragung dienen. In der Quanteninformation oder für das Quantencomputing ist zudem die Verschränkung zweier Teilchen entscheidend. Die Idee ist dabei, dass Teilchenpaare räumlich getrennt und deren Partner damit unterscheidbar gemacht werden, jedoch in einem anderen Quantenfreiheitsgrad korreliert (verschränkt) bleiben. Diese Trennung kann im Prinzip so weit gehen, dass keine Wechselwirkung zwischen den Teilchen mehr besteht. Seit einiger Zeit lassen sich in der Polarisation verschränkte Photonen erzeugen. Eine äquivalente Spin-Verschränkung für propagierende Elektronen wurde bislang noch nicht experimentell nachgewiesen. Allerdings gibt es

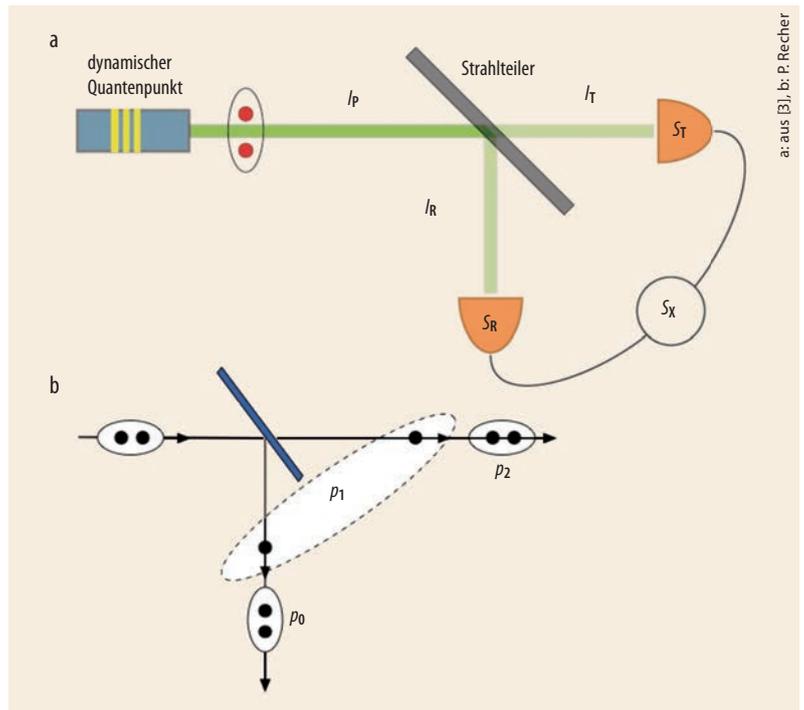


Abb. 1 Elektronen werden einzeln oder als Paare von einem dynamischen Quantenpunkt (Pumpe) in einen Kanal am Probenrand induziert (a). Dort erzeugen sie den Strom I_p , der am Strahlteiler in einen transmittierten Anteil I_T und einen

reflektierten Anteil I_R aufgeteilt wird. S_X ist die Kreuzkorrelation der Stromfluktuationen. Die Wahrscheinlichkeiten p_i charakterisieren die möglichen Streuprozesse der Elektronenpaare (b).

schon Experimente, in denen Cooper-Paare in hybriden Supraleiter-Normalleiter-Strukturen unter Gleichspannung getrennt werden können [2].

An der Universität Hannover ist nun in einem Transport-Experiment, das in Kollaboration mit der PTB und der Universität in Riga durchgeführt wurde, ein weiterer Schritt in Richtung der kontrollierten Erzeugung getrennter Elektronenpaare gelungen [3]. Eine Elektronenpumpe – realisiert durch einen dynamischen Quantenpunkt – induziert periodisch einzelne Elektronen(paare) in einen Quanten-Hall-Randkanal, die an einem Strahlteiler aufgeteilt werden (Abb. 1). Der transmittierte Strom I_T und die Korrelation der Stromfluktuationen S_X zwischen transmittiertem und reflektiertem Strom („Kreuzkorrelation“) lassen sich messen.

