

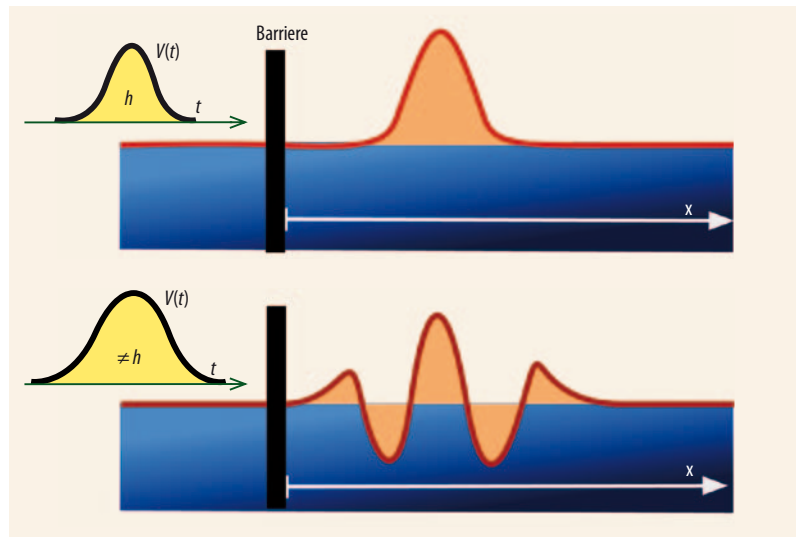
■ Ein Quantum Puls

Im Experiment ist es gelungen, Wellenpakete zu erzeugen, die genau ein Elektron enthalten.

Wirft man einen Stein in einen See, entstehen üblicherweise Wellen, bei denen sich Berge und Täler abwechseln und kreisförmig ausbreiten. Dieses klassische Phänomen lässt sich auf Elektronen in Festkörpern übertragen, die man oft analog zu einem See als Flüssigkeit beschreiben kann. In einem neuen Experiment bestätigen Julie Dubois, Thibaut Jullien und Kollegen eine dramatische Abweichung von diesem Verhalten [1]. Quantisierte Impulse erzeugen dabei Anregungen, die genau ein Elektron enthalten und den See ansonsten intakt lassen.

Eine der wichtigsten Erkenntnisse der Quantenvielteilchentheorie ist die Erklärung des Pauli-Prinzips und des daraus folgenden Fermi-Sees aus Elektronen, der unter anderem für grundlegende Eigenschaften von Metallen, Halbleitern und Isolatoren verantwortlich ist. Das Pauli-Prinzip verbietet die Doppelbesetzung von Zuständen; im Grundzustand sind somit alle Zustände bis zur Fermi-Energie besetzt. Der Fermi-See ist daher vollkommen in Ruhe und erinnert an einen normalen See bei völliger Windstille.

Diese Ruhe des Fermi-Sees äußert sich beispielsweise in der überraschenden Unterdrückung des Schrot- bzw. Schottky-Rauschens des elektrischen Stroms an Quantenpunktkontakten. Da sich der Strom mikroskopisch aus Elektronen zusammensetzt, sind die Fluktuationen durch unkorrelierte Tunnelereignisse gegeben und führen zum Rauschen. Aufgrund des Pauli-Prinzips vermeiden es jedoch zwei Elektronen, gleichzeitig zu tunneln, wodurch der Strom von Elektronen regelmäßiger ist und das Rauschen also abnimmt. Die Fluktuationen der transmittierten Elektronenzahl an einer Barriere mit Transparenz T , an die eine Spannung angelegt ist, wird daher bei sehr tiefen Temperaturen komplett verschwinden, wenn die Transparenz nach 1 geht (der



Wird ein lorentzförmiger Spannungspuls, dessen Fläche exakt auf ein gazzahliges Vielfaches des Planckschen Wirkungsquantums h quantisiert ist, an einer Barriere angelegt, so wird nur ein Wellen-

paket mit genau einem Elektron angeregt (oben). Ist der Puls nicht quantisiert, entstehen dagegen zusätzliche Elektron-Loch-Paare (unten).

von Klitzing-Quantenwiderstand $R_K = h/e^2$ ist trotzdem vorhanden). Diese Rauschunterdrückung ist eine Manifestation des Pauli-Prinzips und führt auf die einfache Beschreibung der Statistik der transmittierten Ladung als Binomial-Verteilung [2], äquivalent zur Statistik beim wiederholten Werfen einer Münze.

