

Quantisiert transportiert

Die Quantisierung der elektrischen und thermischen Leitfähigkeit lässt sich in Ketten von Goldatomen selbst bei Zimmertemperatur nachweisen.

Zeigen sich Phänomene makroskopischer Systeme unbegrenzt, wenn deren Miniarisierung immer weiter fortschreitet? Diese Frage hängt direkt mit derjenigen zusammen, ob die physikalischen Gesetze der makroskopischen Welt auch bei kleinsten Systemen gelten, in denen Quantisierung auftritt. Genau dies haben Forscher aus Michigan, Konstanz und Madrid jüngst untersucht [1]. Sie testeten, ob die thermische Leitfähigkeit auch bei kleinsten metallischen Punktkontakten an die elektrische Leitfähigkeit gekoppelt ist. Makroskopisch beschreibt das vor 150 Jahren entdeckte Wiedemann-Franz-Gesetz diese Kopplung [2]. In Punktkontakten kann die Quantisierung der elektrischen Leitfähigkeit beobachtet werden [3], wenn die thermische Energie klein gegenüber dem Modenabstand ist. Den Effekt beschreibt der Landauer-Büttiker-Formalismus [4].

Obwohl die Quantisierung der elektrischen Leitfähigkeit schon vor fast dreißig Jahren beobachtet wurde, war es eine große experimentelle Herausforderung, gleichzeitig die thermische Leitfähigkeit und deren Quantisierung zu messen. Dazu ist es notwendig, neben einer elektrischen Potentialdifferenz auch eine Temperaturdifferenz zwischen beiden Seiten des Punktkontakts anzulegen und die auftretenden, sehr kleinen elektrischen und thermischen Ströme zu messen. Diese leiten sich aus der Messung der Potential- bzw. Temperaturdifferenzen ab, die sich über einem bekannten elektrischen bzw. thermischen Widerstand einstellen.

Naheliegend, aber schwierig

Dieses naheliegende Prinzip experimentell zu realisieren, ist aber extrem schwierig: Der Strompfad muss verlässlich auf ein einzelnes Atom eingeschnürt werden. Zudem gilt es, den sehr kleinen elektrischen Strom sowie den winzigen Wärmestrom gleichzeitig zu

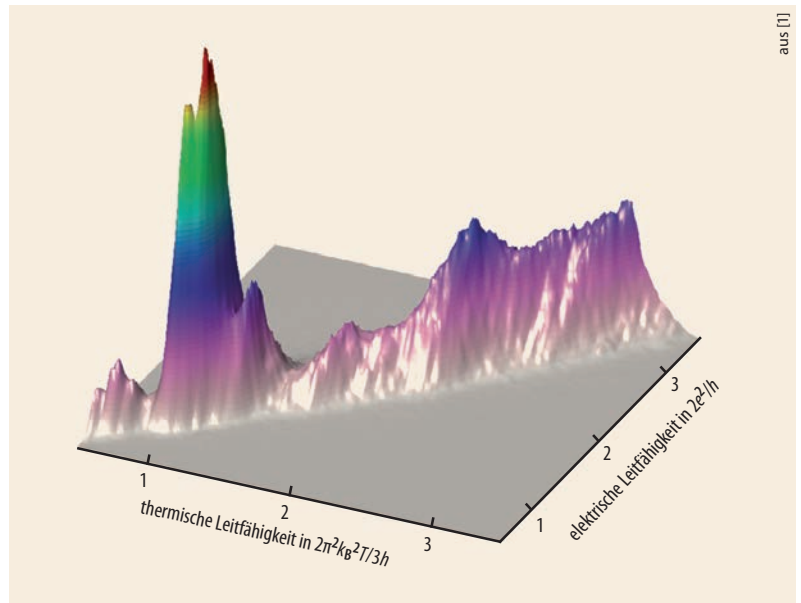


Abb. 1 Die statistische Auswertung von Messungen an Einzelatom-Punktkontakten aus Gold zeigt bei Raumtemperatur ausgeprägt häufig elektrische und thermische Leitfähigkeiten, die Vielfachen

der zugehörigen Leitfähigkeitsquanten entsprechen. Beide Größen scheinen quantisiert vorzuliegen und sind aneinander gekoppelt.

messen. Bei der Messung an Gold-Punktkontakten zeigte sich die Quantisierung der elektrischen und thermischen Leitfähigkeit selbst bei Raumtemperatur (Abb. 1). Dies gelang dank eines selbstentwickelten und durch Mikrofabrikation hergestellten Sensors mit einer beeindruckenden Auflösung der Wärmeleitfähigkeit von 25 pW/K (Abb. 2).

