

## ■ Elektronen im Fluss

In Graphen können Elektronen auch hydrodynamisches Verhalten zeigen.

Die Hydrodynamik beschreibt eine enorme Vielzahl von Phänomenen – von der Blutzirkulation in unseren Adern über das aerodynamische Verhalten von Fahrzeugen bis zu Strömungen in Flüssen und Ozeanen. Unter bestimmten Umständen können Elektronen in elektrischen Leitern ebenfalls den Gesetzen der Hydrodynamik unterliegen. Der Theoretiker Radii Gurzhi aus Charkow hat bereits vor mehr als fünfzig Jahren vorhergesagt, dass Elektronen Poiseuille-artiges Strömungsverhalten zeigen, ähnlich zu Flüssigkeiten in Röhren [1]. Als Folge erhöht sich die Leitfähigkeit mit wachsendem transversalen Querschnitt einer Probe gemäß eines Potenzgesetzes. In unserer üblichen Vorstellung der Leitfähigkeit als Materialkonstante hängt sie aber nicht von der Probedimension ab. Das hydrodynamische Verhalten der kollektiven Elektronenbewegung entzieht sich jedoch meist einem experimentellen Nachweis. Erst vor zwanzig Jahren gelang es Marc de Jong und Laurens Molenkamp, den Effekt zu beobachten, den Gurzhi vorhergesagt hat [2]. Der Leitwert änderte sich durch den Übergang in das hydrodynamische Regime allerdings nur um weniger als 20 Prozent.

### KURZGEFASST

#### ■ Trockener Whisky

In einem Irish Coffee gehen Kaffee und Whisky eine schmackhafte Liaison ein, obwohl die Flüssigkeiten unterschiedliche Eigenschaften besitzen. Kaffeetropfen hinterlassen beim Trocknen hässliche Ringe; Whiskytropfen bilden dagegen homogene Flächen. Forscher der Princeton University zeigten, dass dafür geringe Konzentrationen von Tensiden und Polymeren, die an Oberflächen haften, verantwortlich sind. In Whisky entstehen sie bei Herstellung und Lagerung. Damit andere Flüssigkeiten homogen trocknen, z. B. die Tinte für 3D-Drucker, muss man die Tenside und Polymere in Promillenkonzentration künstlich zusetzen. H. Kim et al., Phys. Rev. Lett. **116**, 124501 (2016)

#### ■ Kollektive Verformung

Wenige Basisfiguren aus Papierstreifen reichen aus, um komplexe Objekte zu erzeugen, die – je nach Aufbau – starr oder biegsam sind. Nanowissenschaftler und Ingenieure der Harvard University entwickelten ein mehrschichtiges Metamaterial, das sich selbstständig verformt. Mit zentimeterbreiten Streifen aus der Folie bauten sie Einheitszellen – Würfel oder andere Polyeder – auf und ordneten sie zu größeren Strukturen an. Stimulierten die Forscher eine Einheitszelle, z. B. mit Luftdruck, folgte die komplette Struktur der Verformung. Daher eignet sich das Material, um beliebig große, variabel formbare Objekte aufzubauen. J. T. B. Overvelde et al., Nat. Comm. **7**, 10929 (2016)

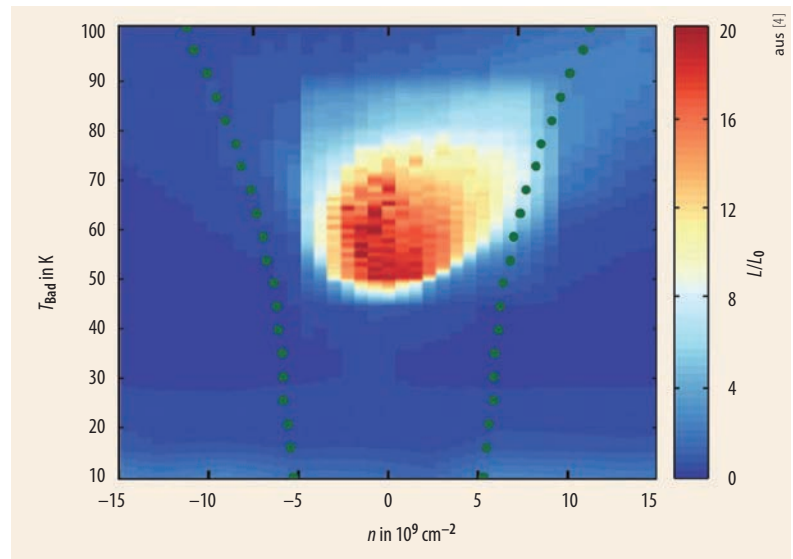


Abb. 1 Die normierte Lorenz-Zahl  $L/L_0$  von Graphen als Funktion der Temperatur  $T$  und Ladungsträgerkonzentration  $n$ , erhöht sich für Temperaturen zwischen

40 und 100 K und nahe des Neutralitätspunkts mit  $n = 0$  (kleines  $|n|$ ) dramatisch. Das signalisiert ein hydrodynamisches Verhalten der Elektronen.

