

## Kontrollierte Schlangenlinien

In Graphen gelang erstmals der direkte Nachweis von schlangenförmigen Elektronenbahnen.

Im Vakuum bewegen sich Elektronen ähnlich ungehindert wie Photonen gemäß einer Wellengleichung. Im statistischen Mittel folgen sie so der geometrischen Strahlenoptik mit ihren wohlbekanntem Phänomenen. Anders als Photonen lassen sich Elektronen aber aufgrund ihrer Ladung ( $-e$ ) durch elektromagnetische Felder beeinflussen. Bekanntes Beispiel sind Zyklotronbahnen, die sich senkrecht zu einem homogenen Magnetfeld der Stärke  $B$  infolge der Lorentz-Kraft ergeben. Der Bahndurchmesser beträgt  $2R_c = |2p/eB|$ , mit dem Betrag des Elektronenimpulses  $p$ .

Bewegliche Elektronen gibt es auch in Festkörpern. Dort ist es jedoch erst in den 1980er-Jahren auf der Grundlage von Halbleitermaterialien gelungen, die Defektdichte so weit zu reduzieren, dass ballistische Elektronenbewegungen über makroskopische Distanzen von einigen Mikrometern zu beobachten waren. Ein besonders schöner Nachweis ballistischer Elektronenbewegung war 1988 ein „Shoot and Hit“-Experiment in einer zweidimensionalen Halbleiterschicht [1]: Die Elektronen werden dabei aus einer Öffnung („Quantenpunktkontakt“) emittiert und durchlaufen im einstellbaren Magnetfeld senkrecht zur Halbleiterschicht einen Halbkreis. Wenn Richtung und Betrag des Magnetfelds „richtig“ sind,

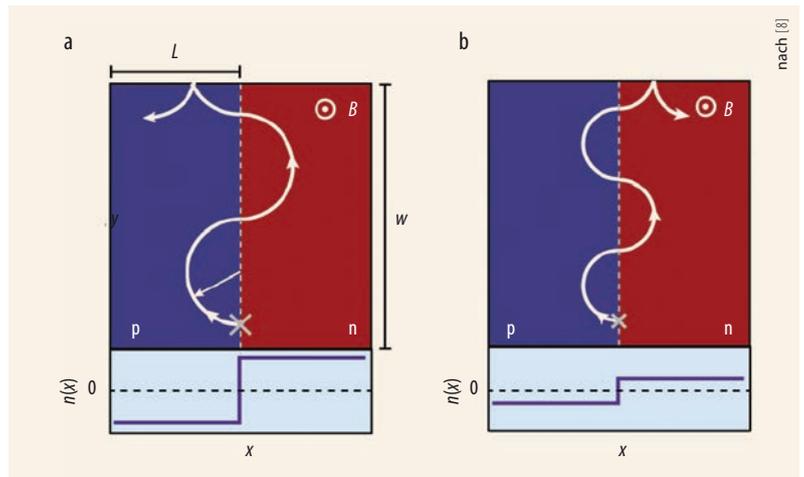


Abb. 1 In Graphen zeigen sich Schlangelbewegungen von Quasiteilchen bei einem homogenen Magnetfeld  $B$  entlang eines p-n-Übergangs [8]. Ausgehend von der durch ein graues Kreuz markierten

Position wird das Teilchen am Ende nach links ( $x < 0$ ) abgelenkt (a). Für kleineres  $n_0$  wird auch  $R_c = \hbar\sqrt{\pi n_0} / |eB|$  kleiner, und das Teilchen wird am Ende nach rechts ( $x > 0$ ) abgelenkt (b).