Dieser Sensor musste dabei widersprüchliche Forderungen erfüllen: Einerseits sollte er mechanisch steif sein, damit er sich schwingungsfrei und präzise positionieren lässt. Andererseits musste er einen hohen thermischen Widerstand zwischen Thermometer und Sensorhalterung besitzen, um die benötigte Wärmestromauflösung zu erreichen. Der große thermische Widerstand entstand durch minimale Querschnittsflächen und maximale Längen der beiden Thermometerträger. Eine T-förmige Querschnittsfläche erhöht die Steifigkeit bei gegebener Fläche.

Mithilfe eines Rastertunnelmikroskops ließ sich der Sensor sehr präzise mit einer Auflösung von

deutlich unter einem Angström positionieren und gezielt bewegen. Für den Einzelatomkontakt wurde die Sensorspitze zunächst so weit an die Probenoberfläche geführt, dass sich ein Kontakt von vielen Atomen bildete. Durch ein sehr langsames Zurückziehen des Sensors mit einer Geschwindigkeit von 0,05 nm/s rissen immer mehr Verbindungen auf atomarer Ebene ab, bis schließlich ein Einzelatom-Punktkontakt übrig blieb bzw. die Verbindung ganz abbrach (Abb. 3). Die elektrische und thermische Leitfähigkeit wurden während des gesamten Prozesses aufgezeichnet und in ein Histogramm über den beiden Größen eingetragen, dessen Achsen auf das elektrische bzw. thermische Leitfähigkeitsquantum normiert waren (Abb. 1).

Quantisiert gekoppelt

Diese Darstellung zeigt zwei wichtige Resultate: Zum einen gibt es eine ausgeprägte Häufung der gemessenen Leitfähigkeiten bei einem Leitfähigkeitsquantum in der elektrischen Leitfähigkeit sowie – wegen

Spinentartung – bei zwei Leitfähigkeitsquanten in der thermischen Leitfähigkeit. Das bedeutet, dass für Gold bei Zimmertemperatur tatsächlich eine Quantisierung der beiden Leitfähigkeiten nachweisbar ist. Zum anderen befinden sich die Maximalwerte der Verteilung sehr gut auf der Diagonalen, was die Gültigkeit des Wiedemann-Franz-Gesetzes bestätigt. Die geringe

Abweichung von wenigen Prozent über alle Messungen lässt sich mit dem phononischen Beitrag zur Wärmeleitung sowie Wärmeübertrag aus dem Nahfeld erklären [5].

Anders sieht die Situation für Platin aus. Zwar folgt das Histogramm wieder dem Verlauf der Diagonalen, ausgeprägte Häufungen bei den Leitfähigkeitsquanten treten aber nicht auf. Berechnungen und Simulationen liefern die elektronische Struktur des Platins als mögliche Erklärung: Bei Zimmertemperatur sind mehrere parallele Leitfähigkeitskanäle vorhanden, zwischen denen thermisch angeregt geschaltet wird. Eine aufwändige Kombination aus Molekulardynamik, Dichtefunktionaltheorie und Nichtgleichgewichts-Greens-Formalismus beschreibt die experimentellen Verhältnisse möglichst detailliert. Simulation und Experiment stimmten für Gold und Platin sehr gut überein. Dieser theoretische Ansatz stellt allgemein ein mächtiges Werkzeug dar, um verschiedenste komplexe Fragestellungen in diesem Bereich zu behandeln.

Über das wissenschaftliche Interesse an diesen Resultaten hinaus erlaubt es der experimentelle Aufbau, thermische Leitfähigkeiten einzelner Moleküle zu messen und die physikalischen Eigenschaften kleinster Systeme gezielter zu erforschen. Außerdem ist es möglich, diese Systeme elektrisch und thermisch präzise zu designen.