Wo liegen die Schwierigkeiten, hydrodynamisches Verhalten von Elektronen zu realisieren? Elektronen bewegen sich, im Unterschied zu den Molekülen einer gewöhnlichen Flüssigkeit, im kristallinen Gitter eines Festkörpers. Daher gibt es nicht nur Wechselwirkungen mit anderen Elektronen, sondern auch mit thermisch angeregten Gitterschwingungen, den Phononen, und mit den unvermeidbaren Störstellen eines Materials. Für hydro-

dynamisches Verhalten muss die Elektron-Elektron-Streuung die dominierende Wechselwirkung sein. Das schränkt den zulässigen Temperaturbereich ganz wesentlich ein: Bei tiefen Temperaturen, d. h. unterhalb einer Skala  $T_{imp}$ , überwiegt die Störstellenstreuung, wohingegen bei hohen Temperaturen, d. h. für  $T > T_{el-ph}$ , die Elektron-Phonon-Streuung vorherrscht. Elektron-Elektron-Streuung kann dann nur für Temperaturen zwischen  $T_{imp}$  und  $T_{el-ph}$  dominieren. In den meisten konventionellen Leitern ist  $T_{imp}$  vergleichbar mit oder sogar größer als  $T_{el-ph}$ : Elektronen verhalten sich daher fast nie hydrodynamisch.

Die grundlegenden Experimente am zweidimensionalen Graphen [3], für die Andre Geim und Konstantin Novoselov 2010 den Physik-Nobelpreis erhielten, belebten die Forschung auf dem Gebiet des Quantentransports. Neben vielen anderen interessanten Effekten erwies sich Graphen für die hydrodynamische Bewegung von Elektronen als besonders geeignet. So ist die Elektron-Phonon-Wechselwirkung bei passenden Substraten vergleichsweise schwach, was enorm hohe Ladungsträgerbeweglichkeiten bei

erhöhten Temperaturen mit sich bringt. Außerdem steht Graphen wegen enormer Fortschritte in der Probenherstellung mit äußerst geringer Störstellenkonzentration zur Verfügung. Eine besondere Rolle spielt darüber hinaus die quasi-relativistische Energie-Impuls-Beziehung von Graphen, die sich durch masselose zweidimensionale Dirac-Fermionen beschreiben lässt. Am Neutralitätspunkt ist bei  $T = 0$  der untere Kegel gerade voll besetzt und der obere noch unbesetzt. Die resultierende Flüssigkeit besteht aus zwei Sorten von thermisch angeregten Teilchen mit entgegengesetzter Ladung: Löchern und Elektronen.

Nun ist es einem Team von Physikern aus den USA, Kanada und Japan gelungen, den elektrischen und thermischen Transport in Monolagen aus Graphen zu untersuchen, die – eingekapselt in Bornitrid – eine sehr hoher Qualität besaßen [4]. Dabei bestimmten sie die Lorenz-Zahl  $L$ , die sich aus dem Verhältnis von thermischer ( $\kappa$ ) und elektrischer ( $\sigma$ ) Leitfähigkeit zu  $L = \kappa/(\sigma T)$  ergibt (Abb. 1). In konventionellen Metallen besitzt die Lorenz-Zahl einen universellen Wert, den allein Naturkonstanten bestimmen:  $L_0 = \pi^2 k_B^2 / (3e^2)$ . Dieses Wiedemann-Franzsche Gesetz drückt aus, dass Ladungs- und Wärmestrom durch die gleichen

Streuprozesse relaxieren [5]. Entsprechendes Verhalten zeigt auch Graphen für verschiedenste Temperaturen und Ladungsträgerkonzentrationen. In der Nähe des Neutralitätspunkts und für Temperaturen zwischen 40 und 100 K ist die Lorenz-Zahl allerdings bis zum 22-fachen des Universalwerts erhöht. Als Interpretation drängt sich  $T_{\text{imp}} \approx 40$  K und  $T_{\text{el-ph}} \approx 100$  K auf – ein klares Indiz, dass sich eine Elektron-Loch-Dirac-Flüssigkeit herausgebildet hat. Detaillierte theoretische Untersuchungen bestätigen die stark erhöhte Lorenz-Zahl in einer Dirac-Flüssigkeit [6]. Intuitiv lässt sich dies so verstehen (Abb. 2): Legt man ein elektrisches Feld an, so bewegen sich Elektronen und Löcher in entgegengesetzte Richtungen. Die Reibung, welche die Elektron-Elektron-Wechselwirkung zwischen ihnen verursacht, führt zum endlichen elektrischen Widerstand. Legt man allerdings einen Temperaturgradienten an, so bewegen sich sowohl Elektronen als auch Löcher in die gleiche Richtung. Hieraus ergibt sich keine Reibung durch Elektron-Elektron-Wechselwirkung und entsprechend eine unendlich große thermische Leitfähigkeit der Elektronen. Die erhöhte Lorenz-Zahl ist somit ein sensibler Indikator für hydrodynamisches Verhalten von Elektronen in Graphen.