treffen die Elektronen dann im Abstand  $2R_c$  vom Quantenpunktkontakt – entweder links oder rechts, je nach Vorzeichen des Magnetfelds – auf eine weitere Öffnung [1]. Dieser zweite Quantenpunktkontakt fungiert als Kollektor und erlaubt es den resultierenden elektrischen Strom zu messen. Durch Unordnung würden die Elektronen dagegen aus ihrer Bahn gestreut, und der beschriebene Resonanzeffekt als Funktion der Magnetfeldstärke wäre nicht zu beobachten. Dieses Experiment lässt sich nur bei nicht zu starken Feldern durchführen, so dass  $R_c$  sehr viel größer als die

magnetische Länge  $l_B = (\hbar/eB)^{1/2}$  ist. Bei stärkeren Feldern von mehreren Tesla beobachtet man dagegen ein völlig anderes Transportphänomen, den Quanten-Hall-Effekt. Bei diesem gilt jedoch das Bild der geometrischen Strahlenoptik nicht mehr.

Kompliziertere Elektronenbahnen lassen sich mit Magnetfeldern  $B(x,y)$  realisieren, deren Stärke über der x-y-Ebene variiert. Besonders interessant sind Magnetfeldverläufe mit einem Vorzeichenwechsel entlang vorgegebener Linien in der x-y-Ebene [2]. Im einfachsten Fall wäre dies z. B. entlang der y-Achse, mit einem Feld der Form  $B(x,y) = B_0 \operatorname{sgn}(x)$ , wobei  $\operatorname{sgn}(x) = \pm 1$  für  $x \gtrless 0$ . Elektronen sollten sich dann „schlängelnd“ entlang der y-Achse bewegen [3] („snake states“), weil Zyklotronhalbkreise für  $x < 0$  in die eine Richtung und anschließend für  $x > 0$  in die andere Richtung gekrümmt durchlaufen werden. Bisher ließen sich solche „Schlangelbewegungen“ nicht direkt realisieren, da es schwierig ist, Magnetfelder auf Längenskalen von wenigen Mikrometern gezielt zu variieren.

Die Entdeckung von Graphen-Monolagen, also einzelnen, perfekt kristallinen Schichten von Graphit, hat eine weitere Möglichkeit eröffnet, derartige „schlängelnde“ Elek-