Werden einzelne Elektronen periodisch durch Pumpen mit

Frequenz f erzeugt und ballistisch transportiert, beträgt der transmittierte Strom $I_T = T e f$, wobei T die Transmissionswahrscheinlichkeit durch den Strahlteiler und e die Elektronenladung ist. Die Kreuzkorrelation ist negativ, da genau ein Elektron pro Periode der Pumpe transmittiert oder reflektiert wird. Ihr Betrag ist für $T = 1/2$ am größten, da in diesem Fall die Unbestimmtheit maximal ist (50:50-Teilung). Die Streutheorie beschreibt diesen Vorgang durch $S_X = -2eI_T(1 - T)$. Experiment und Theorie stimmen sehr gut überein (Abb. 2a). Die Elektronenpumpe arbeitet also offenbar verlässlich ohne signifikantes Rauschen.

Das Regime der Paaremission ist um einiges strukturreicher, da mit zwei Elektronen mehr Streuprozesse am Strahlteiler möglich sind (Abb. 1b). Insbesondere können sich die Elektronen aufteilen, sodass an jedem Detektor genau eines

ankommt (Wahrscheinlichkeit p_1), oder die Elektronen werden als Paar gestreut (transmittiert mit Wahrscheinlichkeit p_2 oder reflektiert mit Wahrscheinlichkeit p_0). Die Theorie der Zählstatistik erlaubt es, die Prozesswahrscheinlichkeiten p_i durch die Transportgrößen S_x und I_T zu bestimmen [3, 4].

Im Experiment sind zwei dynamische Grenzfälle zu unterscheiden: Wenn die Quantenpunktumpe die beiden Elektronen langsam aussendet (blaue Punkte in Abb. 2b), propagieren diese bei ungefähr gleicher Energie und sequenziell gegen den Strahlteiler. Die beiden Elektronen streuen dann unabhängig voneinander am Strahlteiler mit gleicher Transmissionswahrscheinlichkeit, die fundamentalen Transportprozesse sind also binomialverteilt. Solche Prozesse liegen auf der gekrümmten durchgezogenen Linie in Abb. 2b, was das Experiment in der Tat bestätigt. Falls die Pumpe die beiden Elektronen aber schnell nacheinander emittiert, laufen sie aufgrund der gegenseitigen Coulomb-Wechselwirkung auf dem Quantenpunkt bei verschiedenen Energien und zeitlich enger beieinander gegen den Strahlteiler [3]. Wenn die Streuprozesse der beiden Elektronen weiterhin unabhängig voneinander sind, aber mit verschiedenen Transmissionswahrscheinlichkeiten, liegen die

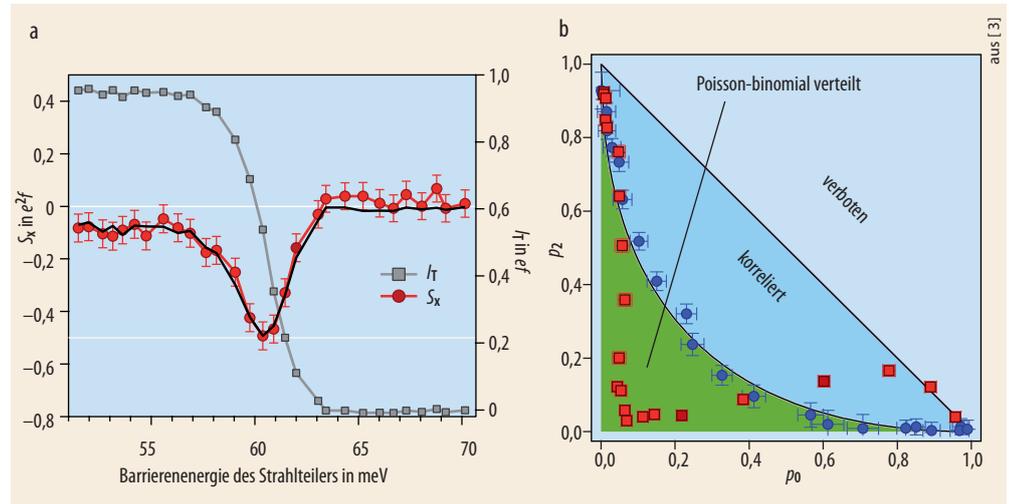


Abb. 2 Die Pumpe erzeugt einzelne Elektronen (a). Der transmittierte Strom I_T ist eine monotone Funktion der Barrierenenergie und die Kreuzkorrelation S_x ist negativ. Ihr Minimum bei $-0,5 e^2 f$ entspricht der maximal möglichen Antikorrelation (Antibun-

ching) einzelner Elektronen. Die Streutheorie (schwarze Kurve) erklärt die experimentellen Daten sehr gut. Wenn die Pumpe Elektronenpaare aussendet, hängen die Prozesswahrscheinlichkeiten p_i davon ab, wie schnell dies geschieht (b), siehe Text.