Auch in einer Reihe weiterer aktueller Experimente ließ sich Hydrodynamik von Elektronen in Graphen und verwandten Materialien beobachten. Ein Beispiel ist der Coulomb-Drift, bei dem ein Strom in einer Graphenschicht eine Spannung in einer zweiten, nur durch die Coulomb-Wechselwirkung gekoppelten Schicht verursacht. So ist der beobachtete riesige Coulomb-Drift in Doppellagen aus Graphen [7] ein Markenzeichen der Physik von Dirac-Flüssigkeiten für den Magnetotransport [8]. Außerdem gelang es, in Graphen einen negativen Vierpunkt-Widerstand als Nachweis von „Whirlpools“ (strudelförmige Strommuster) zu beobachten [9], wie man es für eine viskose Flüssigkeit erwartet [10]. Bei der Messung des Widerstands von PdCoO<sub>2</sub> unterschiedlicher Probenlänge [11] zeigte sich der vorhergesagte viskose Transport von Elektronen [1].

Aus dieser Vielzahl von Ergebnissen aus dem faszinierenden Forschungsgebiet der Quantenstrommechanik von Elektronen dürften sich in Zukunft auch Anwendungen der hydrodynamischen Elektronik ergeben.

Alexander D. Mirlin und  
Jörg Schmalian

Prof. Dr. Alexander D. Mirlin, Institut für Nanotechnologie, Karlsruher Institut für Technologie, und Institut für Theorie der Kondensierten Materie, KIT;  
Prof. Dr. Jörg Schmalian, Institut für Theorie der Kondensierten Materie, und Institut für Festkörperphysik, KIT

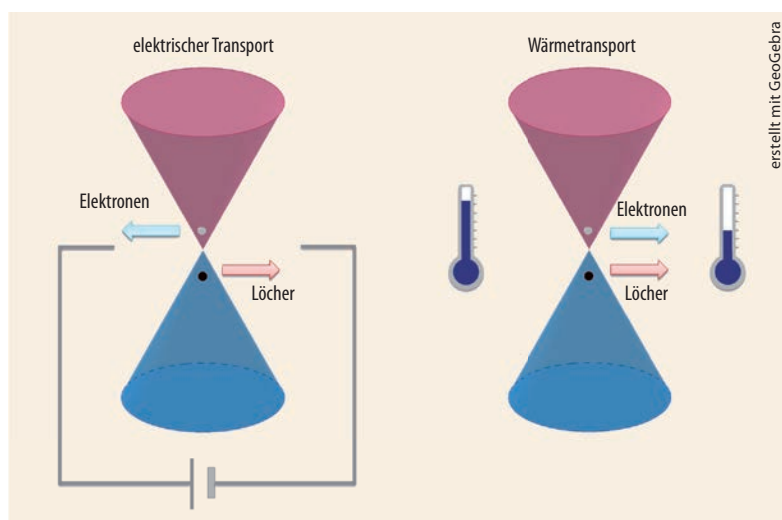


Abb. 2 Am Neutralitätspunkt einer Dirac-Flüssigkeit führt der elektrische Transport zu einem endlichen elektrischen Widerstand, weil sich Elektronen und Löcher entgegengerichtet bew-

gen. Beim Wärmetransport verschwindet dagegen durch Energie- und Impulserhaltung der thermische Widerstand. Die Kegel zeigen die Energie-Impuls-Beziehung für masselose Dirac-Fermionen.

- [1] R. N. Gurzhi, Sov. Phys. JETP **20**, 953 (1965)
- [2] M. J. M. de Jong und L. W. Molenkamp, Phys. Rev. B **51**, 13389 (1995)
- [3] K. S. Novoselov et al., Science **306**, 666 (2004)
- [4] J. Crossno et al., Science **351**, 1058 (2016)
- [5] G. Wiedemann und R. Franz, Annalen der Physik **165**, 497 (1853)
- [6] M. Müller et al., AIP Conf. Proc. **1134**, 170 (2009); M. Müller, J. Schmalian und L. Fritz, Phys. Rev. Lett. **103**, 025301 (2009)
- [7] M. Titov et al., Phys. Rev. Lett. **111**, 166601 (2013)
- [8] B. N. Narozhny et al., Phys. Rev. B **91**, 035414 (2015)
- [9] D. A. Bandurin et al., Science **351**, 1055 (2016)
- [10] L. Levitov und G. Falkovich, Nature Physics, DOI: 10.1038/NPHYS3667 (2016)
- [11] P. J. W. Moll et al., Science **351**, 1061 (2016)