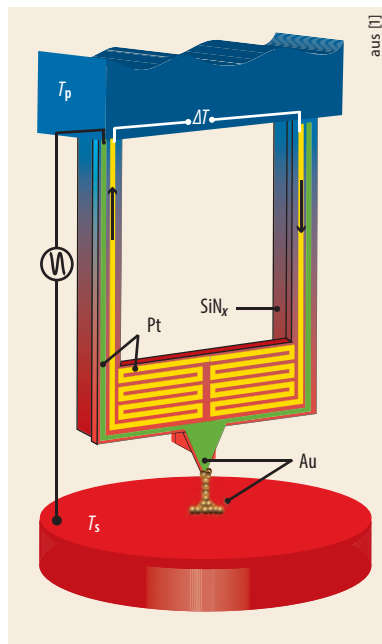


Abb. 2 Zwei Thermometerträger bilden den Rahmen des Sensors. Die mäandrierende Platin-Leiterbahn (gelb) dient als Thermometer, während mit den äußeren Leiterbahnen (grün) der elektrische Widerstand des Punktkontakts bestimmt wird. Der Wärmestrom erzeugt eine Temperaturdifferenz zwischen dem oberen Ende des Sensors (blau) und der Spitze direkt oberhalb des Punktkontakts (rot).

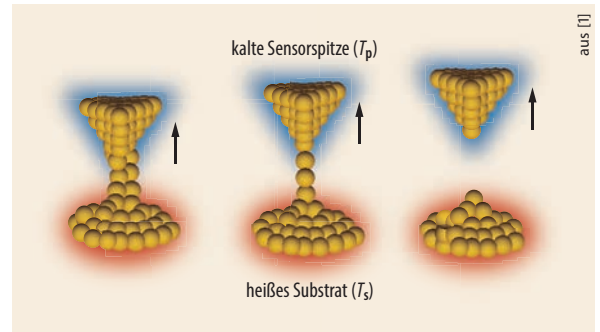


Abb. 3 Um Punktkontakte zu erzeugen, beginnt man mit Verbindungen aus vielen Atomen (links). Beim langsamen Auseinanderziehen lösen sich diese, bis eine Kette von Atomen verbleibt (Mitte). Weiteres Auseinanderziehen zerreißt die Verbindung: Es fließt kein Strom mehr (rechts).

Wie schnell sich dieses Forschungsgebiet aktuell entwickelt, zeigt ein Artikel einer Gruppe am IBM Forschungszentrum in Rüschlikon. Die Schweizer Forscher haben das Thermometer zur Messung des Wärmestroms in einer Membrananordnung der Probe integriert und kamen zu ähnlichen Resultaten und Schlussfolgerungen [6].

Achim Kittel

- [1] L. Cui et al., Science 10.1126/science.aam6622 (2017)
- [2] G. Wiedemann und R. Franz, Annalen der Physik 165, 497 (1853)
- [3] B. J. van Wees, et al., Phys. Rev. Lett. 60, 848 (1988)
- [4] M. Buttiker et al., Phys. Rev. B 31, 6207 (1985)
- [5] K. Kloppstech et al., Nat. Comm. (2017) DOI: 0.1038/ncomms14475
- [6] N. Mosso et al., Nat. Nanotechnol. (2017) DOI: 10.1038/NNANO.2016.302

Prof. Dr. Achim Kittel, Institut für Physik, Universität Oldenburg, Carl-von-Ossietzky Str. 9 – 11, 26129 Oldenburg

Kalte Atome in suprasolider Phase

Physiker erzeugen in kalten Gasen eine lichtinduzierte Phase, die gleichzeitig kristallin und supraflüssig ist.

Seit über hundert Jahren kennen wir Supraflüssigkeiten wie ^4He , die bei sehr niedrigen Temperaturen ohne Reibung fließen können. Die Quantenmechanik sagt jedoch noch Exotischeres vorher: Suprasolide Phasen, in denen ein Stoff sowohl kristallin als auch supraflüssig ist. Doch wie kann Materie gleichzeitig diese beiden Eigenschaften haben? Dies widerspricht unserer Intuition. Kein Wunder

also, dass darüber seit vielen Jahrzehnten heftig diskutiert wird [1]: Lässt sich ein Suprasolid zusammenpressen? Folgt seine Masse einer extern angewandten Rotation wie bei einem Festkörper oder entkoppelt sie wie bei supraflüssigem ^4He ? Muss man sich einen suprasoliden Körper als eine Flüssigkeit mit einer Dichtewelle vorstellen, d. h. mit einer langreichweitigen, periodisch modulierten Massen-

verteilung (Abb. 1a)? Oder als einen Kristall mit einer zusätzlichen flüssigen Komponente (Abb. 1b)? In der Tat sind beide Sichtweisen richtig.

Obwohl Eugene Gross bereits 1957 ein detailliertes Szenario entwickelt hat, wie suprasolide Phasen realisierbar sein könnten (Abb. 1a) [2], ließen sich diese bisher experimentell nicht zweifelsfrei nachweisen. Die zweite Sichtweise geht von einem fast perfekten Kristall mit