Messpunkte in Abb. 2b unterhalb der gekrümmten Kurve im Poisson-binomialen Bereich (rote Quadrate in Abb. 2b). Neben Punkten im Poisson-binomialen Bereich, in dem die Wahrscheinlichkeit der Paartrennung am Strahlteiler p_1 bis zu 90 Prozent erreicht, fallen auch Punkte im korrelierten Gebiet auf. Dort ist die Wahrscheinlichkeit p_2 größer (Tendenz zu Bunching in der Transmission), als sie bei unabhängigen Streuprozessen sein sollte. Dies könnte auf die Relevanz von Elektron-Elektron-Wechselwirkung im Streuprozess hinweisen [3],

möglicherweise in Kombination mit Verschränkung [4, 5].

Im Experiment ist es gelungen, Elektronenpaare auf „Knopfdruck“ zu erzeugen und ihre Korrelationen über einen Strahlteiler sichtbar zu machen. Das Experiment hat zudem gezeigt, dass sich die Elektronenpaare effizient trennen lassen. Wären die Elektronen nach der Trennung verschränkt (z. B. im Spin-Freiheitsgrad), würden sie einem elektronischen EPR-Paar entsprechen. Die Wirkung des Magnetfelds auf den Elektronenspin im Quanten-Hall-Regime und die Form der Wechselwirkung zwischen den beiden Elektronen und mit dem darunterliegenden Fermi-See gilt es allerdings noch genauer zu untersuchen, um der Natur der Korrelationen weiter auf die Spur zu kommen.

Patrik Recher

KURZGEFASST

■ Datiertes Eisen

Ein internationales Wissenschaftlerteam hat die Halbwertszeit von Eisen-60 mit einer Unsicherheit von nur zwei Prozent gemessen. Sie beträgt demnach $(2,50 \pm 0,12)$ Millionen Jahre. Damit lässt sich dieses radioaktive Element nutzen, um astrophysikalische Prozesse auf dieser Zeitskala sicher zu datieren. Dazu zählen die Entstehung des frühen Sonnensystems oder die Nukleosynthese in massiven Sternen. Für die Messung der Halbwertszeit haben die Forscher zunächst mittels Beschleuniger-Massenspektrometrie den Anteil der Fe-60-Atome in ihrer Probe gemessen und anschließend die Gammastrahlung detektiert, die der Tochterkern Co-60 aussendet. A. Wallner et al., Phys. Rev. Lett. **114**, 041101 (2015)

■ Verformte Pionen

Die starke Kraft, die Protonen und Nucleonen im Atomkern zusammen hält, wird durch den Austausch von Pionen vermittelt. Mit dem COMPASS-Experiment am CERN ist es gelungen, einen neuen Wert für die Polarisierbarkeit des Pions zu messen, der erstmals im Einklang mit der Theorie steht – bisherige Messungen hatten einen zu hohen Wert ergeben. Die Forscher haben einen Strahl Pionen auf ein Nickeltarget geschossen. Im starken E-Feld der Nickelkerne haben sich die Pionen verformt und unter Aussendung von Photonen ihre Flugbahn geändert. Aus der Photonenenergie und der winzigen Verformung von 63 000 Pionen ließ sich auf ihre Polarisierbarkeit schließen. C. Adolph et al. (COMPASS Coll.), Phys. Rev. Lett. **114**, 062002 (2015)

- [1] E. Boquillon et al., Ann. Physik **526**, 1 (2014)
- [2] L. Hofstetter et al., Nature **461**, 960 (2009); L. G. Hermann et al., Phys. Rev. Lett. **104**, 026801 (2010)
- [3] N. Ubbelohde et al., Nature Nanotechnology **10**, 46 (2015)
- [4] F. Hassler, G. B. Lesovik und G. Blatter, Phys. Rev. Lett. **99**, 076804 (2007)
- [5] G. Burkard, D. Loss und E. V. Sukhorukov, Phys. Rev. B **61**, R16303 (2000); A. Schroer et al., Phys. Rev. Lett. **113**, 266401 (2014)

Prof. Dr. Patrik Recher, Institut für Mathematische Physik, TU Braunschweig, Mendelssohnstr. 3, 38106 Braunschweig