### KURZGEFASST

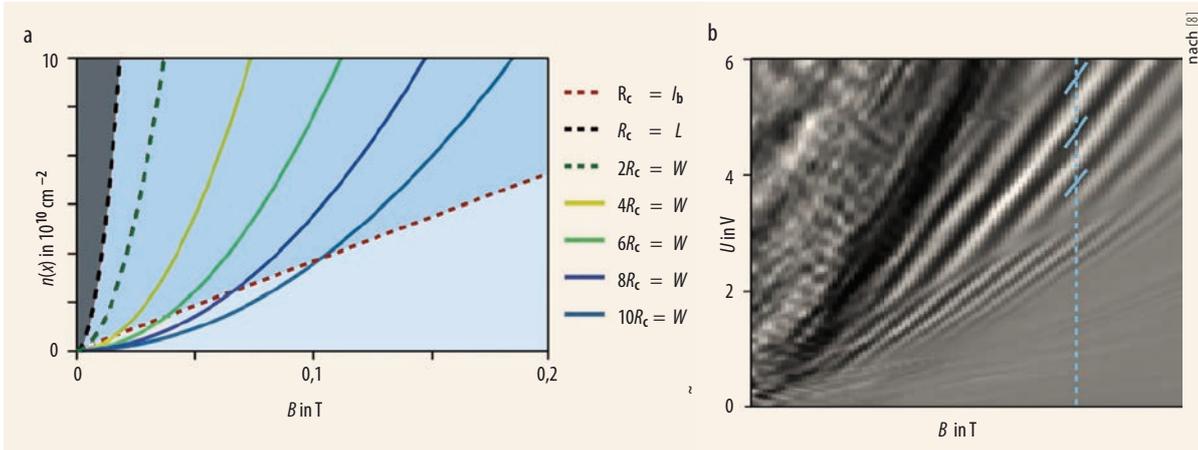
#### Quantentrio aus Helium

1970 sagte Vitaly Efimov vorher, dass drei Bosonen unendlich viele schwach gebundene Zustände bilden können – auch dann, wenn sie paarweise keine Bindung einzugehen vermögen. Nun ist es Physikern der Universität Frankfurt gelungen, erstmals ein stabiles Efimov-System aus drei Heliumatomen zu erzeugen. Dazu ließen sie kaltes Heliumgas durch eine sehr feine Düse in ein Vakuum expandieren. In dem Molekularstrahl bildeten sich Heliummoleküle mit mehreren Atomen, von denen sich die Trimere mittels Beugung an einem Gitter abtrennen ließen.

M. Kunitski et al., *Science* **348**, 551 (2015)

#### Neutrinos aus der Ferne

Das IceCube-Observatorium weist im Eis des Südpols sehr hochenergetische Neutrinos nach. Nun haben zwei Teams unabhängig voneinander Daten aus den Jahren 2010 bis 2013 analysiert und den Neutrino-Flavour bestimmt. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass alle drei Flavours gleich häufig auftreten. Demnach haben die Neutrinos die Information über ihren Flavour bei der Erzeugung durch Oszillationen verloren und stammen von sehr weit entfernten astrophysikalischen Objekten. M. G. Aartsen et al. (IceCube Coll.), *Phys. Rev. Lett.* **114**, 171102 (2015); A. Palladino et al., *ibid.*, 171101



**Abb. 2** In der  $n_0$ - $B$ -Ebene entsprechen Kurven mit konstantem Zyklotronradius  $R_c$  Parabeln (a): Die durchgezogenen Kurven zeigen den kommensurablen Fall, bei dem die Länge  $W$  ein Vielfaches von  $2R_c$  ist. Unterhalb der rot gestrichelten Geraden wird das Quanten-Hall-Regime erreicht, während oberhalb der schwarz gestrichelten Kurve (für  $R_c=L$ , mit der Probendimension  $L$  in  $x$ -Richtung) Rückstreuung entlang der  $x$ -Richtung auf-

tritt. Im Zwischenbereich lassen sich Schlängelbewegungen durch Oszillationen im elektrischen Leitwert  $G$  nachweisen. Dies wurde experimentell gemessen: In (b) zeigt  $dG/dB$  in differentieller Auftragung über der  $U$ - $B$ -Ebene genau die parabelartige Struktur aus der Überlegung (a), wobei die Spannung  $U$  an Metallelektroden unterhalb der Graphen-Schicht direkt die Dotierstärke  $n_0$  bestimmt.

tronenbahnen zu studieren. Anstelle eines inhomogenen Magnetfelds [4] kann dabei ein homogenes Feld in Verbindung mit einem p-n-Übergang benutzt werden („ambipolar snake states“) [5]. In konventionellen Halbleitern sind negative Ladungsträger (n-Dotierung) von positiven Ladungsträgern (p-Dotierung) durch eine Energielücke getrennt. Dagegen gibt es in Graphen-Monolagen die Möglichkeit des direkten Übergangs von einem n-dotierten Raumbereich ohne Reflexion in den angrenzenden p-dotierten Bereich durch das sog. Klein-Tunneln [6]. Da das Vorzeichen der Ladung bei diesem Übergang wechselt, ändert sich im homogenen Magnetfeld auch die Richtung der Lorentz-Kraft, und es ergibt sich eine „schlängelnde“ Bewegung entlang der p-n-Dotiergrenze. Im Falle einer Dotierung gemäß  $n(x,y)=n_0 \operatorname{sgn}(x)$  würde die  $y$ -Achse umschlängelt werden ( $n_0$  ist der Betrag der Dotierung). Die Dotierung  $n(x,y)$  lässt sich durch geeignet strukturierte, geladene Metallelektroden unterhalb der Graphenschicht steuern. Dabei beobachtete die Gruppe von Charles Marcus (damals in Harvard) bereits 2011 entlang einer Dotiergrenze einen erhöhten Strom [7], der von zusätzlichen Moden getragen sein musste. Diese wurden den „Schlängelmoden“ zugeordnet, jedoch ohne dass ein räumliches

Hin-und-Her-Oszillieren der Ladungsträger um die Dotiergrenze gezeigt worden wäre.