Die Ruhe des Fermi-Sees ist jedoch dahin, wenn das Fermi-System durch Spannungspulse angeregt wird. Schon vor 50 Jahren hat Philip W. Anderson erkannt, dass eine ruckartige Störung katastrophale Folgen für Fermi-Systeme haben kann [3]. Aufgrund des Pauli-Prinzips wird der gesamte Fermi-See aufgewühlt, was quantenmechanisch zu orthogonalen Zuständen führt und sich in anomalen Verhalten in einer ganzen Reihe von Messgrößen äußert. Periodische Spannungspulse führen analog zu einem Aufschaukeln des Fermi-Sees, das in vielfachen elektronen- und lochartigen Anregungen resultiert, analog den Wellenbergen und -tälern im See nach dem Steinwurf [4]. An dieser Stelle setzt eine interessante Beobachtung von Leonid S. Levitov und Kollegen an: Sie haben vorhergesagt, dass lorentzförmige quan-

tisierte Spannungspulse $V(t)$ elektronische Wellenpakete anregen, die genau ein Elektron enthalten und sich ohne zu zerfallen auf dem Fermi-See fortbewegen [5]. Diese Anregungen haben die typischen Eigenschaften von Solitonen, d. h. sie bewegen sich über große Distanzen und lassen sich überlagern, ohne ihre Wellenform zu verlieren [6]. Man sollte hier betonen, dass dies bei Elektronen nur für quantisierte lorentzförmige Pulse gilt, welche die Bohr-Sommerfeld-artige Quantisierungsbedingung $e \int dt V(t) = nh$ mit einem gazzahligem Wert n erfüllen (e ist die Elementarladung und h das Plancksche Wirkungsquantum). Für anders geformte oder nicht quantisierte Pulse wird dagegen die Ruhe des Fermi-Sees nachhaltig durch vielfache Teilchen-Loch-Anregungen gestört.

Dem Team um D. C. Glatli ist es gelungen, solche Anregungen in einem elektronischen Nanosystem zu erzeugen und nachzuweisen [1]. Um einen entsprechenden ruhigen Hintergrund zu erzeugen, musste das Fermi-System, ein zweidimensionales Elektronengas, zunächst auf eine Temperatur von ca. 35 mK gekühlt werden. Ein Quantenpunktkontakt erlaubt es,

das Elektronengas kontrolliert einzuschneiden, und bildet damit eine Barriere mit variabler Transparenz, an die periodische lorentzförmige Spannungspulse angelegt wurden. Die dazu nötige Kontrolle über die Impulsform in Kombination mit der tiefen Temperatur stellen höchste Anforderungen an den experimentellen Aufbau. So entspricht die Temperatur von 50 mK einer unteren Grenzfrequenz von 1 GHz der Pulse, und bei niedrigeren Frequenzen gehen die Quantisierungseffekte aufgrund thermischer Fluktuationen verloren. Mit der geeigneten Amplitude gelang es, die gesuchten Anregungen zu erzeugen. Der Nachweis dafür bestand darin, dass für quantisierte Pulse die Anzahl der Teilchen-Loch-Anregungen minimiert wird [7].

Um die Struktur der Wellenpakete besser zu verstehen, erhielt das Experiment einen weiteren Kniff: Lorentzförmige Spannungspulse wurden an zwei separaten Quantenpunktkontakten angelegt und zwei Anregungen mit einer definierten Verzögerungszeit an

einem halbdurchlässigen Quantenpunktkontakt überlagert. Aufgrund des Pauli-Prinzips erwartet man, dass die beiden rein fermionischen Anregungen vorwiegend in unterschiedliche Ausgänge gestreut werden. Bei gleichzeitiger Überlagerung ist dieser Effekt maximal und die Wahrscheinlichkeit, beide Anregungen in einem Ausgang zu finden, verschwindet, so wie im Experiment beobachtet.