Genau dieser Nachweis ist nun einer internationalen Arbeitsgruppe unter der Leitung von Christian Schönenberger an einer hochreinen Graphenprobe gelungen [8]. In Erweiterung des „Shoot and Hit“-Experimentes [1] ließ sich dabei ausnutzen, dass schlängelnde Trajektorien – bestehend aus Halbkreis-Elementen mit Radius  $R_c$  – über die Länge  $W$  einer Dotiergrenze genau  $(W/2R_c)$ -mal hin und her oszillieren. Wird  $R_c$  nun etwas vergrößert, endet die Trajektorie auf der einen Seite der Dotiergrenze, bei etwas verkleinertem  $R_c$  dagegen auf der anderen Seite (Abb. 1a und b). Dieser Unterschied zeigt sich unmittelbar im Strom senkrecht zur Dotiergrenze, im genannten Beispiel also in  $x$ -Richtung: Endet die Trajektorie links, werden die Ladungsträger zurückgestreut, was den Strom vermindert. Endet die Trajektorie jedoch rechts, so erreichen die Ladungsträger den Kollektor, entsprechend einer Stromerhöhung.

Der Zusammenhang zwischen  $R_c$  und den Probendimensionen lässt sich anhand einfacher Modellüberlegungen erläutern (Abb. 2a): Aus den Oszillationen des elektrischen Leitwerts in  $x$ -Richtung als Funktion der senkrecht angelegten homogenen Magnetfeldstärke  $B$  oder des Betrags der Dotierung  $n_0$

kann somit direkt auf die Schlängelbewegung entlang der Dotiergrenze geschlossen werden. Die Leitwert-Messungen (Abb. 2b) liefern in der Tat direkte Evidenz für die Schlängelbewegung von fermionischen Quasiteilchen (Elektronen oder Löcher, je nach Seite) entlang des p-n-Übergangs in Graphen.

Die Interpretation stützen Quantentransportrechnungen, die an der Universität Regensburg unter der Leitung von Klaus Richter durchgeführt worden sind und die die Messdaten überzeugend reproduzieren. Als mögliche Anwendungen versprechen sich die Autoren die Entwicklung neuartiger elektronischer, Graphen-basierter Schaltelemente, welche die hier entdeckte Steuerungsmöglichkeit ballistischer Ladungsträger ausnutzen.

**Wolfgang Häusler und Reinhold Egger**

- [1] H. van Houten et al., Phys. Rev. B **39**, 85567 (1989)
- [2] Y.I. Man'kov, Sov. Phys. Solid State **14**, 62 (1972); J.E. Müller, Phys. Rev. Lett. **68**, 385 (1992)
- [3] J. Reijnders und F.M. Peeters, J. Phys. Cond. Matt. **12**, 9771 (2000)
- [4] P. Rakyta et al., Phys. Rev. B **77**, 081403(R) (2008); T. Ghosh et al., Phys. Rev. B **77**, 081404(R) (2008)
- [5] C. W.J. Beenakker, Rev. Mod. Phys. **80**, 1337 (2008)
- [6] M.I. Katsnelson, K.S. Novoselov und A.K. Geim, Nature Physics **2**, 620 (2006)
- [7] J.R. Williams und C.M. Marcus, Phys. Rev. Lett. **107**, 046602 (2011)
- [8] P. Rickhaus et al., Nature Communications **6**, 6470 (2015)

Priv.-Doz. Dr. Wolfgang Häusler, Institut für Physik, Universität Augsburg, 86135 Augsburg; Prof. Dr. Reinhold Egger, Institut für Theoretische Physik, Heinrich-Heine-Universität, 40225 Düsseldorf