Die experimentellen Fortschritte bei der Manipulation von mesoskopischen Elektronen im GHz-Bereich eröffnen eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten in einem Gebiet, das man als Quanten-Elektronen-Optik bezeichnen könnte. Kontrollierte Einzel-Elektron-Anregungen spielen dabei eine zentrale Rolle, da sie elementare Quantenwellen mit kontrollierter Amplitude und Phase darstellen. Sie können beispielsweise als Träger eines Quantenbits fungieren. Auch ist es denkbar, nichtklassische Elektronenwellen zu realisieren. Ebenfalls von fundamentalem Interesse ist es, die Wechselwirkungen

von solchen elementaren Anregungen mit Luttinger-Flüssigkeiten oder fraktionellen Quanten-Hall-Zuständen zu untersuchen. Die Kombination dieser Quantenwellen mit korrelierten Elementen und der Aufbau komplexer (Quanten-)Informationsschaltkreise sind große experimentelle Herausforderungen. Ohne Zweifel sind hier in Zukunft spannende physikalische Entdeckungen zu erwarten.

Wolfgang Belzig


- [1] J. Dubois, T. Jullien, F. Portier, P. Roche, A. Cavanna, Y. Jin, W. Wegscheider, P. Roulleau und D. C. Glattli, *Nature* **502**, 659 (2013)
- [2] W. Belzig, *Physik Journal*, August/September 2005, S. 75
- [3] P. W. Anderson, *Phys. Rev. Lett.* **18**, 1049 (1967)
- [4] M. Vanevic, Y. V. Nazarov und W. Belzig, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 076601 (2007)
- [5] L. S. Levitov, H. Lee und G. B. Lesovik, *J. Math. Phys.* **37**, 4845 (1996)
- [6] J. Keeling, I. Klich und L. S. Levitov, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 116403 (2006)
- [7] J. Gabelli und B. Reulet, *Phys. Rev. B* **87**, 075403 (2013)



Neugierig?

Sachbücher von WILEY-VCH

Jetzt auch als E-Books unter:
www.wiley-vch.de/ebooks



MICHAEL KRAUSE
Wo Menschen und Teilchen aufeinanderstoßen
 Begegnungen am CERN

ISBN: 978-3-527-33398-1
 September 2013 250 S. mit 50 Abb.
 Gebunden € 24,90

Irrtum und Preisänderungen vorbehalten.
 Stand der Daten: August 2013

Eine »wissenschaftliche Sensation«, ein »historischer Meilenstein«, historisch so bedeutend wie die Mondlandung: Als Wissenschaftler des CERN im Juli 2012 die Existenz eines »Gottesteilchens«, das allen anderen Teilchen Masse verleiht, mit einer Wahrscheinlichkeit von mehr als 99,999 Prozent bestätigten, waren die Reaktionen überwältigend. Schließlich arbeiten die Forscher hier an nichts Geringerem als an der Entschlüsselung der Geheimnisse des Universums.

In den Mittelpunkt seiner Arbeit stellt Michael Krause die Menschen am CERN, ihren Hintergrund, ihre Geschichte, ihre Arbeit, ihre Forschungen, Träume und Visionen – sie sind das Hauptthema des Buches. Wie, was und warum sucht der Mensch und was bringt manche Forscher dazu, ihr gesamtes Leben nach der faustischen Frage auszurichten: Was ist es, das die Welt im Innersten zusammenhält? Das ist die Hauptfrage dieses spannenden Buches.

Wiley-VCH • Postfach 10 11 61
 D-69451 Weinheim

Tel. +49 (0) 62 01-606-400
 Fax +49 (0) 62 01-606-184
 E-Mail: service@wiley-vch.de

www.wiley-vch.de/sachbuch

WILEY-VCH